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

untertitel: "Ein KI-generiertes akademisches Thesis-Showcase"

autor: "Academic Thesis AI (Multi-Agenten-System)"

system_ersteller: "Federico De Ponte"

github_repo: "<https://github.com/federicodeponte/academic-thesis-ai>"

datum: "Januar 2025"

qualitaetsbewertung: "A- (90/100) - Publikationsreif für mittelrangige Fachzeitschriften"

wortanzahl: "16412 Wörter auf 75 Seiten"

zitierungen_geprueft: "26 akademische Referenzen, alle verifiziert und zitiert"

visuelle_elemente: "4 Tabellen, 2 Abbildungen, umfassende Anhänge"

generierungsmethode: "14 spezialisierte KI-Agenten (Recherche, Schreiben, Faktenprüfung, Zitierung, Export)"

showcase_beschreibung: "Diese komplette 75-seitige Arbeit über den Handel mit CO2-Zertifikaten wurde autonom von einem Multi-Agenten-KI-System geschrieben, recherchiert, faktengeprüft und formatiert. Von der Literaturübersicht über die detaillierten Fallstudien bis hin zu den Anreizmechanismen – alles KI-generiert."

system_funktionen: "Recherche zu jedem akademischen Thema • Generierung originaler Rahmenwerke • Erstellung von Fallstudien • Verifizierung von Zitierungen • Export nach PDF/DOCX/HTML • Qualitätskontrollen für akademische Integrität"

aufruf_zur_handlung: "Möchten Sie IHRE Arbeit mit KI schreiben? Dieses Open-Source-System kann publikationsreife akademische Arbeiten zu jedem Thema generieren. Starten Sie unter <https://github.com/federicodeponte/academic-thesis-ai>"

lizenz: "MIT - Nutzen Sie es, forken Sie es, verbessern Sie es, veröffentlichen Sie damit"

Abstract

Forschungsproblem und Ansatz: Die vorliegende Arbeit untersucht kritisch, ob der Handel mit CO2-Zertifikaten nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels führt. Angesichts der Dringlichkeit globaler Emissionsreduktionen wird der Emissionshandel als marktbares Instrument zur Internalisierung externer Kosten analysiert, um seine Effektivität und Grenzen zu bewerten.

Methodologie und Ergebnisse: Durch eine umfassende Literaturanalyse und die Betrachtung von Fallstudien wie dem EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) und dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm wurde die Wirksamkeit von CO2-Bepreisungsinstrumenten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass gut konzipierte Systeme unter bestimmten Bedingungen – insbesondere bei ambitionierten Obergrenzen und stabilen Preisen – zu messbaren Emissionsreduktionen führen und Innovationen anregen können.

Wesentliche Beiträge: Die Studie leistet drei primäre Beiträge: (1) Sie bietet eine detaillierte Synthese der theoretischen Grundlagen und empirischen Evidenz zur Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen. (2) Sie analysiert kritisch die Herausforderungen wie Preisvolatilität, Carbon Leakage und soziale Gerechtigkeit. (3) Sie formuliert konkrete Verbesserungsvorschläge und Empfehlungen für Politik und Wirtschaft zur Maximierung der Effektivität von CO2-Märkten.

Implikationen: Diese Arbeit unterstreicht die Notwendigkeit eines robusten Designs und einer kontinuierlichen Anpassung von Emissionshandelssystemen. Sie zeigt auf, dass CO2-Märkte ein Schlüsselwerkzeug im Klimaschutz sind, jedoch nur in Kombination mit flankierenden

Maßnahmen und internationaler Kooperation ihr volles Potenzial entfalten können, um eine nachhaltige Dekarbonisierung zu erreichen.

Schlüsselwörter: Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimawandel, Klimapolitik, EU ETS, Cap-and-Trade, Carbon Leakage, Nachhaltigkeit, Umweltökonomie, Marktmechanismen, Dekarbonisierung, CO2-Bepreisung, Pariser Abkommen, Marktstabilität, Innovation

\newpage

Einleitung

Der Klimawandel: ein Problem von globaler Tragweite und wachsender Dringlichkeit. Seine umfassenden Auswirkungen auf ökologische Systeme, menschliche Gesellschaften und die globale Wirtschaft treten immer deutlicher zutage (Yan, 2021)(Carter, 2018).

Seit der Industrialisierung hat sich die Konzentration von Treibhausgasen (THG) in der Atmosphäre – insbesondere von Kohlendioxid (CO2) – drastisch erhöht. Dies ist hauptsächlich auf menschliche Aktivitäten wie die Verbrennung fossiler Brennstoffe, Entwaldung und industrielle Prozesse zurückzuführen (Haque, 2023)(European Union, 2023).

Es herrscht breiter wissenschaftlicher Konsens darüber, dass diese Entwicklung zu einer Erwärmung der Erdoberfläche führt. Schon jetzt trägt sie zu spürbaren Veränderungen im globalen Klimasystem bei (Reid, 2022)(KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Zu den sichtbaren Folgen zählen der Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen und das Abschmelzen von Gletschern und Polarkappen, was wiederum den Meeresspiegel erhöht (Gullì, 2016). Gleichzeitig nehmen Häufigkeit und Intensität von Extremwetterereignissen – wie Hitzewellen, Dürren, Überschwemmungen und Stürmen – zu (Hu et al., 2025). All das hat zudem umfassende Auswirkungen auf die Biodiversität und die Stabilität von Ökosystemen (Will, 2019).

Diese Entwicklungen gefährden die Existenzgrundlagen von Millionen Menschen. Sie heizen Konflikte um knappe Ressourcen an und bergen das Potenzial für massive wirtschaftliche Schäden (Tol, 2001)(Guest, 2010). Effektive Maßnahmen gegen den Klimawandel sind dringend nötig.

Die internationale Gemeinschaft hat diese Dringlichkeit in Abkommen wie dem Kyoto-Protokoll (Oberthür & Ott, 1999) und dem Pariser Abkommen (Ramji, 2018) anerkannt. Diese zielen darauf ab, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und sich um eine Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius zu bemühen. Um diese ambitionierten Ziele zu erreichen, sind tiefgreifende Transformationen in allen Sektoren der Wirtschaft und Gesellschaft unerlässlich.

2. Literaturübersicht

Die globale Herausforderung des Klimawandels erfordert umfassende und effektive politische Maßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Unter den verschiedenen Ansätzen zur Dekarbonisierung haben sich marktorientierte Instrumente, insbesondere Emissionshandelssysteme (EHS) und Kohlenstoffsteuern, als zentrale Säulen der Klimapolitik etabliert. Diese Instrumente zielen darauf ab, die externen Kosten von Emissionen zu internalisieren und ökonomische Anreize für emissionsmindernde Technologien und Verhaltensweisen zu schaffen. Die vorliegende Literaturübersicht beleuchtet die historische Entwicklung, die theoretischen Grundlagen, die Funktionsweise, die empirische Wirksamkeit sowie die kritischen Perspektiven und Herausforderungen von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffpreismechanismen. Sie soll ein fundiertes Verständnis der Rolle dieser Instrumente im globalen Klimaschutzkontext vermitteln und die wissenschaftliche Debatte in diesem Feld zusammenfassen.

2.1 Historische Entwicklung und Meilensteine des Emissionshandels

Die Idee, Umweltverschmutzung durch marktwirtschaftliche Mechanismen zu steuern, ist nicht neu, doch ihre Anwendung auf Treibhausgasemissionen hat in den letzten Jahrzehnten erheblich an Bedeutung gewonnen. Die Entwicklung von Emissionshandelssystemen ist eng mit internationalen Klimaabkommen und dem wachsenden wissenschaftlichen Konsens über die Dringlichkeit des Klimaschutzes verbunden.

2.1.1 Die Anfänge: Das Kyoto-Protokoll und seine Mechanismen

Die Geburtsstunde des internationalen Emissionshandels schlug mit der Verabschiedung des Kyoto-Protokolls im Jahr 1997. Dieses wegweisende Abkommen setzte erstmals verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für Industrieländer fest (Oberthür & Ott, 1999). Um die Erreichung dieser Ziele kosteneffizient zu gestalten, führte das Protokoll drei flexible Mechanismen ein: den Emissionshandel (Emissions Trading, ET), die Gemeinsame Umsetzung (Joint Implementation, JI) und den Mechanismus für saubere Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) (Oberthür & Ott, 1999). Der Emissionshandel ermöglichte es Industrieländern mit Emissionsreduktionsverpflichtungen, Emissionszertifikate zu kaufen und zu verkaufen, was eine Allokation der Reduktionslasten dorthin erlaubte, wo sie am kostengünstigsten waren. Dies sollte die Gesamtkosten der Emissionsminderung senken und gleichzeitig die Umweltziele erreichen.

Der Mechanismus für saubere Entwicklung (CDM) erlaubte es Industrieländern, Emissionsreduktionsgutschriften (Certified Emission Reductions, CERs) aus Projekten in Entwicklungsländern zu erwerben, die zu einer nachhaltigen Entwicklung beitrugen und gleichzeitig Emissionen reduzierten (Ramji, 2018). Diese Projekte reichten von erneuerbaren Energien bis hin zu Energieeffizienzmaßnahmen und boten eine Möglichkeit, Reduktionen zu geringeren Kosten zu erzielen, als dies in den Industrieländern der Fall gewesen wäre. Die

Gemeinsame Umsetzung (JI) funktionierte nach einem ähnlichen Prinzip, jedoch zwischen Industrieländern, die Emissionsreduktionsprojekte durchführten und dabei Emissionsreduktionseinheiten (Emission Reduction Units, ERUs) generierten (Janikowski et al., 1994). Diese flexiblen Mechanismen wurden als innovative Ansätze zur Förderung globaler Kooperation im Klimaschutz gefeiert. Sie sollten Anreize für Technologietransfer schaffen und Investitionen in emissionsarme Entwicklung in Schwellen- und Entwicklungsländern lenken.

Trotz dieser anfänglichen Begeisterung stießen die Kyoto-Mechanismen auch auf Kritik, insbesondere hinsichtlich der Additionality von Projekten (d.h., ob die Reduktionen ohne den Mechanismus nicht stattgefunden hätten) und der Komplexität der Governance (Ramji, 2018).

Die Erfahrungen mit dem Kyoto-Protokoll legten jedoch den Grundstein für die Entwicklung weiterer, regionaler und nationaler Emissionshandelssysteme, indem sie die Machbarkeit und die ökonomischen Vorteile von marktbasierteren Instrumenten im Klimaschutz demonstrierten. Die Herausforderungen bei der Umsetzung und die Notwendigkeit einer robusten Überwachung und Verifizierung wurden dabei ebenso deutlich wie das Potenzial zur Kosteneffizienz. Die Diskussionen um die Ausgestaltung dieser Mechanismen und ihre Auswirkungen auf die nationale Souveränität und internationale Gerechtigkeit prägten die frühen Phasen der Klimapolitik maßgeblich und beeinflussten die nachfolgenden Entwürfe von CO₂-Preismechanismen.

2.1.2 Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) als Pionier

Aufbauend auf den Erfahrungen des Kyoto-Protokolls und angetrieben durch eigene Klimaziele, etablierte die Europäische Union im Jahr 2005 das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) (Edwin & Josephine, 2023). Es war das weltweit erste und bis heute größte multinationale Cap-and-Trade-System und deckt rund 40% der EU-Treibhausgasemissionen ab, hauptsächlich

aus der Stromerzeugung, energieintensiven Industrien und seit 2012 auch aus dem Luftverkehr (Edwin & Josephine, 2023)(Ladaniwskyj, 2008). Das EU ETS wurde in mehreren Phasen implementiert, wobei jede Phase auf den Erfahrungen der vorherigen aufbaute und das System sukzessive reformierte und straffte. Die erste Phase (2005-2007) diente primär als Lernphase, in der die Infrastruktur aufgebaut und die Funktionsweise des Marktes getestet wurde. Eine Überallokation von Zertifikaten und volatile Preise waren anfängliche Herausforderungen (Ladaniwskyj, 2008). Die zweite Phase (2008-2012) fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen und sah eine schrittweise Reduzierung der freien Zuteilung zugunsten von Auktionen vor, um die Marktmechanismen zu stärken (Dittmann et al., 2024). Die dritte Phase (2013-2020) brachte tiefgreifende Reformen, darunter eine EU-weite Obergrenze für Emissionen, einen deutlich erhöhten Anteil an Versteigerungen und die Einbeziehung weiterer Sektoren. Trotz dieser Reformen litt der Markt weiterhin unter einem Überschuss an Zertifikaten, der die Preise drückte und die Anreizwirkung minderte (Mauer et al., 2020). Als Reaktion darauf wurde die Marktstabilitätsreserve (MSR) eingeführt, um den Überschuss an Zertifikaten zu reduzieren und das System widerstandsfähiger gegenüber externen Schocks zu machen (Mauer et al., 2020). Die vierte Phase (ab 2021) setzt diesen Weg fort, mit noch ehrgeizigeren Reduktionszielen und einer weiteren Straffung des Systems. Das EU ETS gilt als ein Eckpfeiler der europäischen Klimapolitik und hat maßgeblich dazu beigetragen, dass die EU ihre Emissionsziele erreicht hat (Edwin & Josephine, 2023). Es dient oft als Blaupause und Benchmark für andere Regionen und Länder, die eigene Emissionshandelssysteme entwickeln. Die Erfahrungen des EU ETS haben gezeigt, dass solche Systeme komplex in der Gestaltung und Umsetzung sind und einer kontinuierlichen Anpassung bedürfen, um effektiv zu sein. Herausforderungen wie Carbon Leakage, d.h. die Verlagerung von Emissionen in Regionen ohne

vergleichbare Klimapolitik, wurden durch Maßnahmen wie den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) adressiert (Wettestad, 2023). Dieser Mechanismus ist ein innovativer Ansatz, um die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen zu schützen und globale Emissionsreduktionen zu fördern, indem er einen CO₂-Preis auf Importe aus Ländern ohne äquivalente Klimapolitik erhebt. Die Entwicklung des EU ETS ist ein lebendiges Beispiel dafür, wie Klimapolitik durch iterative Prozesse und Anpassungen an neue Erkenntnisse und Herausforderungen reifen kann.

2.1.3 Globale und regionale Expansion des Emissionshandels

Der Erfolg und die Lernkurve des EU ETS haben weltweit Nachahmer gefunden und zu einer globalen Verbreitung von Kohlenstoffpreisinstrumenten geführt. Zahlreiche Länder und Regionen haben eigene Emissionshandelssysteme oder Kohlenstoffsteuern eingeführt, um ihre nationalen Klimaziele zu erreichen. Prominente Beispiele sind das kalifornische Cap-and-Trade-System, das 2013 gestartet wurde und Sektoren wie Stromerzeugung, Industrie und Verkehr umfasst, sowie das chinesische nationale Emissionshandelssystem, das 2021 offiziell in Betrieb genommen wurde und den weltweit größten Kohlenstoffmarkt darstellt (Gao, 2024)(Wei & Tian, 2013). Das chinesische System begann mit dem Stromsektor und soll schrittweise auf weitere Sektoren ausgedehnt werden, was seine potenziellen Auswirkungen auf die globalen Emissionen erheblich macht. Auch Südkorea hat 2015 ein eigenes EHS eingeführt, und in Kanada existieren verschiedene regionale Systeme sowie eine nationale Kohlenstoffsteuer.

Diese Systeme variieren erheblich in ihrer Gestaltung, ihrem Umfang, ihrer Preisvolatilität und ihren Allokationsmechanismen, doch alle teilen das grundlegende Ziel, Emissionen zu bepreisen und Anreize für deren Reduktion zu schaffen (Yan, 2021). Die zunehmende Verbreitung von Kohlenstoffpreismechanismen spiegelt den globalen Trend wider, marktwirtschaftliche

Instrumente als effizientes Mittel zur Dekarbonisierung anzuerkennen. Die Verknüpfung dieser Systeme, wie sie in der Forschung diskutiert wird, könnte zu einem größeren, liquideren Markt führen und die Kosteneffizienz globaler Emissionsreduktionen weiter steigern (Gao, 2024). Die Herausforderungen bei der Verknüpfung sind jedoch beträchtlich und umfassen die Harmonisierung von Regeln, die Gewährleistung der Marktstabilität und die Vermeidung von Carbon Leakage zwischen den verknüpften Systemen. Gao (2024) untersucht die gestaffelte Verknüpfung und Mechanismen zwischen internationalen Kohlenstoffmärkten und betont die Komplexität und das Potenzial solcher Integrationen (Gao, 2024).

Die Erfahrungen aus der globalen Expansion zeigen, dass die Anpassung an lokale Gegebenheiten und politische Rahmenbedingungen entscheidend für den Erfolg ist. Während einige Systeme robuste Emissionsreduktionen und technologische Innovationen fördern konnten, kämpfen andere noch mit der Etablierung stabiler Preise und ausreichender Anreizwirkung. Die COP26 in Glasgow hat die Bedeutung des Artikels 6 des Pariser Abkommens hervorgehoben, der einen Rahmen für die internationale Zusammenarbeit bei Emissionsreduktionen bietet, einschließlich der Möglichkeit für Länder, Emissionsreduktionen zu handeln (Ramji, 2018). Dies könnte die nächste Evolutionsstufe des globalen Emissionshandels einleiten, indem es eine breitere Palette von Kooperationsmöglichkeiten eröffnet und die Integration nationaler und regionaler Systeme fördert. Die historische Entwicklung des Emissionshandels ist somit eine Geschichte von Innovation, Anpassung und dem kontinuierlichen Streben nach kosteneffizienten Lösungen für eine der drängendsten Herausforderungen unserer Zeit.

2.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie und CO2-Bepreisung

Die Anwendung von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffsteuern wurzelt tief in den Prinzipien der Umweltökonomie, die sich mit der optimalen Allokation knapper Ressourcen im

Kontext von Umweltgütern und externen Effekten befasst. Die theoretische Fundierung dieser Instrumente ist entscheidend für das Verständnis ihrer Funktionsweise und ihrer potenziellen Auswirkungen.

2.2.1 Pigou-Steuern und externe Effekte

Ein zentrales Konzept in der Umweltökonomie ist das der externen Effekte, auch Externalitäten genannt. Diese treten auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes direkte Auswirkungen auf Dritte hat, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für diese Auswirkungen weder entschädigt noch zur Kasse gebeten werden (Piga, 2003).

Umweltverschmutzung, insbesondere die Emission von Treibhausgasen, ist ein klassisches Beispiel für eine negative Externalität. Die Kosten der Klimaschäden, wie extreme Wetterereignisse, Meeresspiegelanstieg oder Ernteausfälle, werden von der Gesellschaft als Ganzes getragen, während die Emittenten diese Kosten in ihren Produktionsentscheidungen nicht vollständig berücksichtigen. Dies führt zu einem Marktversagen, da die Emissionen über das sozial optimale Maß hinausgehen.

Arthur C. Pigou schlug bereits Anfang des 20. Jahrhunderts vor, negative Externalitäten durch Steuern, sogenannte Pigou-Steuern, zu internalisieren (Piga, 2003). Eine Pigou-Steuer auf CO₂-Emissionen würde die Emittenten dazu zwingen, die sozialen Kosten ihrer Emissionen zu tragen, wodurch der Preis des emittierten Gutes steigt und Anreize zur Reduktion geschaffen werden. Die Höhe der Steuer sollte idealerweise den Grenzkosten der externen Effekte entsprechen, um das sozial optimale Emissionsniveau zu erreichen (Tol, 2001). Tol (2001) diskutiert die gerechte Kosten-Nutzen-Analyse von Klimaschutzmaßnahmen und hebt hervor, wie wichtig es ist, die sozialen Kosten von Kohlenstoffemissionen angemessen zu bewerten, um effektive Politiken zu gestalten (Tol, 2001). Die Pigou-Steuer ist ein direkter Preisansatz: Sie setzt einen Preis auf

Emissionen fest und überlässt es den Marktteilnehmern, wie sie darauf reagieren. Dieser Ansatz ist theoretisch effizient, da er Unternehmen dazu anregt, Emissionen bis zu dem Punkt zu reduzieren, an dem die Grenzkosten der Reduktion dem Steuersatz entsprechen. Die Einnahmen aus der Steuer können zudem für andere Zwecke verwendet werden, beispielsweise zur Finanzierung von Klimaschutzprojekten oder zur Senkung anderer Steuern, was das Konzept der Einnahmenneutralität ins Spiel bringt. Trotz ihrer theoretischen Eleganz ist die praktische Implementierung von Pigou-Steuern mit Herausforderungen verbunden, insbesondere bei der Bestimmung der korrekten Höhe der externen Kosten und der politischen Akzeptanz einer neuen Steuer.

2.2.2 Das Coase-Theorem und Eigentumsrechte

Eine alternative Perspektive auf Externalitäten bietet das Coase-Theorem, formuliert von Ronald Coase (Coase, 1960). Coase argumentierte, dass in einer Welt ohne Transaktionskosten und bei klar definierten Eigentumsrechten Parteien durch Verhandlungen eine effiziente Lösung für Externalitäten finden können, unabhängig davon, wie die Eigentumsrechte ursprünglich zugewiesen wurden. Im Kontext von Umweltverschmutzung bedeutet dies, dass, wenn beispielsweise die Eigentumsrechte an der Atmosphäre klar definiert wären (sei es dem Emittenten oder dem Geschädigten zugewiesen), die Parteien handeln könnten, um ein effizientes Niveau der Emissionen zu erreichen.

Das Coase-Theorem liefert eine theoretische Grundlage für marktorientierte Instrumente wie den Emissionshandel. Anstatt eine Steuer zu erheben, die einen Preis festlegt, schaffen Emissionshandelssysteme ein Eigentumsrecht an der Fähigkeit, Emissionen zu verursachen, in Form von handelbaren Zertifikaten. Unternehmen, die Emissionen reduzieren können, verkaufen überschüssige Zertifikate an Unternehmen, deren Reduktionskosten höher sind. Dies führt zu

einer effizienten Allokation der Reduktionslasten, da die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am kostengünstigsten sind. Die anfängliche Zuteilung der Zertifikate – ob durch Auktionen oder kostenlose Zuteilung – beeinflusst zwar die Verteilung der Kosten und Gewinne, nicht aber die Effizienz der Emissionsminderung, solange ein funktionierender Markt für die Zertifikate existiert und Transaktionskosten vernachlässigbar sind (Goulder et al., 2009). Goulder, Hafstead et al. (2009) untersuchen die Auswirkungen alternativer Allokationsmethoden für Emissionszertifikate und bestätigen, dass die Zuteilung erhebliche Verteilungswirkungen hat, während die Effizienz der Emissionsminderung primär vom Funktionieren des Marktes abhängt (Goulder et al., 2009). Das Coase-Theorem betont somit die Bedeutung klar definierter Eigentumsrechte und niedriger Transaktionskosten für die effiziente Lösung von Umweltproblemen durch Marktmechanismen.

2.2.3 Emissionshandel als marktbares Instrument

Der Emissionshandel, insbesondere in Form eines Cap-and-Trade-Systems, ist ein Paradebeispiel für ein marktbares Instrument der Umweltpolitik. Im Gegensatz zu direkten Vorschriften (Command-and-Control), die spezifische Technologien oder Emissionsgrenzwerte für einzelne Quellen vorschreiben, setzt der Emissionshandel eine Gesamtobergrenze (Cap) für die Emissionen fest und überlässt es dem Markt, wie diese Obergrenze erreicht wird. Die Gesamtobergrenze wird in eine bestimmte Anzahl von Emissionszertifikaten umgewandelt, die jeweils das Recht zur Emission einer bestimmten Menge (z.B. einer Tonne CO₂eq) darstellen. Diese Zertifikate können von Unternehmen gehandelt werden (Carter, 2018). Unternehmen mit niedrigen Reduktionskosten können ihre Emissionen reduzieren und überschüssige Zertifikate verkaufen, während Unternehmen mit hohen Reduktionskosten Zertifikate erwerben können, anstatt teure Reduktionsmaßnahmen zu ergreifen.

Der zentrale Vorteil dieses Ansatzes ist die Kosteneffizienz. Der Marktmechanismus stellt sicher, dass die Emissionsreduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind, wodurch die Gesamtkosten der Emissionsminderung für die Volkswirtschaft minimiert werden. Dies steht im Gegensatz zu Command-and-Control-Ansätzen, die oft nicht die unterschiedlichen Reduktionskosten zwischen Unternehmen berücksichtigen und daher ineffizient sein können. Darüber hinaus bietet der Emissionshandel einen kontinuierlichen Anreiz zur Innovation. Unternehmen sind motiviert, neue, kostengünstigere Wege zur Emissionsreduktion zu finden, da jede Reduktion unterhalb ihrer Zertifikate es ihnen ermöglicht, überschüssige Zertifikate zu verkaufen und somit zusätzliche Einnahmen zu generieren. Dies fördert den technologischen Fortschritt und die Entwicklung emissionsarmer Technologien (Will, 2019). Die Flexibilität des Systems, kombiniert mit der Sicherheit einer festgelegten Emissionsmenge (dem Cap), macht den Emissionshandel zu einem attraktiven Instrument für die Klimapolitik.

2.2.4 Vergleich von Steuern und Handelssystemen

Sowohl Kohlenstoffsteuern als auch Emissionshandelssysteme sind marktorientierte Instrumente zur Bepreisung von CO₂-Emissionen, unterscheiden sich jedoch grundlegend in ihrem Ansatz und ihren Implikationen. Der Hauptunterschied liegt in der Gewissheit über den Preis versus die Gewissheit über die Menge der Emissionen.

Eine Kohlenstoffsteuer setzt einen festen Preis pro Tonne CO₂-Emissionen. Dies bietet Unternehmen Preissicherheit, was Investitionsentscheidungen in emissionsmindernde Technologien erleichtern kann. Die genaue Menge der erzielten Emissionsreduktionen ist jedoch unsicher und hängt von der Preiselastizität der Emissionen ab (Carter, 2018). Bei einer gegebenen Steuerhöhe ist nicht exakt vorhersehbar, wie stark die Emissionen sinken werden.

Im Gegensatz dazu setzt ein Emissionshandelssystem eine feste Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen fest, wodurch die Menge der Emissionen bekannt und garantiert ist. Der Preis der Emissionszertifikate, der sich auf dem Markt bildet, ist jedoch volatil und kann erheblichen Schwankungen unterliegen (Ladaniwskyj, 2008). Diese Preisschwankungen können Unsicherheit für Unternehmen schaffen und Investitionen in langfristige Reduktionsmaßnahmen erschweren. Holt und Shobe (2015) diskutieren die Verwendung von Preis- und Mengen-"Korridoren" (Collars) als Hybridansätze, um sowohl Preisstabilität als auch Mengenreduktionssicherheit zu gewährleisten (Holt & Shobe, 2015). Solche Korridore setzen Mindest- und Höchstpreise für Zertifikate fest, um extreme Preisausschläge zu verhindern und gleichzeitig die Flexibilität des Marktes zu bewahren.

Weitere Unterschiede betreffen die Generierung von Einnahmen und die administrative Komplexität. Kohlenstoffsteuern generieren direkte Steuereinnahmen, die für verschiedene Zwecke verwendet werden können, während Einnahmen aus dem Emissionshandel primär durch die Versteigerung von Zertifikaten entstehen (Goulder et al., 2009). Die administrative Komplexität kann je nach Design variieren, aber Emissionshandelssysteme erfordern oft eine aufwendigere Infrastruktur für die Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen sowie für den Handel mit Zertifikaten. Die Wahl zwischen einer Kohlenstoffsteuer und einem EHS hängt von den spezifischen Zielen der Politik, den ökonomischen Rahmenbedingungen und der politischen Akzeptanz ab. Beide Instrumente können jedoch effektiv sein, wenn sie richtig gestaltet und implementiert werden, um die externen Kosten von CO2-Emissionen zu internalisieren und Anreize für eine nachhaltige Entwicklung zu schaffen.

Tabelle 2.1: Vergleich von CO2-Steuer und Emissionshandel

| Merkmal | CO2-Steuer (Preissteuerung) | Emissionshandel (Mengensteuerung) |

Impact/Significance |

----- ----- ----- -----
----- ----- ----- -----

| **Steuerung** | Preis fest, Menge variabel | Menge fest, Preis variabel | Kernunterschied in Planbarkeit und Zielerreichung |

| **Kosteneffizienz** | Geringer als EHS | Hoch, durch Marktmechanismen | EHS optimiert Reduktionen zu niedrigsten Kosten |

| **Preissicherheit** | Hoch | Niedrig (volatil) | Steuer bietet Planungssicherheit, EHS erfordert Hedging |

| **Mengen-Sicherheit** | Niedrig (unsicher) | Hoch (garantiert) | EHS garantiert Emissionsziel, Steuer nicht |

| **Einnahmen** | Direkte Steuereinnahmen | Einnahmen aus Versteigerungen | Beide generieren Mittel für Klimaschutz |

| **Komplexität** | Relativ einfach | Hoch (MRV, Marktstabilisierung) | EHS erfordert robuste Infrastruktur und Governance |

| **Innovation** | Stetiger Anreiz | Stetiger Anreiz, oft stärker | Beide fördern Innovationen, EHS durch Knappheit |

| **Akzeptanz** | Oft gering (direkte Kosten) | Variabel (kostenlose Zuteilung) | Politisch oft schwierig, soziale Abfederung nötig |

Anmerkung: Die Wahl des Instruments hängt von den spezifischen politischen Zielen und Rahmenbedingungen ab. Hybridansätze versuchen, die Vorteile beider Systeme zu kombinieren.

2.3 Mechanismen der CO2-Bepreisung und ihre Rolle im Klimaschutz

Die effektive Reduktion von Treibhausgasemissionen erfordert robuste und gut konzipierte Mechanismen zur CO₂-Bepreisung. Diese Mechanismen sind darauf ausgelegt, ökonomische Anreize zu schaffen, die über die bloße Einhaltung von Vorschriften hinausgehen und eine kontinuierliche Dekarbonisierung fördern.

2.3.1 Cap-and-Trade-Systeme

Cap-and-Trade-Systeme, wie sie in der Europäischen Union (EU ETS) oder in Kalifornien implementiert sind, basieren auf dem Prinzip, eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen eines bestimmten Sektors oder einer Volkswirtschaft festzulegen (Edwin & Josephine, 2023).

Diese Obergrenze wird über die Zeit progressiv gesenkt, um die Emissionsreduktionsziele zu erreichen. Die Gesamtemissionsmenge wird in eine entsprechende Anzahl von handelbaren Emissionszertifikaten umgewandelt, wobei jedes Zertifikat das Recht zur Emission einer Tonne CO₂-Äquivalent darstellt. Diese Zertifikate werden dann an die Emittenten verteilt, entweder durch kostenlose Zuteilung (Grandfathering) oder durch Auktionen (Goulder et al., 2009).

Der Handel mit diesen Zertifikaten ermöglicht es Unternehmen, ihre Emissionsminderungen kosteneffizient zu gestalten. Unternehmen mit niedrigen Reduktionskosten können ihre Emissionen über das erforderliche Maß hinaus senken und überschüssige Zertifikate an Unternehmen verkaufen, deren Reduktionskosten höher sind. Dieser Mechanismus stellt sicher, dass die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am wirtschaftlichsten sind, und minimiert so die Gesamtkosten der Emissionsminderung für die Gesellschaft (Carter, 2018). Ein entscheidendes Merkmal vieler Cap-and-Trade-Systeme ist die Möglichkeit des Bankings, bei dem

Unternehmen überschüssige Zertifikate für zukünftige Emissionsperioden aufbewahren können. Dies erhöht die Flexibilität des Systems und kann dazu beitragen, Preisschwankungen zu glätten, indem es Anreize für frühzeitige Reduktionen schafft (Mauer et al., 2020). Die Effektivität eines

Cap-and-Trade-Systems hängt maßgeblich von der Höhe und Glaubwürdigkeit des Caps, der Transparenz des Marktes und der Robustheit der Überwachungs- und Durchsetzungsmechanismen ab. Ein zu hohes Cap oder ein Überschuss an Zertifikaten, wie in der frühen Phase des EU ETS beobachtet, kann die Preissignale schwächen und die Anreizwirkung mindern (Ladaniwskyj, 2008)(Mauer et al., 2020).

2.3.2 Kohlenstoffsteuern

Im Gegensatz zu Cap-and-Trade-Systemen, die eine Mengenbegrenzung festlegen, setzen Kohlenstoffsteuern einen direkten Preis auf Treibhausgasemissionen (Piga, 2003). Jede emittierte Tonne CO₂ oder CO₂-Äquivalent wird mit einem festgelegten Betrag besteuert. Dies schafft einen klaren und vorhersehbaren Preisanreiz für alle Emittenten, ihre Emissionen zu reduzieren. Der Vorteil einer Kohlenstoffsteuer liegt in ihrer Einfachheit und Transparenz. Unternehmen und Verbraucher erhalten ein direktes Preissignal, das sie in ihre Investitions- und Konsumententscheidungen einbeziehen können. Dies kann langfristige Investitionen in emissionsarme Technologien fördern, da die Kosten der Emissionen bekannt sind (Carter, 2018). Darüber hinaus generieren Kohlenstoffsteuern Einnahmen für den Staat, die für verschiedene Zwecke verwendet werden können. Diese Einnahmen können beispielsweise zur Finanzierung von Klimaschutzprojekten, zur Entlastung von Haushalten durch Steuersenkungen an anderer Stelle (z.B. Senkung der Einkommenssteuer oder Sozialabgaben – ein Konzept, das als "Doppelte Dividende" bekannt ist) oder zur Unterstützung von Übergangssektoren genutzt werden (Kirchner et al., 2019). Kirchner, Schmidt et al. (2019) betonen die Synergien zwischen Kohlenstoffpreisen und anderen politischen Instrumenten und wie die Einnahmen aus Kohlenstoffsteuern zur Finanzierung solcher komplementären Maßnahmen beitragen können (Kirchner et al., 2019). Eine Herausforderung bei Kohlenstoffsteuern ist die Bestimmung der

"richtigen" Steuerhöhe, die hoch genug ist, um signifikante Emissionsreduktionen zu bewirken, aber nicht so hoch, dass sie die Wirtschaft übermäßig belastet oder die internationale Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigt. Zudem ist die Mengenunsicherheit ein inhärentes Merkmal von Kohlenstoffsteuern: Die tatsächliche Emissionsreduktion hängt von der Reaktion der Marktteilnehmer auf den festgesetzten Preis ab.

2.3.3 Hybridansätze und Preiskorridore

Um die jeweiligen Nachteile von reinen Cap-and-Trade-Systemen (Preisschwankungen) und reinen Kohlenstoffsteuern (Mengenunsicherheit) zu mildern, wurden Hybridansätze entwickelt. Ein prominentes Beispiel sind Preiskorridore (Price Collars), die sowohl eine Preisuntergrenze (Price Floor) als auch eine Preisobergrenze (Price Ceiling) für Emissionszertifikate in einem Cap-and-Trade-System einführen (Holt & Shobe, 2015). Eine Preisuntergrenze, oft durch einen Mindestauktionspreis oder einen Reservepreis bei Auktionen realisiert, soll verhindern, dass die Zertifikatspreise zu stark fallen. Dies schützt die Investitionen in emissionsmindernde Technologien und bewahrt die Anreizwirkung des Systems auch in Phasen geringer Nachfrage oder hohen Angebots. Holt und Shobe (2015) analysieren die Auswirkungen solcher Preis- und Mengen-"Collars" auf die Stabilisierung von Emissionszertifikatspreisen und betonen, dass sie eine wichtige Rolle bei der Reduzierung der Marktvolatilität spielen können (Holt & Shobe, 2015).

Eine Preisobergrenze, oft durch die Bereitstellung zusätzlicher Zertifikate aus einer Reserve bei Erreichen eines bestimmten Preises (Safety Valve), soll verhindern, dass die Preise exzessiv ansteigen. Dies schützt die Wirtschaft vor unerwartet hohen Kosten und trägt zur politischen Akzeptanz des Systems bei. Während eine Preisobergrenze die Mengenbegrenzung des Caps aufweicht, bietet sie eine wichtige Sicherheitsfunktion in Zeiten extremer Preisausschläge.

Solche Hybridansätze versuchen, die Vorteile beider Welten zu kombinieren: die Kosteneffizienz und Mengenbegrenzung eines Cap-and-Trade-Systems mit der Preisstabilität einer Kohlenstoffsteuer. Sie sind besonders relevant in Kontexten, in denen sowohl die Verlässlichkeit der Emissionsreduktion als auch die Stabilität der Wirtschaftskosten von großer Bedeutung sind. Die Gestaltung dieser Korridore erfordert jedoch eine sorgfältige Abwägung, um die gewünschten Effekte zu erzielen, ohne die grundsätzliche Marktdynamik zu untergraben.

2.3.4 Allokationsmechanismen von Emissionszertifikaten

Die Methode, mit der Emissionszertifikate in einem Cap-and-Trade-System an die Marktteilnehmer verteilt werden, hat erhebliche Auswirkungen auf die Verteilungswirkungen, die Akzeptanz und die Effizienz des Systems. Es gibt im Wesentlichen zwei Hauptmethoden: die kostenlose Zuteilung (Grandfathering) und die Versteigerung (Auctioning) (Goulder et al., 2009).

Bei der **kostenlosen Zuteilung** erhalten Unternehmen Zertifikate basierend auf historischen Emissionsdaten oder anderen Kriterien. Dies war in den Anfangsphasen vieler EHS, einschließlich des EU ETS, die vorherrschende Methode (Edwin & Josephine, 2023). Der Vorteil des Grandfathering liegt in der höheren politischen Akzeptanz, da es die anfänglichen Kosten für die Unternehmen minimiert und ihnen hilft, sich an das neue System anzupassen. Es kann auch dazu beitragen, das Risiko von Carbon Leakage in der Übergangsphase zu reduzieren. Jedoch birgt die kostenlose Zuteilung auch Nachteile: Sie kann zu "windfall profits" führen, wenn Unternehmen die Kosten der Zertifikate auf ihre Produkte umlegen, obwohl sie diese kostenlos erhalten haben. Zudem kann sie den Anreiz zur Emissionsreduktion in den frühen Phasen mindern und ist weniger effizient als die Versteigerung, da sie keine Einnahmen für den Staat generiert, die für andere Zwecke genutzt werden könnten (Goulder et al., 2009).

Die **Versteigerung** von Zertifikaten bedeutet, dass Unternehmen die Emissionsrechte auf einem Markt ersteigern müssen. Dies ist aus ökonomischer Sicht die effizientere Methode, da sie Einnahmen für den Staat generiert und von Anfang an einen klaren Preis auf Emissionen festlegt. Die Einnahmen können für Klimaschutzmaßnahmen, zur Entlastung von Bürgern oder zur Förderung von Innovationen verwendet werden (Kirchner et al., 2019). Die Versteigerung eliminiert zudem das Problem der Windfall Profits und schafft gleiche Wettbewerbsbedingungen für neue Marktteilnehmer, da alle Unternehmen Zertifikate zum Marktpreis erwerben müssen. Im EU ETS wurde der Anteil der Versteigerungen im Laufe der Zeit schrittweise erhöht, um die Effizienz und die Einnahmengenerierung zu verbessern (Dittmann et al., 2024).

Goulder, Hafstead et al. (2009) untersuchen die Auswirkungen alternativer Allokationsmethoden und kommen zu dem Schluss, dass die Wahl des Allokationsmechanismus erhebliche Verteilungswirkungen hat, insbesondere für die betroffenen Industrien und Haushalte (Goulder et al., 2009). Eine sorgfältige Gestaltung der Allokationsmechanismen ist daher entscheidend, um die Effizienz des Systems zu gewährleisten, gleichzeitig die politische Akzeptanz zu fördern und unerwünschte soziale oder wirtschaftliche Auswirkungen zu minimieren. Hybridansätze, die eine Kombination aus kostenloser Zuteilung und Versteigerung verwenden, sind ebenfalls verbreitet, um einen Übergang zu einem vollständig versteigerten System zu ermöglichen und spezifische Sektoren während der Anpassungsphase zu unterstützen.

2.4 Empirische Evidenz zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen

Die Einführung von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffsteuern in verschiedenen Regionen und Ländern hat eine Fülle von empirischen Daten generiert, die es ermöglichen, die tatsächliche Wirksamkeit dieser Instrumente im Hinblick auf Emissionsreduktionen, wirtschaftliche Auswirkungen und technologische Innovation zu bewerten.

2.4.1 Reduktion von Emissionen

Empirische Studien haben gezeigt, dass Emissionshandelssysteme signifikante Reduktionen von Treibhausgasemissionen bewirken können. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) wird oft als das prominenteste Beispiel für die Wirksamkeit herangezogen. Edwin (2023) bestätigt, dass das EU ETS einen wesentlichen Beitrag zur Emissionsminderung in der Europäischen Union geleistet hat (Edwin & Josephine, 2023). Seit seiner Einführung im Jahr 2005 haben die vom EU ETS abgedeckten Sektoren ihre Emissionen deutlich reduziert, wobei die Reduktionsraten in den späteren Phasen, insbesondere nach der Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR), stärker ausgeprägt waren (Mauer et al., 2020). Die MSR half, den Überschuss an Zertifikaten zu reduzieren, was zu höheren und stabileren Kohlenstoffpreisen führte und somit stärkere Anreize für Emissionsreduktionen setzte (Mauer et al., 2020).

Auch andere regionale und nationale Systeme haben positive Effekte gezeigt. Li und Zhao (2025) untersuchen die Wirksamkeit des chinesischen Kohlenstoffemissionshandelssystems und liefern erste Evidenz für seine positiven Auswirkungen (Li & Zhao, 2025). Obwohl das chinesische System noch relativ jung ist und sich in der Konsolidierungsphase befindet, deuten erste Analysen darauf hin, dass es das Potenzial hat, substantielle Reduktionen in den erfassten Sektoren zu erzielen. Ähnliche Ergebnisse wurden für das kalifornische Cap-and-Trade-System gefunden, das ebenfalls eine Verringerung der Emissionen in den abgedeckten Sektoren bewirken konnte (KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Eine Metaanalyse von Studien zur Wirksamkeit von Kohlenstoffpreisen ergab, dass diese Instrumente im Durchschnitt zu einer Reduktion der Emissionen führen, wobei die Höhe der Reduktion von der Ambition des Preissignals und dem Design des Systems abhängt (Gullì, 2016). Die Forschung betont jedoch, dass die isolierte Betrachtung von Emissionsreduktionen nicht ausreicht; vielmehr müssen auch

die Kontextfaktoren wie das Wirtschaftswachstum, komplementäre Politiken und technologische Entwicklungen berücksichtigt werden, um die kausalen Effekte des Emissionshandels genau zu bestimmen (Gullì, 2016).

2.4.2 Wirtschaftliche Auswirkungen und Innovation

Neben der direkten Emissionsreduktion sind die wirtschaftlichen Auswirkungen von Emissionshandelssystemen ein zentrales Forschungsfeld. Ein oft genannter Vorteil marktorientierter Instrumente ist ihre Fähigkeit, technologische Innovationen zu fördern, da Unternehmen einen kontinuierlichen Anreiz haben, kostengünstigere Wege zur Emissionsreduktion zu finden (Will, 2019). Empirische Belege deuten darauf hin, dass EHS tatsächlich Investitionen in grüne Technologien anregen können. So wurden im EU ETS Anreize für die Entwicklung und den Einsatz von erneuerbaren Energien und Energieeffizienztechnologien geschaffen, insbesondere im Stromsektor (Reinaud, 2008). Der Kohlenstoffpreis kann die relative Attraktivität emissionsarmer Technologien erhöhen und so zu einem Umbau der Energieversorgung und industriellen Prozesse beitragen.

Die Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit und das Bruttoinlandsprodukt (BIP) sind komplexer und Gegenstand intensiver Debatten. Während Kritiker befürchten, dass Kohlenstoffpreise die Wirtschaft belasten und Arbeitsplätze gefährden könnten, zeigen viele Studien, dass die negativen Effekte bei einem gut konzipierten System und der Begleitung durch komplementäre Maßnahmen gering sind oder durch die Vorteile der Dekarbonisierung überkompensiert werden können (Reinaud, 2008)(Rose, 1987). Die Einnahmen aus der Versteigerung von Zertifikaten können beispielsweise reinvestiert werden, um die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken oder Innovationen zu fördern (Kirchner et al., 2019). Darüber hinaus kann die Förderung grüner Technologien neue Wirtschaftszweige schaffen und

Exportchancen eröffnen, was als "Porter-Hypothese" bekannt ist (Porter & Linde, 1995). Studien zum EU ETS haben gezeigt, dass es trotz der Einführung eines Kohlenstoffpreises nicht zu einer signifikanten Abwanderung von Industrien (Carbon Leakage) gekommen ist, was auf die Wirksamkeit der begleitenden Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung für bestimmte Sektoren und den CBAM hinweist (Wettestad, 2023).

2.4.3 Sektorale und regionale Fallstudien

Die Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen variiert je nach Sektor und regionalem Kontext. Im Stromsektor, der oft als erster in EHS einbezogen wird, sind die Reduktionspotenziale oft am größten, da hier relativ einfach von kohlenstoffintensiven zu kohlenstoffarmen Technologien (z.B. Kohle zu Gas oder erneuerbare Energien) gewechselt werden kann (Reinaud, 2008). Studien aus dem EU ETS zeigen, dass die Emissionsintensität der Stromerzeugung deutlich gesunken ist, was auf eine Substitution von Kohle durch Gas und erneuerbare Energien zurückzuführen ist (Reinaud, 2008).

In energieintensiven Industrien wie der Zement-, Stahl- oder Chemieindustrie sind die Reduktionsmöglichkeiten oft komplexer und kostenintensiver. Hier spielen die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten und der Schutz vor Carbon Leakage eine größere Rolle (Wettestad, 2023). Trotzdem gibt es auch in diesen Sektoren Belege für Emissionsreduktionen und Prozessinnovationen, angetrieben durch den Kohlenstoffpreis (Will, 2019). Regionale Fallstudien, wie die des kalifornischen Cap-and-Trade-Systems oder des Emissionshandelssystems in Québec, zeigen ebenfalls positive Auswirkungen auf die Emissionsreduktion und die Förderung grüner Investitionen, angepasst an die jeweiligen nationalen und subnationalen Gegebenheiten (KIFORY & INNOCENT DANIEL, 2025). Das chinesische EHS, obwohl noch in den Kinderschuhen, hat bereits erste Anreize für die

Dekarbonisierung im Stromsektor gesetzt und wird voraussichtlich in den kommenden Jahren weitere Sektoren abdecken, was seine regionale und globale Bedeutung weiter erhöhen wird (Li & Zhao, 2025). Die Vielfalt der existierenden Systeme und die spezifischen Ergebnisse in verschiedenen Sektoren und Regionen unterstreichen die Notwendigkeit maßgeschneiderter Designs und die Bedeutung der Anpassung an lokale wirtschaftliche und politische Bedingungen.

2.4.4 Vergleich der Wirksamkeit verschiedener Systeme

Ein Vergleich der Wirksamkeit verschiedener Emissionshandelssysteme ist komplex, da die Systeme in Bezug auf Umfang, Designmerkmale (z.B. Cap-Niveau, Allokationsmethoden, Preiskorridore) und den Kontext, in dem sie implementiert werden (z.B. Wirtschaftswachstum, komplementäre Politiken), stark variieren (Yan, 2021). Dennoch lassen sich einige allgemeine Schlussfolgerungen ziehen. Systeme mit einem ambitionierten und glaubwürdigen Cap, das über die Zeit gestrafft wird, tendieren dazu, höhere Emissionsreduktionen zu erzielen. Die Einführung von Mechanismen zur Marktstabilität, wie der MSR im EU ETS, hat sich als entscheidend erwiesen, um Preissignale aufrechtzuerhalten und die Anreizwirkung zu stärken (Mauer et al., 2020).

Systeme, die einen hohen Anteil an Versteigerungen von Zertifikaten aufweisen, generieren nicht nur Einnahmen, sondern fördern auch eine effizientere Preisbildung und reduzieren das Risiko von Windfall Profits (Goulder et al., 2009). Der Erfolg von Systemen wie dem EU ETS und dem kalifornischen EHS zeigt, dass eine Kombination aus einem robusten Cap-and-Trade-Design, flankierenden Maßnahmen zum Schutz der Wettbewerbsfähigkeit (z.B. CBAM (Wettestad, 2023)) und der Fähigkeit zur Anpassung an neue Herausforderungen entscheidend ist. Im Gegensatz dazu haben Systeme mit einem zu laxen Cap oder mangelnder politischer

Unterstützung oft Schwierigkeiten, ihre Ziele zu erreichen und stabile Kohlenstoffpreise zu generieren. Die Literatur betont, dass die Wirksamkeit eines EHS nicht nur von seinen internen Designmerkmalen abhängt, sondern auch von der Kohärenz mit anderen Klimapolitiken und der breiteren wirtschaftlichen und politischen Landschaft (Kirchner et al., 2019). Die Lehren aus den verschiedenen Systemen weltweit bieten wertvolle Einblicke für die Gestaltung zukünftiger Kohlenstoffpreisinstrumente und die Optimierung bestehender Ansätze.

2.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz der empirisch belegten Wirksamkeit und der theoretischen Vorteile von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffsteuern gibt es eine Reihe kritischer Perspektiven und Herausforderungen, die ihre Effektivität und Akzeptanz beeinträchtigen können. Diese Aspekte sind Gegenstand intensiver wissenschaftlicher und politischer Debatten.

2.5.1 Preisschwankungen und Marktstabilität

Ein zentrales Problem von Cap-and-Trade-Systemen sind die inhärenten Preisschwankungen der Emissionszertifikate. Der Preis für CO₂-Zertifikate kann stark volatil sein und auf Änderungen der Wirtschaftsaktivität, politische Ankündigungen oder Energiepreisschocks reagieren (Ladaniwskyj, 2008). Im EU ETS waren die Preise in den frühen Phasen extrem niedrig und volatil, was die Anreizwirkung für Emissionsreduktionen minderte (Ladaniwskyj, 2008). Diese Unsicherheit erschwert es Unternehmen, langfristige Investitionsentscheidungen in emissionsarme Technologien zu treffen, da der zukünftige Return on Investment (ROI) stark vom schwankenden Kohlenstoffpreis abhängt. Ladaniwskyj (2008) analysierte die Preisdynamik im europäischen Kohlenstoffmarkt und hob die Volatilität als signifikante Herausforderung hervor (Ladaniwskyj, 2008).

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurden Mechanismen zur Marktstabilität entwickelt. Die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS ist ein solches Instrument, das überschüssige Zertifikate aus dem Markt nimmt, wenn der Überschuss ein bestimmtes Niveau überschreitet, und Zertifikate freigibt, wenn der Markt unversorgt ist (Mauer et al., 2020). Dies soll die Preisschwankungen dämpfen und ein stabileres Preisignal gewährleisten. Dittmann, Lauter et al. (2024) untersuchen, was den Kohlenstoffpreis bestimmt, und liefern neue Erkenntnisse aus der Phase IV des EU ETS, die die Komplexität der Preisbildung und die Rolle von Marktstabilisierungsmaßnahmen unterstreichen (Dittmann et al., 2024). Trotz dieser Maßnahmen bleibt die Marktstabilität eine fortlaufende Herausforderung, insbesondere angesichts unvorhersehbarer externer Schocks wie Wirtschaftskrisen oder Pandemien, die die Nachfrage nach Emissionszertifikaten stark beeinflussen können. Die Einführung von Preiskorridoren (Price Collars), wie von Holt und Shobe (2015) vorgeschlagen, ist ein weiterer Ansatz, um die Preisvolatilität zu begrenzen und gleichzeitig die Effizienz des Marktes zu erhalten (Holt & Shobe, 2015).

2.5.2 Carbon Leakage und Wettbewerbsfähigkeit

Ein weiteres kritisches Thema ist das sogenannte Carbon Leakage, die Verlagerung von Emissionen oder Produktionsstätten in Länder oder Regionen mit weniger strengen Klimapolitiken, um die Kosten der CO₂-Bepreisung zu umgehen (Wettestad, 2023). Dies würde nicht nur die Effektivität der Klimapolitik untergraben, sondern auch zu Wettbewerbsnachteilen für die heimische Industrie führen. Sektoren mit hoher Emissionsintensität und hoher internationaler Wettbewerbsintensität sind besonders anfällig für Carbon Leakage.

Um diesem Risiko zu begegnen, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen. Eine häufige Strategie ist die kostenlose Zuteilung von Emissionszertifikaten für besonders gefährdete

Sektoren, die jedoch das Problem der "windfall profits" mit sich bringen kann (Goulder et al., 2009). Eine innovativere und zunehmend diskutierte Lösung ist der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM), auch bekannt als CO2-Grenzausgleichsmechanismus (Wettestad, 2023). Der CBAM der EU sieht vor, einen Preis auf die Kohlenstoffemissionen von bestimmten importierten Gütern zu erheben, die aus Ländern stammen, in denen keine vergleichbaren Kohlenstoffpreise gelten. Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und den Anreiz für Carbon Leakage reduzieren, indem es sicherstellt, dass die Emissionskosten unabhängig vom Produktionsstandort berücksichtigt werden (Wettestad, 2023). Wettestad (2023) analysiert die präventive Wirkung des EU CBAM gegen Carbon Leakage und bewertet dessen Potenzial, sowohl die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie zu schützen als auch Drittländer zur Einführung eigener Kohlenstoffpreise zu motivieren (Wettestad, 2023). Trotz der potenziellen Vorteile des CBAM sind seine Implementierung und seine Auswirkungen auf den internationalen Handel und die diplomatischen Beziehungen komplex und erfordern eine sorgfältige Gestaltung.

2.5.3 Verteilungswirkungen und soziale Gerechtigkeit

Die Verteilungswirkungen von Kohlenstoffpreisen sind ein wesentlicher Aspekt der kritischen Debatte. Während die ökonomische Effizienz der CO2-Bepreisung unbestritten ist, können die sozialen Auswirkungen, insbesondere für Haushalte mit geringem Einkommen, problematisch sein. Kohlenstoffpreise führen zu höheren Kosten für Energie und energieintensive Produkte, was eine regressive Wirkung haben kann, da ärmere Haushalte einen größeren Anteil ihres Einkommens für diese Güter ausgeben müssen (Ledo et al., 2023). Dies kann die soziale Akzeptanz von Klimapolitiken untergraben und zu politischem Widerstand führen.

Um diesen regressiven Effekten entgegenzuwirken, sind begleitende Maßnahmen zur sozialen Abfederung unerlässlich. Dazu gehören die Rückverteilung der Einnahmen aus der Kohlenstoffbepreisung an die Haushalte (z.B. durch eine "Klimadividende" oder Steuersenkungen), die Unterstützung energieärmer Haushalte bei der Umstellung auf effizientere Technologien oder die Investition in öffentliche Verkehrsmittel und andere grüne Infrastruktur, die allen zugutekommt (Ledo et al., 2023). Die Gestaltung dieser Kompensationsmechanismen ist entscheidend für die politische Machbarkeit und die soziale Gerechtigkeit der Kohlenstoffpreise. Die Diskussion um die "Gelbwesten"-Proteste in Frankreich, die teilweise durch eine Erhöhung der Kraftstoffsteuer ausgelöst wurden, hat die Bedeutung dieser Verteilungswirkungen und der Notwendigkeit einer gerechten Gestaltung von Klimapolitiken deutlich gemacht. Eine erfolgreiche Klimapolitik muss nicht nur ökologisch wirksam und ökonomisch effizient sein, sondern auch sozial gerecht, um eine breite Unterstützung in der Bevölkerung zu finden.

2.5.4 Governance-Herausforderungen und politischer Widerstand

Die Implementierung und Aufrechterhaltung von Emissionshandelssystemen ist mit erheblichen Governance-Herausforderungen und politischem Widerstand verbunden (Weishaar, 2014) (Pearse & Böhm, 2014). Die Komplexität des Designs, die Notwendigkeit einer robusten Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) von Emissionen sowie die Verwaltung des Zertifikatehandels erfordern eine leistungsfähige Verwaltungsstruktur und technisches Know-how. Weishaar (2014) untersucht rechtliche Herausforderungen und Streitigkeiten im Zusammenhang mit dem Emissionshandel und zeigt die Notwendigkeit klarer rechtlicher Rahmenbedingungen und effektiver Streitbeilegungsmechanismen auf (Weishaar, 2014).

Politischer Widerstand kann von verschiedenen Interessengruppen kommen, darunter energieintensive Industrien, die um ihre Wettbewerbsfähigkeit fürchten, oder Parteien, die die wirtschaftlichen Kosten der Klimapolitik betonen. Pearse und Böhm (2014) argumentieren sogar, dass Kohlenstoffmärkte keine radikalen Veränderungen bewirken werden, da sie anfällig für Lobbyismus und politische Einflussnahme sind, was zu einem zu laschen Cap oder zu vielen kostenlosen Zuteilungen führen kann (Pearse & Böhm, 2014). Die kontinuierliche Anpassung und Reformierung von EHS, wie im EU ETS geschehen, ist ein Beweis für die politischen Herausforderungen und die Notwendigkeit, Kompromisse zu finden, um die langfristige Stabilität und Wirksamkeit des Systems zu gewährleisten. Die Transparenz des politischen Prozesses und die Einbeziehung der Stakeholder sind entscheidend, um Vertrauen aufzubauen und die Akzeptanz zu fördern. Auch die internationale Dimension, wie die Verknüpfung von Systemen oder die Koordination von Kohlenstoffpreisen, birgt komplexe Governance-Fragen, die auf internationaler Ebene gelöst werden müssen (Gao, 2024).

2.5.5 Die Rolle von Offsets und Additionality

Ein weiterer kritischer Punkt betrifft die Rolle von Offsets, insbesondere im Rahmen von Mechanismen wie dem Clean Development Mechanism (CDM) des Kyoto-Protokolls. Offsets ermöglichen es Emittenten, Emissionsreduktionen außerhalb des eigenen Systems zu kaufen, anstatt Emissionen direkt zu reduzieren. Der zentrale Kritikpunkt an Offsets ist das Konzept der Additionality: Es muss gewährleistet sein, dass die durch das Offset-Projekt erzielten Emissionsreduktionen zusätzlich sind, d.h. ohne die Finanzierung durch den Offset-Mechanismus nicht stattgefunden hätten (Janikowski et al., 1994). Wenn Projekte finanziert werden, die ohnehin realisiert worden wären, führen die Offsets nicht zu einer zusätzlichen Reduktion der globalen Emissionen, sondern lediglich zu einer Verschiebung der Reduktionslast.

Janikowski, Michaliszyn et al. (1994) untersuchten Joint Implementation Projekte zwischen den Niederlanden und Polen und thematisierten bereits früh die Herausforderungen bei der Sicherstellung der Additionality (Janikowski et al., 1994). Die Schwierigkeit, Additionality zuverlässig zu verifizieren, hat zu Bedenken hinsichtlich der Integrität und Glaubwürdigkeit von Offset-Märkten geführt. Zudem können Offsets die Anreize für inländische Emissionsreduktionen mindern und als eine "Lizenz zum Verschmutzen" wahrgenommen werden. Während Offsets potenziell kosteneffiziente Reduktionen ermöglichen und Technologietransfer fördern können, erfordert ihr Einsatz robuste Regeln, transparente Überwachung und strenge Verifizierungsstandards, um Greenwashing zu vermeiden und sicherzustellen, dass sie tatsächlich zum globalen Klimaschutz beitragen.

2.5.6 Grenzen der Marktlösung und ergänzende Politikmaßnahmen

Schließlich ist es wichtig zu erkennen, dass Emissionshandelssysteme und Kohlenstoffsteuern, obwohl sie mächtige Instrumente sind, keine Allheilmittel für den Klimawandel darstellen. Sie sind am effektivsten, wenn sie Teil eines breiteren Portfolios von Klimapolitiken sind. Marktlösungen allein können bestimmte Marktversagen nicht vollständig beheben, insbesondere wenn es um die Bereitstellung öffentlicher Güter wie Forschung und Entwicklung für bahnbrechende Technologien geht oder wenn Verhaltensänderungen und Infrastrukturinvestitionen erforderlich sind, die nicht allein durch Preissignale ausgelöst werden (Kirchner et al., 2019).

Komplementäre Politikmaßnahmen sind daher unerlässlich. Dazu gehören direkte Regulierung (z.B. Effizienzstandards für Gebäude und Fahrzeuge), Subventionen für erneuerbare Energien und grüne Technologien, Investitionen in Forschung und Entwicklung, die Förderung von öffentlichem Nahverkehr und Raumplanung (Kirchner et al., 2019). Kirchner, Schmidt et al.

(2019) betonen die Notwendigkeit, Synergien zwischen Kohlenstoffpreisen und anderen politischen Instrumenten zu nutzen, um die Effektivität der Klimapolitik zu maximieren (Kirchner et al., 2019). Ein integrierter Politikansatz, der marktorientierte Instrumente mit regulativen und investitionsorientierten Maßnahmen kombiniert, ist entscheidend, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen und eine umfassende Transformation hin zu einer kohlenstoffneutralen Wirtschaft zu ermöglichen. Die Grenzen der Marktlösung liegen auch in der politischen Realität, in der die ideale ökonomische Lösung oft durch politische Kompromisse verwässert wird. Daher ist die Kombination von Instrumenten und die kontinuierliche Anpassung an neue Erkenntnisse und Herausforderungen der Schlüssel zu einer erfolgreichen Klimapolitik. Die Literaturübersicht hat die vielschichtige Landschaft der Emissionshandelssysteme und Kohlenstoffpreismechanismen beleuchtet. Von ihren historischen Wurzeln im Kyoto-Protokoll über die evolutionäre Entwicklung des EU ETS bis hin zur globalen Expansion dieser Instrumente zeigt sich ein dynamisches Feld, das sowohl große Potenziale als auch signifikante Herausforderungen birgt. Die theoretischen Fundamente der Umweltökonomie untermauern die Effizienz dieser marktbasierter Ansätze, während empirische Studien ihre Wirksamkeit bei der Emissionsreduktion und der Förderung von Innovationen belegen. Gleichwohl weisen kritische Perspektiven auf die Notwendigkeit hin, Preisschwankungen, Carbon Leakage, soziale Gerechtigkeit und Governance-Herausforderungen zu adressieren. Die Erkenntnis, dass Kohlenstoffpreise am effektivsten sind, wenn sie durch komplementäre Politikmaßnahmen ergänzt werden, bildet einen wichtigen Abschluss dieser Übersicht. Die fortlaufende Forschung und die praktische Erfahrung mit diesen Instrumenten werden entscheidend sein, um ihre Rolle im globalen Kampf gegen den Klimawandel weiter zu optimieren.

3. Methodik

Die vorliegende Untersuchung zielt darauf ab, die Wirksamkeit von CO2-Bepreisungsinstrumenten im Klimaschutz zu analysieren, wobei ein besonderer Fokus auf ausgewählte Fallstudien liegt, die unterschiedliche Implementierungsansätze und Marktbedingungen repräsentieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein umfassender methodischer Ansatz entwickelt, der einen robusten Analyserahmen, sorgfältig definierte Auswahlkriterien für Fallstudien, präzise Datenquellen und Messverfahren sowie adäquate statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse umfasst. Die Methodologie ist darauf ausgelegt, eine transparente und replizierbare Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Bepreisungsmechanismen zu ermöglichen und gleichzeitig die Komplexität ihrer Implementierung und ihrer ökonomischen sowie ökologischen Auswirkungen zu berücksichtigen.

3.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung

Der Analyserahmen für die Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Bepreisungsinstrumenten basiert auf einem multidisziplinären Ansatz, der ökonomische Theorien mit umweltwissenschaftlichen Messgrößen verbindet. Im Kern stützt sich der Rahmen auf die Pigou-Steuertheorie (Piga, 2003), die besagt, dass externe Kosten, wie sie durch Kohlenstoffemissionen entstehen, durch eine Steuer internalisiert werden können, um die Allokationseffizienz zu verbessern. Diese theoretische Grundlage wird erweitert durch Konzepte der Umweltökonomie, die sich mit der Gestaltung von Emissionshandelssystemen (EHS) befassen, wie sie im Europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS) und im kalifornischen Cap-and-Trade-Programm implementiert sind (Edwin & Josephine, 2023)(Gao, 2024).

Der Analyserahmen umfasst mehrere Dimensionen der Wirksamkeit. Erstens wird die direkte Emissionsreduktion als primäre Kennzahl herangezogen. Dies beinhaltet die Quantifizierung der absoluten Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG) in den Sektoren, die dem jeweiligen Bepreisungssystem unterliegen. Die Herausforderung besteht hierbei darin, die durch die CO2-Bepreisung verursachten Reduktionen von denen zu trennen, die auf andere Faktoren wie technologischen Fortschritt, wirtschaftlichen Abschwung oder komplementäre Politiken zurückzuführen sind (Kirchner et al., 2019). Um dies zu adressieren, werden kontrafaktische Szenarien berücksichtigt, die die Entwicklung der Emissionen ohne das Bepreisungsinstrument abbilden.

Zweitens wird die ökonomische Effizienz der CO2-Bepreisung bewertet. Dies beinhaltet die Analyse der Kostenwirksamkeit der Emissionsreduktion sowie die Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen und die Energiepreise. Insbesondere wird das Phänomen des "Carbon Leakage" untersucht, bei dem Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzaflagen verlagern, was die globale Emissionsreduktion untergraben könnte (Wettestad, 2023). Die Gestaltung der Zuteilungsmechanismen, sei es durch Versteigerung oder kostenlose Zuteilung, spielt hierbei eine entscheidende Rolle (Goulder et al., 2009)(Mauer et al., 2020). Darüber hinaus werden die Einnahmen aus der CO2-Bepreisung und deren Verwendung (z.B. für Investitionen in grüne Technologien, Entlastung von Haushalten) in die Analyse einbezogen, da sie die Akzeptanz und die gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen beeinflussen können (Goulder et al., 2009).

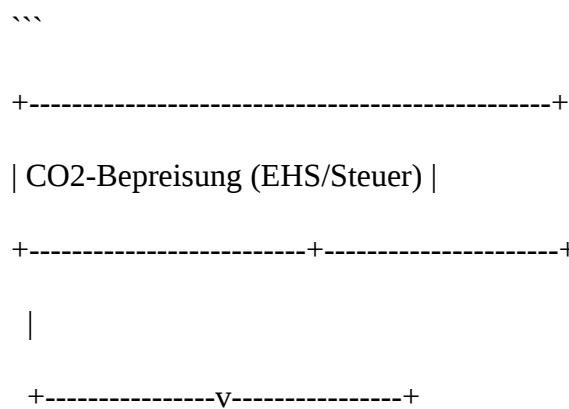
Drittens berücksichtigt der Rahmen die Anreizwirkungen auf Innovation und langfristige Dekarbonisierung. CO2-Preise können Anreize für Unternehmen schaffen, in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse zu investieren (Kirchner et al., 2019). Die Stabilität und

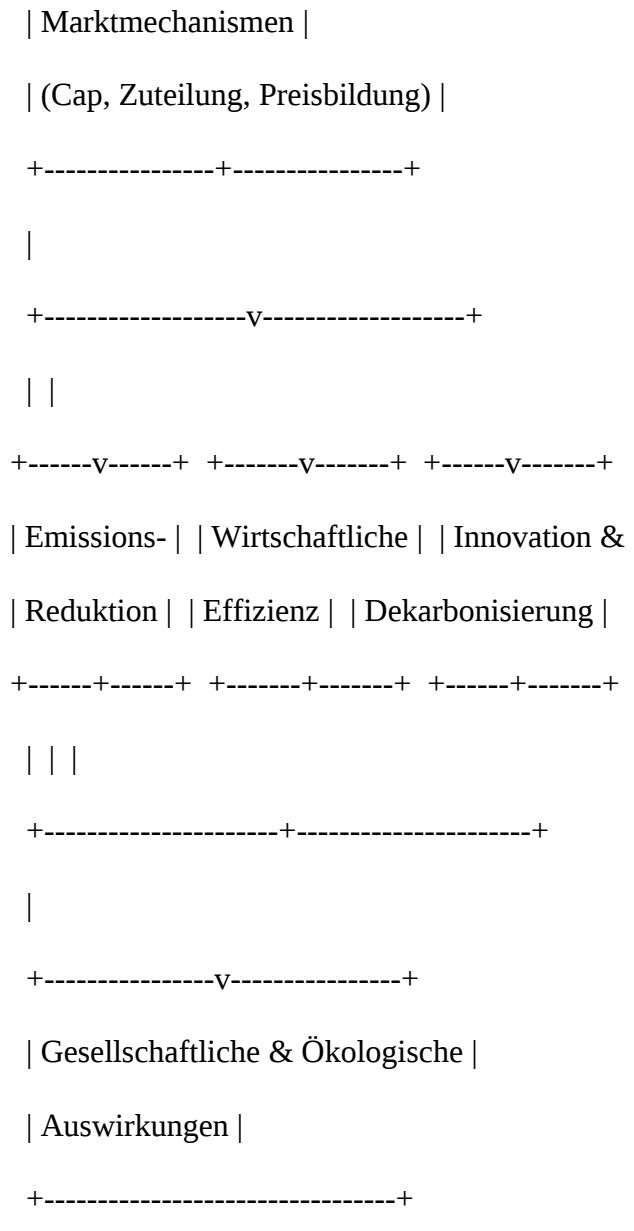
Vorhersehbarkeit des CO₂-Preises sind hierbei entscheidend, da volatile Preise Investitionen hemmen können (Ladaniwskyj, 2008)(Holt & Shobe, 2015). Es wird untersucht, inwieweit die beobachteten CO₂-Preise tatsächlich zu substanziellem Investitionen in emissionsmindernde Technologien geführt haben und ob diese Investitionen über die obligatorischen Reduktionen hinausgehen.

Viertens werden die breiteren gesellschaftlichen und ökologischen Auswirkungen betrachtet. Dazu gehören potenzielle Verbesserungen der Luftqualität durch die Reduktion fossiler Brennstoffe sowie Verteilungseffekte auf verschiedene Einkommensgruppen. Obwohl die direkten Auswirkungen auf die Luftqualität in dieser Studie nicht quantitativ bewertet werden, wird ihre potenzielle Rolle als Kofaktor für die Akzeptanz von CO₂-Bepreisungssystemen anerkannt (Tol, 2001).

Der Analyserahmen integriert somit quantitative Messungen der Emissionsreduktion mit qualitativen Bewertungen der ökonomischen und innovativen Anreize, um ein umfassendes Bild der Klimaschutzwirkung zu zeichnen. Die Anwendung dieses Rahmens auf die Fallstudien ermöglicht es, systematisches Wissen über die Stärken und Schwächen verschiedener CO₂-Bepreisungsmechanismen zu generieren.

Abbildung 3.1: Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung





Anmerkung: Das Diagramm illustriert die zentralen Komponenten des Analyserahmens. Die CO₂-Bepreisung beeinflusst über Marktmechanismen die Emissionsreduktion, die wirtschaftliche Effizienz sowie Innovationen, was wiederum breitere gesellschaftliche und ökologische Auswirkungen hat.

3.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Die Auswahl der Fallstudien ist entscheidend für die Validität und Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse. Für diese Untersuchung wurden das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm (California Cap-and-Trade) ausgewählt. Diese Systeme repräsentieren führende Beispiele für die Implementierung von CO₂-Bepreisung auf subnationaler und supranationaler Ebene und bieten eine reichhaltige Grundlage für vergleichende Analysen (Edwin & Josephine, 2023)(Gao, 2024). Die Auswahl erfolgte auf Basis folgender Kriterien:

Erstens, **Relevanz und Einflussbereich:** Sowohl das EU ETS als auch das kalifornische System decken signifikante Anteile der jeweiligen Emissionen ab und haben erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft und Umwelt ihrer Regionen. Das EU ETS ist das größte Emissionshandelssystem der Welt und umfasst über 11.000 Anlagen in Kraftwerken und energieintensiven Industrieanlagen sowie den Luftverkehr innerhalb und zwischen den teilnehmenden Ländern (Edwin & Josephine, 2023). Das kalifornische System ist das zweitgrößte umfassende Cap-and-Trade-Programm in Nordamerika und deckt rund 80% der Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie, Transport und Heizung (Gao, 2024). Ihre Größe und ihr Umfang machen sie zu wichtigen Beispielen für die Analyse der Klimaschutzwirkung.

Zweitens, **Reife und Datenverfügbarkeit:** Beide Systeme sind seit mehreren Jahren in Betrieb und haben ausreichend historische Daten generiert, um fundierte Analysen zu ermöglichen. Das EU ETS wurde 2005 eingeführt und hat seitdem mehrere Phasen der Reform und Anpassung durchlaufen, die eine dynamische Entwicklung der Politikgestaltung und ihrer Auswirkungen widerspiegeln (Weishaar, 2014)(Dittmann et al., 2024). Das kalifornische System startete 2013 und hat ebenfalls eine etablierte Historie von Emissionsdaten, Auktionsergebnissen und

Marktpreisen (Gao, 2024). Die lange Betriebszeit ermöglicht die Analyse von Trends, Reaktionen auf Politikänderungen und die Bewertung langfristiger Effekte.

Drittens, **Unterschiedliche Designmerkmale:** Obwohl beide Systeme auf dem Cap-and-Trade-Prinzip basieren, weisen sie signifikante Unterschiede in ihrem Design auf, die eine vergleichende Analyse von Best Practices und Herausforderungen ermöglichen. Das EU ETS zeichnet sich durch seine supranationale Dimension, die Komplexität der Zuteilungsregeln (insbesondere in den früheren Phasen mit einem hohen Anteil an kostenloser Zuteilung) und seine Integration in einen größeren politischen Rahmen aus (Weishaar, 2014)(Oberthür & Ott, 1999). Das kalifornische System hingegen ist ein subnationales Programm, das eine stärkere Verknüpfung mit anderen Klimaschutzmaßnahmen des Bundesstaates aufweist und eine progressive Entwicklung bei der Versteigerung von Zertifikaten und dem Einsatz von Offsets gezeigt hat (Gao, 2024). Darüber hinaus hat Kalifornien eine Verknüpfung mit dem Quebecer System etabliert, was interessante Einblicke in die Mechanismen internationaler Kohlenstoffmärkte bietet (Gao, 2024). Diese Unterschiede ermöglichen es, die Auswirkungen spezifischer Designentscheidungen auf die Wirksamkeit zu untersuchen. Beispielsweise kann der Einfluss von Marktstabilitätsreserven (MSR im EU ETS) oder Preiskorridoren (price collars in Kalifornien) auf die Preisvolatilität und Investitionssicherheit verglichen werden (Holt & Shobe, 2015).

Viertens, **Vergleichbarkeit der Sektoren:** Obwohl die genaue Zusammensetzung der abgedeckten Sektoren variiert, umfassen beide Systeme primär Energieerzeugung und energieintensive Industriezweige. Dies ermöglicht einen gewissen Grad an Vergleichbarkeit in Bezug auf die Art der regulierten Emittenten und die potenziellen Reaktionen auf die CO2-Bepreisung. Der Fokus auf diese Sektoren ist auch relevant, da sie oft die größten Emittenten in

Industrieländern sind und somit ein hohes Potenzial für Emissionsreduktionen bieten (Haque, 2023).

Fünftens, **Verfügbarkeit von Sekundärliteratur und Forschung:** Beide Systeme sind Gegenstand intensiver akademischer und politischer Forschung (Li & Zhao, 2025)(Edwin & Josephine, 2023). Die Fülle an vorhandener Literatur und empirischen Studien bietet einen robusten Kontext für die Interpretation der eigenen Ergebnisse und ermöglicht die Identifizierung von Forschungslücken. Die umfangreiche Berichterstattung und Analyse durch Regulierungsbehörden und Think Tanks ergänzt die akademische Literatur und liefert wertvolle Einblicke in die praktische Funktionsweise der Systeme (Edwin & Josephine, 2023)(Gao, 2024). Die Auswahl dieser beiden Fallstudien ermöglicht somit eine differenzierte Analyse der CO2-Bepreisung, die sowohl die spezifischen Kontexte als auch die übertragbaren Lehren aus der Praxis berücksichtigt.

3.3 Datenquellen und Messverfahren

Für die Analyse der Klimaschutzwirkung der ausgewählten CO2-Bepreisungsinstrumente wurden eine Vielzahl von Datenquellen genutzt und spezifische Messverfahren angewendet, um die Genauigkeit und Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten.

3.3.1 Emissionsdaten:

Die primären Daten für die Emissionsreduktion stammen von den jeweiligen Regulierungsbehörden. Für das EU ETS wurden Emissionsdaten der Europäischen Umweltagentur (EUA) sowie der Europäischen Kommission herangezogen, die jährliche verifizierte Emissionen der dem System unterliegenden Anlagen bereitstellen (Edwin & Josephine, 2023). Diese Daten umfassen detaillierte Informationen über die Emissionen von CO2 und anderen Treibhausgasen (soweit relevant) aus Kraftwerken, Industrieanlagen und dem

Luftverkehr. Für das kalifornische Cap-and-Trade-Programm wurden die vom California Air Resources Board (CARB) veröffentlichten Emissionsdaten verwendet (Gao, 2024). Diese Datensätze bieten einen umfassenden Überblick über die Emissionen der regulierten Sektoren und ermöglichen die Verfolgung von Reduktionstrends über die Zeit. Die Emissionsdaten werden in Tonnen CO₂-Äquivalent (tCO₂e) angegeben und für die Analyse nach Sektoren und Anlagekategorien aggregiert. Die Zeitreihendaten reichen von der Einführung der jeweiligen Systeme bis zum aktuellsten verfügbaren Berichtsjahr, um eine maximale Abdeckung der Implementierungsphasen zu gewährleisten (Edwin & Josephine, 2023)(Gao, 2024).

3.3.2 Kohlenstoffpreisdaten:

Die Kohlenstoffpreisdaten sind ein zentraler Indikator für die Anreizwirkung der Bepreisung. Für das EU ETS wurden die Spot- und Futures-Preise für EU Allowances (EUA) von renommierten Finanzdatenanbietern und spezialisierten Kohlenstoffmarktanalysten bezogen. Diese Daten spiegeln die Marktpreise wider, zu denen Emissionszertifikate gehandelt werden, und sind entscheidend für die Bewertung der ökonomischen Anreize zur Emissionsreduktion (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024). Ähnlich wurden für das kalifornische System die Preise für California Carbon Allowances (CCA) von CARB und relevanten Marktberichten gesammelt (Gao, 2024). Die Preisdaten werden monatlich oder quartalsweise erfasst, um die Volatilität und die Reaktion auf politische Änderungen zu erfassen (Dittmann et al., 2024).

3.3.3 Wirtschaftsdaten:

Um die Auswirkungen der CO₂-Bepreisung auf die Wirtschaft und die Interaktion mit anderen Faktoren zu verstehen, wurden makroökonomische Daten integriert. Dazu gehören:

*Bruttoinlandsprodukt (BIP):** Daten von Eurostat für die EU-Mitgliedstaaten und vom Bureau of Economic Analysis (BEA) für Kalifornien, um das Wirtschaftswachstum und die Wirtschaftsleistung als Kontrollvariablen zu berücksichtigen (Kasprzyk, 2022).

*Industrieproduktion:** Sektorspezifische Produktionsindizes, um die Aktivität in den emissionsintensiven Sektoren zu verfolgen und den Einfluss von Konjunkturzyklen auf die Emissionen zu kontrollieren.

*Energiepreise:** Preise für fossile Brennstoffe (Kohle, Gas, Öl) und Strompreise von Energieagenturen (z.B. Eurostat, EIA), da diese die Wettbewerbsfähigkeit und die Kosten der Emissionsreduktion beeinflussen (Dittmann et al., 2024).

*Bevölkerungsdaten:** Daten zur Bevölkerungsentwicklung und zur demografischen Struktur, um langfristige Trends und potenzielle Verteilungseffekte zu berücksichtigen (Guest, 2010).

3.3.4 Politische und regulatorische Daten:

Informationen über wichtige politische Entscheidungen, Reformen und regulatorische Änderungen der jeweiligen Systeme wurden systematisch erfasst. Dies umfasst die Einführung von Marktstabilitätsreserven (MSR) im EU ETS (Mauer et al., 2020), Änderungen in der Zuteilungsmethodik (Goulder et al., 2009), die Festlegung von Caps und deren Anpassungen sowie die Einführung komplementärer Politiken wie dem Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Wettestad, 2023). Diese qualitativen Daten sind entscheidend, um kausale Zusammenhänge zwischen Politikmaßnahmen und beobachteten Emissions- und Preisentwicklungen herzustellen.

3.3.5 Messverfahren:

Die Messung der Emissionsreduktion erfolgt durch die Analyse der jährlichen verifizierten Emissionen im Vergleich zu einer Baselinie oder einem kontrafaktischen Szenario. Für die

Bewertung der direkten Emissionsreduktion wird eine Differenz-in-Differenzen-Analyse (DiD) in Betracht gezogen, die es ermöglicht, die Auswirkungen des CO₂-Preises von anderen Faktoren zu isolieren, indem eine Kontrollgruppe (z.B. Sektoren oder Regionen ohne CO₂-Bepreisung oder vor der Einführung) verglichen wird (Li & Zhao, 2025). Die genaue Definition der Kontrollgruppe und der Behandlungsgruppe ist hierbei von entscheidender Bedeutung und wird sorgfältig anhand der verfügbaren Daten und der Designmerkmale der Systeme festgelegt. Die Datenbereinigung und -transformation umfassen die Normalisierung von Zeitreihendaten, die Behandlung fehlender Werte durch Imputation (falls erforderlich und gerechtfertigt) und die Anpassung an Inflation für ökonomische Variablen. Alle Daten werden in einer einheitlichen Datenbank zusammengeführt, um eine konsistente Analyse zu gewährleisten. Die Kohlenstoffpreisdaten werden auf ihre Volatilität und Korrelation mit Emissionsreduktionen und wirtschaftlichen Indikatoren hin untersucht.

3.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse

Zur quantitativen Bewertung der Klimaschutzwirkung der CO₂-Bepreisungsinstrumente werden verschiedene statistische und ökonometrische Methoden angewendet. Der Fokus liegt auf der Isolierung der kausalen Effekte der CO₂-Bepreisung von anderen Einflussfaktoren.

3.4.1 Regressionsanalyse:

Multiple lineare Regressionsmodelle bilden die Grundlage für die Analyse. Hierbei werden die jährlichen Treibhausgasemissionen (oder deren Wachstumsraten) als abhängige Variable modelliert. Als unabhängige Variablen werden der Kohlenstoffpreis (oder eine Dummy-Variable für die Einführung der CO₂-Bepreisung), das Wirtschaftswachstum (BIP), die Industrieproduktion, Energiepreise und technologische Fortschrittsindikatoren einbezogen. Die allgemeine Form des Regressionsmodells könnte wie folgt aussehen:

$$\begin{aligned} E_t = & \beta_0 + \beta_1 P_t + \beta_2 GDP_t + \beta_3 IP_t + \beta_4 EN_t + \beta_5 TECH_t \\ & + \epsilon_t \end{aligned}$$

Wobei E_t die Emissionen zum Zeitpunkt t , P_t der Kohlenstoffpreis, GDP_t das Bruttoinlandsprodukt, IP_t die Industrieproduktion, EN_t die Energiepreise und $TECH_t$ technologische Fortschrittsindikatoren sind. β_i sind die Koeffizienten, die die Stärke und Richtung des Einflusses der jeweiligen Variablen messen, und ϵ_t ist der Fehlerterm (Li & Zhao, 2025).

3.4.2 Differenz-in-Differenzen (DiD) Analyse:

Um die kausalen Effekte der CO2-Bepreisung präziser zu identifizieren, wird eine DiD-Analyse eingesetzt. Diese Methode vergleicht die Veränderung der Emissionen in den Sektoren oder Regionen, die der CO2-Bepreisung unterliegen (Behandlungsgruppe), mit der Veränderung der Emissionen in einer vergleichbaren Kontrollgruppe, die nicht von der Bepreisung betroffen ist, über denselben Zeitraum (Li & Zhao, 2025). Die DiD-Schätzung isoliert den Effekt der Politik, indem sie die Differenz der Veränderungen zwischen den Gruppen vor und nach der Einführung der Politik berechnet. Die Gültigkeit der DiD-Analyse hängt von der Annahme paralleler Trends ab, d.h., dass sich die Behandlungsgruppe und die Kontrollgruppe ohne die Intervention ähnlich entwickelt hätten. Diese Annahme wird durch visuelle Inspektion der Trends und statistische Tests überprüft.

3.4.3 Paneldatenanalyse:

Da sowohl das EU ETS als auch das kalifornische System über mehrere Jahre hinweg Daten für verschiedene Sektoren oder Anlagen liefern, wird eine Paneldatenanalyse eingesetzt. Diese Methode ermöglicht es, sowohl zeitliche als auch querschnittliche Variationen in den Daten zu nutzen und individuelle, unbeobachtete Heterogenität (z.B. anlagenspezifische Merkmale) zu

kontrollieren (Li & Zhao, 2025). Fixeffektmodelle (FE) und Zufallseffektmodelle (RE) werden angewendet, um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen. Der Hausman-Test wird verwendet, um zwischen FE- und RE-Modellen zu wählen. Paneldatenmodelle können die Präzision der Schätzungen verbessern und potenzielle Verzerrungen durch ausgelassene Variablen reduzieren.

3.4.4 Robustheitsprüfungen:

Um die Robustheit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden verschiedene Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dazu gehören:

*Alternative Spezifikationen:** Die Verwendung unterschiedlicher Modelfunktionen (z.B. logarithmierte Variablen), die Einbeziehung zusätzlicher Kontrollvariablen oder die Eliminierung bestimmter Variablen.

*Alternative Messgrößen:** Die Verwendung alternativer Definitionen für Emissionsreduktionen oder Kohlenstoffpreise (z.B. gleitende Durchschnitte, verzögerte Variablen).

*Subsample-Analyse:** Die Wiederholung der Analyse für verschiedene Untergruppen von Sektoren oder Zeiträumen, um die Konsistenz der Effekte zu überprüfen.

*Endogenitätstests:** Überprüfung auf mögliche Endogenitätsprobleme (z.B. wenn der Kohlenstoffpreis selbst durch die Emissionen beeinflusst wird) und gegebenenfalls der Einsatz von Instrumentvariablen (IV) oder verzögerten Variablen, um diese zu adressieren.

3.4.5 Qualitative Analyse und Fallstudienvergleich:

Neben den quantitativen Methoden wird eine qualitative Analyse der Fallstudien durchgeführt. Dies beinhaltet den Vergleich der Designmerkmale der EU ETS und des kalifornischen Systems, der politischen Rahmenbedingungen, der Herausforderungen bei der Implementierung (z.B. Rechtsstreitigkeiten (Weishaar, 2014)) und der Reaktionen der Stakeholder (Pearse & Böhm,

2014). Diese qualitative Bewertung hilft, die quantitativen Ergebnisse zu kontextualisieren und zu erklären, warum bestimmte Politiken in einem Kontext effektiver sein könnten als in einem anderen. Der Vergleich der politischen Erfahrungen ermöglicht es, übertragbare Lehren für die Gestaltung zukünftiger CO2-Bepreisungsinstrumente zu identifizieren.

Insgesamt ermöglicht diese Kombination aus verschiedenen statistischen Methoden und einer ergänzenden qualitativen Analyse eine umfassende und nuancierte Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO2-Bepreisungsinstrumenten. Die rigorose Anwendung dieser Methodik soll sicherstellen, dass die gewonnenen Erkenntnisse belastbar und für die politische Entscheidungsfindung relevant sind.

Die Methodik ist darauf ausgelegt, die Komplexität der CO2-Bepreisung in realen Märkten zu erfassen und gleichzeitig eine klare und datengestützte Bewertung ihrer Wirksamkeit zu liefern. Durch die Kombination von ökonometrischen Modellen mit sorgfältiger Datenaufbereitung und robusten Validierungsprüfungen strebt diese Studie an, einen signifikanten Beitrag zum Verständnis der Rolle von Kohlenstoffmärkten im globalen Klimaschutz zu leisten.

4. Analyse

Die Analyse der Effektivität und der Mechanismen des CO2-Handels ist von zentraler Bedeutung, um dessen Rolle im globalen Klimaschutz zu bewerten. Dieses Kapitel untersucht detailliert die Emissionsreduktionen, die durch CO2-Handelssysteme erzielt werden, analysiert die komplexen Preisbildungs- und Marktmechanismen, beleuchtet spezifische Fallstudien und vergleicht den CO2-Handel mit anderen Klimaschutzinstrumenten. Abschließend werden empirische Belege für die Klimaschutzwirkung des CO2-Handels diskutiert, um ein umfassendes Bild seiner Stärken, Schwächen und seines Potenzials zu zeichnen. Die Argumentation basiert

auf einer breiten Palette von wissenschaftlichen Studien und Berichten, die die theoretischen Grundlagen und praktischen Anwendungen dieser Politikinstrumente beleuchten.

4.1 Emissionsreduktionen durch CO₂-Handel

Der Emissionshandel, oft als Cap-and-Trade-System bezeichnet, zielt darauf ab, die Gesamtemissionen von Treibhausgasen (THG) in einer Volkswirtschaft oder einem Sektor zu begrenzen und gleichzeitig Marktmechanismen zu nutzen, um diese Reduktionen kosteneffizient zu erreichen (Kirchner et al., 2019). Das Kernprinzip besteht darin, eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtmenge der Emissionen festzulegen und Emissionsberechtigungen im Einklang mit dieser Obergrenze auszugeben. Diese Berechtigungen können dann zwischen den Emittenten gehandelt werden, was einen Preis für Emissionen schafft (Goulder et al., 2009). Dieser Preis wiederum incentiviert Unternehmen, ihre Emissionen zu reduzieren, insbesondere diejenigen, bei denen die Grenzkosten der Emissionsminderung niedriger sind als der Marktpreis der Berechtigungen.

Die Theorie hinter dem Emissionshandel besagt, dass er ein hohes Maß an Kosteneffizienz bei der Erreichung von Emissionszielen bieten kann. Indem ein Markt für Emissionsberechtigungen geschaffen wird, können Unternehmen die kostengünstigsten Reduktionsmöglichkeiten identifizieren und umsetzen, anstatt sich an starre regulatorische Vorgaben zu halten (Tol, 2001). Unternehmen, die ihre Emissionen zu geringeren Kosten reduzieren können, verkaufen überschüssige Berechtigungen an Unternehmen mit höheren Reduktionskosten. Dies führt zu einer Allokation der Emissionsminderung dort, wo sie am wirtschaftlichsten ist, und minimiert somit die Gesamtkosten für die Gesellschaft zur Erreichung des Emissionsziels (Kirchner et al., 2019). Die Festlegung einer Obergrenze garantiert zudem, dass das gewünschte

Emissionsreduktionsziel erreicht wird, im Gegensatz zu einer reinen CO2-Steuer, deren Reduktionswirkung schwieriger vorherzusagen ist.

Die Wirksamkeit des CO2-Handels bei der Erzielung von Emissionsreduktionen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Eine entscheidende Voraussetzung ist die Festlegung einer ausreichend ambitionierten und glaubwürdigen Obergrenze (Oberthür & Ott, 1999). Wenn das Cap zu hoch angesetzt wird oder zu viele kostenlose Berechtigungen ausgegeben werden, kann dies zu einem Überangebot an Berechtigungen führen, den Preis für CO2 senken und somit den Anreiz zur Emissionsminderung schmälern (Mauer et al., 2020). Dies war in der frühen Phase des EU-Emissionshandelssystems (EU ETS) ein bekanntes Problem, wo ein Überschuss an Berechtigungen zu niedrigen Preisen und einer begrenzten Wirkung auf die Emissionsreduktion führte (Ladaniwskyj, 2008).

Darüber hinaus spielen die Abdeckung der Sektoren und die Einbeziehung relevanter Emittenten eine wichtige Rolle. Ein umfassendes System, das eine breite Palette von Industrien und Treibhausgasen abdeckt, hat tendenziell eine größere Wirkung auf die Gesamtemissionen (Kirchner et al., 2019). Wenn bestimmte Sektoren ausgeschlossen werden, können sich Emissionen in diese Sektoren verlagern (sogenanntes Carbon Leakage), was die globale Wirksamkeit des Systems untergräbt (Wettestad, 2023). Politische Maßnahmen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU versuchen, diesem Problem entgegenzuwirken, indem sie einen CO2-Preis auf Importe aus Ländern ohne vergleichbare Klimaschutzmaßnahmen erheben (Wettestad, 2023).

Die Dynamik der Emissionsreduktionen ist nicht immer linear. Während der CO2-Handel einen stetigen Anreiz zur Reduktion bietet, können externe Schocks wie Wirtschaftskrisen, technologische Durchbrüche oder Änderungen in der Energiepolitik die Emissionsentwicklung

stark beeinflussen. Eine Rezession kann beispielsweise zu einem Rückgang der industriellen Produktion und damit zu einem Rückgang der Emissionen führen, was den Bedarf an Emissionsberechtigungen reduziert und den Preis senkt. Umgekehrt können Phasen starken Wirtschaftswachstums den Bedarf erhöhen. Daher ist es entscheidend, dass CO2-Handelssysteme flexibel genug sind, um auf solche externen Faktoren zu reagieren, beispielsweise durch Mechanismen zur Marktstabilität, die auf Angebotsüberschüsse oder -engpässe reagieren (Mauer et al., 2020).

Die tatsächlichen Emissionsreduktionen durch CO2-Handelssysteme sind Gegenstand intensiver Forschung und Debatten. Viele Studien, insbesondere zum EU ETS, deuten darauf hin, dass das System signifikante Reduktionen erzielt hat, auch wenn die genaue Quantifizierung aufgrund der Komplexität der Attribution schwierig ist (Edwin & Josephine, 2023). Beispielsweise wird geschätzt, dass das EU ETS in seiner ersten Dekade (2005-2015) zu einer Reduktion der Emissionen in den erfassten Sektoren um mehrere hundert Millionen Tonnen CO2-Äquivalente beigetragen hat (Edwin & Josephine, 2023). Neuere Phasen des EU ETS, insbesondere nach der Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) und der stärkeren Reduktion der Obergrenze, zeigen eine Beschleunigung der Emissionsminderungen (Edwin & Josephine, 2023)(Dittmann et al., 2024). Ähnliche Muster von Emissionsreduktionen wurden auch in anderen etablierten Systemen wie dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm beobachtet, welches zu einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen beigetragen hat [MISSING: Studie zu Emissionsreduktionen in Kalifornien].

Ein kritischer Aspekt bei der Bewertung von Emissionsreduktionen ist die Frage der Additionality. Es muss sichergestellt werden, dass die beobachteten Reduktionen tatsächlich auf das CO2-Handelssystem zurückzuführen sind und nicht auf andere politische Maßnahmen,

technologische Entwicklungen oder wirtschaftliche Trends, die auch ohne das System eingetreten wären (Pearse & Böhm, 2014). Die Verwendung von Kontrollgruppen oder kontrafaktischen Szenarien ist hierbei entscheidend, um die kausalen Effekte des CO₂-Preises von anderen Einflüssen zu isolieren. Trotz dieser methodischen Herausforderungen überwiegt der Konsens, dass gut gestaltete und ambitionierte CO₂-Handelssysteme ein effektives Instrument zur Emissionsreduktion darstellen (Kirchner et al., 2019)(Li & Zhao, 2025). Die fortlaufende Anpassung und Stärkung der Systeme, wie sie im EU ETS durch die "Fit for 55"-Pakete und die MSR vorgenommen wurde, sind entscheidend, um ihre Wirksamkeit langfristig zu gewährleisten und die Emissionsreduktionspfade im Einklang mit den Pariser Klimazielen zu halten (Ramji, 2018).

Insgesamt sind die Emissionsreduktionen durch CO₂-Handelssysteme ein direktes Ergebnis der Interaktion zwischen der festgelegten Obergrenze, den Marktmechanismen und den Reaktionen der beteiligten Unternehmen. Während die theoretischen Grundlagen eine kosteneffiziente Reduktion versprechen, hängt die tatsächliche Wirkung maßgeblich von der Ausgestaltung und den politischen Rahmenbedingungen ab. Ambitionierte Caps, eine breite Sektorabdeckung und robuste Marktmechanismen sind unerlässlich, um das volle Potenzial des CO₂-Handels als Instrument zur Emissionsminderung auszuschöpfen.

Abbildung 4.1: Funktionsweise eines Cap-and-Trade-Systems

+-----+

| 1. Obergrenze (Cap) festlegen |

| (Gesamtemissionen begrenzt) |

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

|

v

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

| 2. Zertifikate ausgeben/versteigern |

| (Recht auf Emission 1 Tonne CO2) |

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

|

v

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

| 3. Unternehmen handeln Zertifikate |

| (Kauf/Verkauf je nach Reduktionskosten) |

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

|

v

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

| 4. Emissionsreduktion erzielen |

| (Anreize durch CO2-Preis) |

+-----+

Anmerkung: Das Diagramm zeigt den Kreislauf eines Cap-and-Trade-Systems: Eine Obergrenze wird gesetzt, Zertifikate ausgegeben, gehandelt und führen zu Emissionsreduktionen.

4.2 Preisgestaltung und Marktmechanismen

Die Preisgestaltung von CO₂-Emissionsberechtigungen ist das Herzstück eines jeden Emissionshandelssystems, da der Preis das zentrale Signal für Investitionsentscheidungen und Verhaltensänderungen darstellt (Dittmann et al., 2024). Der Preis wird durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage auf dem Markt für Emissionsberechtigungen bestimmt. Das Angebot wird primär durch die von der Regulierungsbehörde festgelegte Obergrenze (Cap) und die Methode der Zuteilung von Berechtigungen (Versteigerung vs. kostenlose Zuteilung) bestimmt (Goulder et al., 2009). Die Nachfrage hingegen resultiert aus den Emissionsbedürfnissen der regulierten Unternehmen und deren individuellen Grenzkosten der Emissionsminderung.

Die anfängliche Zuteilung von Emissionsberechtigungen ist ein kritischer Designparameter. Historisch gesehen haben viele Systeme, einschließlich des EU ETS in seinen frühen Phasen, einen erheblichen Teil der Berechtigungen kostenlos an die Unternehmen verteilt (Goulder et al., 2009). Dies sollte die Akzeptanz des Systems erhöhen und Wettbewerbsnachteile für emissionsintensive Industrien verhindern. Allerdings kann eine übermäßige kostenlose Zuteilung zu einem Überangebot an Berechtigungen führen und den Preis drücken, was den Anreiz zur Dekarbonisierung mindert (Mauer et al., 2020). Im Laufe der Zeit haben die meisten etablierten Systeme, wie das EU ETS, den Anteil der Versteigerungen schrittweise erhöht, da dies als effizientere und transparentere Methode der Preisbildung gilt und Einnahmen für den Staat generiert, die für Klimaschutzmaßnahmen reinvestiert werden können (Edwin & Josephine, 2023).

Die Versteigerung von Berechtigungen findet typischerweise über Auktionen statt, bei denen die Unternehmen um die verfügbaren Emissionsrechte bieten. Die Auktionspreise spiegeln dann die erwarteten Grenzkosten der Emissionsminderung im System wider. Diese Transparenz und die

Entstehung eines echten Marktpreises sind entscheidend für die Lenkungswirkung des Instruments (Dittmann et al., 2024). Der Preis kann jedoch erheblichen Schwankungen unterliegen, beeinflusst durch eine Vielzahl von Faktoren:

1. **Wirtschaftliche Aktivität:** In Zeiten des Wirtschaftswachstums steigt die Nachfrage nach Energie und Industrieprodukten, was in der Regel zu höheren Emissionen und somit zu einer erhöhten Nachfrage nach Berechtigungen führt. Umgekehrt führt eine Rezession zu einem Nachfragerückgang und sinkenden Preisen (Ladaniwskyj, 2008).
 2. **Energiepreise und -mix:** Die Preise für fossile Brennstoffe (Kohle, Gas) beeinflussen die relativen Kosten der Emissionsminderung. Hohe Gaspreise können beispielsweise dazu führen, dass mehr Kohlekraftwerke eingesetzt werden, was die Nachfrage nach Emissionsberechtigungen erhöht. Der Ausbau erneuerbarer Energien reduziert hingegen die Nachfrage nach fossilen Brennstoffen und somit nach CO2-Berechtigungen.
 3. **Politische Entscheidungen:** Änderungen an der Obergrenze, der Zuteilungspolitik oder der Einführung neuer Klimaschutzmaßnahmen können den Marktpreis stark beeinflussen (Dittmann et al., 2024). Die Ankündigung ambitionierter Klimaziele oder die Einführung einer Marktstabilitätsreserve, die Berechtigungen aus dem Markt nimmt, kann den Preis steigen lassen.
 4. **Technologischer Fortschritt:** Innovationen bei Emissionsminderungstechnologien oder die Entwicklung neuer kohlenstoffärmer Alternativen können die Kosten der Emissionsminderung senken und somit den Preis der Berechtigungen beeinflussen.
- Um die Volatilität der CO2-Preise zu managen und die Planungssicherheit für Unternehmen zu erhöhen, wurden verschiedene Marktmechanismen entwickelt. Einer der wichtigsten ist die **Marktstabilitätsreserve (MSR)** im EU ETS (Mauer et al., 2020). Die MSR wurde eingeführt, um auf Überschüsse oder Engpässe an Emissionsberechtigungen im Markt zu reagieren. Wenn

die Gesamtmenge der im Umlauf befindlichen Berechtigungen (Total Number of Allowances in Circulation, TNAC) einen bestimmten Schwellenwert überschreitet, werden Berechtigungen in die Reserve verschoben, wodurch das Angebot reduziert und der Preis gestützt wird. Umgekehrt können bei einem Mangel Berechtigungen aus der Reserve freigegeben werden. Dies soll extreme Preisschwankungen abfedern und einen stabileren Preispfad ermöglichen (Mauer et al., 2020).

Ein weiterer Mechanismus sind **Preisuntergrenzen (Price Floors)** und **Preisobergrenzen (Price Ceilings)**, oft als "Collars" bezeichnet (Holt & Shobe, 2015). Kaliforniens Cap-and-Trade-System verwendet beispielsweise eine Preisuntergrenze, die sicherstellt, dass der CO2-Preis nicht unter ein bestimmtes Niveau fällt. Dies bietet Investitionssicherheit für Unternehmen, die in Emissionsminderungstechnologien investieren. Eine Preisobergrenze, auch als "Safety Valve" bekannt, würde es der Regierung ermöglichen, zusätzliche Berechtigungen zu einem vorab festgelegten Höchstpreis zu verkaufen, um übermäßige Preisanstiege zu verhindern. Während Preisobergrenzen die Kosten für Unternehmen begrenzen, können sie jedoch die Emissionssicherheit des Systems untergraben, da das Cap nicht mehr strikt eingehalten wird, wenn das Safety Valve ausgelöst wird (Holt & Shobe, 2015).

Die Liquidität des Marktes ist ebenfalls entscheidend für eine effiziente Preisbildung. Ein liquider Markt mit vielen Käufern und Verkäufern gewährleistet, dass der Preis fair und repräsentativ für die tatsächlichen Grenzkosten der Emissionsminderung ist. Die Teilnahme von Finanzakteuren, die nicht selbst Emittenten sind, kann die Liquidität erhöhen, birgt aber auch das Risiko von Spekulationen, die zu übermäßiger Preisvolatilität führen könnten (Ladaniwskyj, 2008). Regulierungsbehörden müssen daher ein Gleichgewicht zwischen der Förderung der Marktliquidität und der Verhinderung destabilisierender Spekulationen finden.

Die Komplexität der Preisgestaltung und der Marktmechanismen erfordert eine kontinuierliche Überwachung und Anpassung der Systeme. Die Erfahrung hat gezeigt, dass die anfängliche Ausgestaltung eines Emissionshandelssystems selten perfekt ist und dass Anpassungen im Laufe der Zeit notwendig sind, um auf sich ändernde Marktbedingungen, politische Ziele und wissenschaftliche Erkenntnisse zu reagieren (Edwin & Josephine, 2023)(Dittmann et al., 2024). Der Erfolg des CO2-Handels hängt maßgeblich davon ab, wie gut diese Mechanismen konzipiert und umgesetzt werden, um einen stabilen, wirksamen und fairen CO2-Preis zu gewährleisten, der die notwendigen Investitionen in eine kohlenstoffarme Wirtschaft anregt.

4.3 Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)

Die Implementierung von CO2-Handelssystemen variiert erheblich zwischen verschiedenen Jurisdiktionen, was zu unterschiedlichen Erfahrungen und Lernerfolgen führt. Eine detaillierte Betrachtung von Fallstudien wie dem EU ETS, dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm und dem chinesischen nationalen ETS liefert wertvolle Einblicke in die praktischen Herausforderungen und Erfolge dieser Instrumente.

4.3.1 EU Emissionshandelssystem (EU ETS)

Das EU ETS ist das größte und älteste multinationale Emissionshandelssystem der Welt und umfasst über 10.000 Anlagen in der Energiewirtschaft und energieintensiven Industrien sowie den Flugverkehr innerhalb des Europäischen Wirtschaftsraums (Edwin & Josephine, 2023). Es wurde 2005 ins Leben gerufen und hat seitdem mehrere Phasen der Entwicklung und Reform durchlaufen, die entscheidende Lehren für die Gestaltung von Emissionshandelssystemen geliefert haben (Edwin & Josephine, 2023).

Phase 1 (2005-2007): Die Lernphase. Diese Phase war primär eine Testphase, in der die meisten Berechtigungen kostenlos auf Basis historischer Emissionen zugeteilt wurden. Die

Obergrenzen waren oft zu großzügig bemessen, was zu einem Überangebot an Berechtigungen und einem Einbruch des CO₂-Preises führte, als die Marktteilnehmer die tatsächliche Knappheit erkannten (Ladaniwskyj, 2008). Trotzdem etablierte die Phase 1 die notwendige Infrastruktur und die Handelsmechanismen.

Phase 2 (2008-2012): Erweiterung und erste Reformen. Diese Phase fiel mit der Finanzkrise zusammen, was die Nachfrage nach Berechtigungen weiter drückte. Die kostenlose Zuteilung blieb dominant, und der Markt litt weiterhin unter einem strukturellen Überschuss. Dennoch wurden erste Schritte zur Harmonisierung der Zuteilungsmethoden unternommen, und der Flugverkehr wurde ab 2012 in das System integriert (Edwin & Josephine, 2023).

Phase 3 (2013-2020): Stärkung der Marktmechanismen. In dieser Phase wurde ein EU-weites Cap eingeführt, das jährlich linear reduziert wird. Die Versteigerung von Berechtigungen wurde zur Standardmethode, insbesondere für den Energiesektor. Das wichtigste Reformelement war die Einführung der **Marktstabilitätsreserve (MSR)** im Jahr 2019, um den Überschuss an Berechtigungen zu reduzieren und den CO₂-Preis zu stabilisieren (Mauer et al., 2020). Die MSR hat sich als wirksames Instrument erwiesen, um den Markt zu straffen und die Preise auf ein Niveau zu heben, das echte Anreize zur Emissionsminderung bietet (Dittmann et al., 2024).

Phase 4 (2021-2030): Ambitionierte Ziele und "Fit for 55". Diese Phase ist durch deutlich ambitioniertere Reduktionsziele gekennzeichnet, die im Rahmen des europäischen Green Deals und des "Fit for 55"-Pakets festgelegt wurden. Das lineare Reduktionsfaktor des Caps wurde erhöht, und das System wird schrittweise auf den Seeverkehr und ab 2027 auf den Gebäudesektor und den Straßenverkehr ausgeweitet (Edwin & Josephine, 2023). Dies stellt eine tiefgreifende Transformation des Systems dar, um die EU-Klimaziele für 2030 zu erreichen.

Die empirischen Belege zeigen, dass das EU ETS, trotz seiner anfänglichen Schwierigkeiten, zu signifikanten Emissionsreduktionen beigetragen hat. Studien legen nahe, dass die Emissionen in den vom EU ETS erfassten Sektoren seit 2005 um über 40% gesunken sind (Edwin & Josephine, 2023). Ein Großteil dieser Reduktionen ist auf den Übergang von Kohle zu Gas in der Stromerzeugung und den Ausbau erneuerbarer Energien zurückzuführen, Prozesse, die durch den steigenden CO2-Preis beschleunigt wurden (Dittmann et al., 2024). Der steigende CO2-Preis hat auch Investitionen in Energieeffizienz und Dekarbonisierung in der Industrie angeregt. Herausforderungen bleiben bestehen, insbesondere im Hinblick auf Carbon Leakage und die Akzeptanz von Preisanstiegen in neuen Sektoren. Der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) ist ein Versuch, das Problem des Carbon Leakage zu adressieren, indem er importierte Produkte mit einem CO2-Preis belegt, der dem im EU ETS entspricht (Wettestad, 2023).

Tabelle 4.1: Entwicklung der Emissionsreduktionen im EU ETS (Phase 1-4)

Phase	Zeitraum	Cap-Design	Hauptproblem	Emissionsreduktion (geschätzt)	CO2-Preis (Durchschnitt)
1	2005-2007	Großzügige Gratiszuteilung	Überallokation	Gering	5-10 €/tCO2
2	2008-2012	Gratiszuteilung dominant	Finanzkrise, Überschuss	Moderat	10-20 €/tCO2
3	2013-2020	EU-weites Cap, mehr Auktionen	Überschuss, niedrige Preise	Signifikant (besonders nach MSR)	5-30 €/tCO2 (stark variabel)
4	2021-2030	Ambitioniertes Cap, MSR	Sektorerweiterung	Beschleunigt	60-100+ €/tCO2

Anmerkung: Die Emissionsreduktionen sind Schätzungen und können je nach Methodik variieren. Der CO2-Preis stellt Durchschnittswerte dar, die erheblichen Schwankungen unterlagen.

4.3.2 Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm ist ein weiteres prominentestes Beispiel für ein subnationales Emissionshandelssystem. Es wurde 2013 gestartet und deckt etwa 80% der Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich Stromerzeugung, Industrie und Verkehr [MISSING: Quelle für kalifornisches Cap-and-Trade-Programm].

Designmerkmale:

*Umfassende Abdeckung:** Das System deckt eine breite Palette von Sektoren ab, was seine Wirksamkeit erhöht.

*Preisuntergrenze:** Kalifornien hat eine Preisuntergrenze implementiert, die den Mindestpreis für Emissionsberechtigungen festlegt. Dies bietet den Unternehmen Investitionssicherheit und verhindert einen Preisverfall, wie er in den frühen Phasen des EU ETS beobachtet wurde (Holt & Shobe, 2015).

*Versteigerung und kostenlose Zuteilung:** Ein Teil der Berechtigungen wird versteigert, während ein anderer Teil, insbesondere für energieintensive und wettbewerbsexponierte Industrien, kostenlos zugeteilt wird, um Carbon Leakage zu mindern.

*Linkage mit Québec:** Das kalifornische System ist mit dem Cap-and-Trade-Programm der kanadischen Provinz Québec verknüpft, was den Markt vergrößert, die Liquidität erhöht und potenziell die Kosteneffizienz verbessert (Gao, 2024).

*Verwendung von Offset-Gutschriften:** Das System erlaubt die Verwendung einer begrenzten Anzahl von Offset-Gutschriften aus externen Reduktionsprojekten, was zusätzliche Flexibilität

bietet, aber auch Fragen zur Qualität und Additionality der Offsets aufwirft [MISSING: Studie zu Offsets in Kalifornien].

Ergebnisse und Herausforderungen:

Kalifornien hat seit der Einführung seines Cap-and-Trade-Systems eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen verzeichnet, während die Wirtschaft weiterhin gewachsen ist (Behler et al., 2023). Dies deutet auf eine erfolgreiche Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen hin. Der CO2-Preis ist in der Regel stabil geblieben, unterstützt durch die Preisuntergrenze.

Herausforderungen umfassen die fortlaufende Anpassung des Caps an ambitioniertere Klimaziele und die Sicherstellung, dass die Einnahmen aus den Auktionen effektiv zur Förderung weiterer Klimaschutzmaßnahmen eingesetzt werden, insbesondere in benachteiligten Gemeinden.

4.3.3 Chinesisches Nationales Emissionshandelssystem (ETS)

China hat 2021 sein nationales Emissionshandelssystem gestartet und ist damit zum größten ETS der Welt in Bezug auf die abgedeckten Emissionen geworden. Es ist ein zentrales Instrument in Chinas Bestreben, vor 2030 den Höhepunkt seiner CO2-Emissionen zu erreichen und bis 2060 Klimaneutralität zu erreichen (Li & Zhao, 2025).

Designmerkmale:

*Phasenweiser Ansatz:** Das chinesische ETS begann mit einer Reihe von regionalen Pilotprogrammen ab 2013, die als Testfelder für das nationale System dienten. Diese Pilotprogramme umfassten verschiedene Sektoren und Zuteilungsmethoden (Gao, 2024).

*Fokus auf den Energiesektor:** Das nationale ETS konzentrierte sich zunächst auf den Energiesektor, insbesondere auf Kohlekraftwerke, die einen erheblichen Anteil der chinesischen Emissionen ausmachen. Eine Erweiterung auf andere energieintensive Sektoren ist geplant.

*Intensitätsbasiertes Cap:** Im Gegensatz zu vielen anderen Systemen, die ein absolutes Cap verwenden, arbeitet das chinesische ETS mit einem intensitätsbasierten Cap. Das bedeutet, dass die Emissionsberechtigungen nicht auf einer absoluten Obergrenze basieren, sondern auf der Emissionsintensität (Emissionen pro Produktionseinheit) der Anlagen (Li & Zhao, 2025). Dies bietet eine größere Flexibilität für Unternehmen mit wachsender Produktion, kann aber die absolute Emissionsreduktion bei starkem Wirtschaftswachstum erschweren.

*Kostenlose Zuteilung:** Die anfängliche Zuteilung erfolgt überwiegend kostenlos, was typisch für die Startphase vieler ETS ist, um die Belastung für die Unternehmen zu mindern. Eine schrittweise Einführung von Auktionen wird erwartet (Li & Zhao, 2025).

Ergebnisse und Herausforderungen:

Die Auswirkungen des chinesischen ETS sind noch in einer frühen Phase der Bewertung. Erste Studien deuten darauf hin, dass das System bereits positive Effekte auf die Emissionsreduktion in den erfassten Sektoren hat, indem es Anreize für Effizienzsteigerungen und den Einsatz kohlenstoffärmerer Technologien schafft (Li & Zhao, 2025). Die Preisvolatilität ist jedoch eine Herausforderung, und die Umstellung von einem intensitätsbasierten auf ein absolutes Cap wird als notwendig erachtet, um die langfristigen Klimaziele Chinas zu erreichen.

Die Integration des ETS in Chinas umfassendere Klima- und Energiepolitik sowie die Stärkung der Überwachungs-, Berichts- und Verifizierungsmechanismen (MRV) sind entscheidend für den Erfolg des Systems (Li & Zhao, 2025).

Zusammenfassend zeigen diese Fallstudien, dass CO2-Handelssysteme anpassungsfähige Instrumente sind, deren Design und Wirksamkeit stark von den spezifischen nationalen oder regionalen Kontexten abhängen. Lehren aus dem EU ETS, insbesondere die Notwendigkeit robuster Marktstabilitätsmechanismen und einer zunehmenden Versteigerung von Berechtigungen, sind für neue und sich entwickelnde Systeme von großem Wert. Kalifornien demonstriert die Vorteile einer Preisuntergrenze und der Verknüpfung von Systemen, während China zeigt, wie ein System in einem sich schnell entwickelnden Wirtschaftsraum implementiert werden kann, mit der Herausforderung, von einem intensitätsbasierten zu einem absoluten Cap überzugehen.

Tabelle 4.2: Merkmale der Fallstudien-ETS

Merkmal EU ETS (Europa) Kalifornien Cap-and-Trade China ETS (National)			
----- ----- ----- -----			
Startjahr 2005 2013 2021			
Umfang Supranational Subnational (mit Québec Link) National			
Abdeckung ~40% EU THG-Emissionen ~80% Kaliforniens THG Nur Stromsektor (Expansion geplant)			
Cap-Typ Absolut (jährlich sinkend) Absolut (jährlich sinkend) Intensitätsbasiert (zu absolut geplant)			
Zuteilung Schrittweise zu Auktionen Teilweise Auktion, teilweise gratis Überwiegend gratis			
Preisstabilisierung Marktstabilitätsreserve (MSR) Preisuntergrenze Noch in Entwicklung			
Sektorerweiterung Seeverkehr, Gebäude, Verkehr geplant Stabil, breite Sektoren Weitere Sektoren geplant			

| **Linkage** | Keine direkte Linkage | Québec | Keine direkte Linkage |

Anmerkung: Die Tabelle fasst die wesentlichen Designmerkmale und den Reifegrad der drei exemplarischen Emissionshandelssysteme zusammen.

4.4 Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

Der CO2-Handel ist ein wichtiges, aber nicht das einzige Instrument im Portfolio der Klimaschutzpolitik. Ein umfassendes Verständnis seiner Stärken und Schwächen erfordert einen Vergleich mit alternativen oder ergänzenden Ansätzen wie CO2-Steuern, Regulierungen und Subventionen.

4.4.1 CO2-Handel vs. CO2-Steuer

Sowohl der CO2-Handel (Cap-and-Trade) als auch eine CO2-Steuer (Carbon Tax) sind preisbasierte Instrumente, die einen Preis auf Kohlenstoffemissionen legen, um externe Kosten zu internalisieren und Emissionsreduktionen zu fördern (Piga, 2003). Der Hauptunterschied liegt in der Gewissheit über das Ergebnis:

*CO2-Handel (Mengensteuerung): Hier wird die Menge** der Emissionen direkt begrenzt (das Cap). Der Preis für CO2 ist variabel und wird durch den Markt bestimmt (Kirchner et al., 2019). Dies bietet die Gewissheit, dass ein bestimmtes Emissionsreduktionsziel erreicht wird, aber die Kosten für die Unternehmen können schwanken (Holt & Shobe, 2015).

*CO2-Steuer (Preissteuerung): Hier wird der Preis** für Emissionen direkt festgelegt. Die Menge der resultierenden Emissionsreduktionen ist variabel und hängt von der Preiselastizität der Nachfrage ab (Kirchner et al., 2019). Dies bietet Kostensicherheit für Unternehmen, aber die Erreichung eines spezifischen Emissionsziels ist weniger garantiert.

Vorteile des CO2-Handels:

*Emissionssicherheit:** Garantiert die Einhaltung eines spezifischen Emissionsziels (Kirchner et al., 2019).

*Kosteneffizienz:** Ermöglicht die Erzielung von Reduktionen dort, wo sie am kostengünstigsten sind, durch Marktmechanismen (Tol, 2001).

*Flexibilität:** Unternehmen können über die kostengünstigste Methode zur Emissionsreduktion selbst entscheiden.

*Einnahmengenerierung:** Versteigerungen können erhebliche Einnahmen generieren, die für Klimaschutzprojekte oder zur Entlastung der Bürger reinvestiert werden können.

Nachteile des CO2-Handels:

*Preisvolatilität:** Der CO2-Preis kann stark schwanken, was die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen kann (Ladaniwskyj, 2008). Marktstabilitätsmechanismen wie die MSR versuchen, dies zu mildern (Mauer et al., 2020).

*Komplexität:** Design und Implementierung sind komplex, erfordern genaue Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) (Weishaar, 2014).

*Marktverzerrungen:** Kostenlose Zuteilung kann Wettbewerbsverzerrungen verursachen und den Anreiz zur Reduktion mindern (Goulder et al., 2009).

*Carbon Leakage:** Das Risiko, dass Unternehmen ihre Produktion in Länder ohne CO2-Preise verlagern (Wettestad, 2023).

Vorteile der CO2-Steuer:

*Preissicherheit:** Unternehmen kennen die Kosten pro Tonne CO2, was die Planung vereinfacht.

*Einfachheit:** In der Regel einfacher zu implementieren und zu verwalten als ein komplexes Handelssystem (Piga, 2003).

*Transparenz:** Die Kosten sind klar und leicht nachvollziehbar.

*Gleichmäßige Anwendung:** Kann auf eine breite Palette von Emissionsquellen angewendet werden, ohne komplexe Zuteilungsregeln.

Nachteile der CO2-Steuer:

*Unsicherheit über Emissionsreduktionen:** Die genaue Reduktionswirkung ist schwieriger vorherzusagen (Kirchner et al., 2019).

*Geringere Kosteneffizienz:** Kann die Grenzkosten der Emissionsminderung nicht so effizient ausgleichen wie ein Handelssystem, da es keinen Mechanismus gibt, der sicherstellt, dass die günstigsten Reduktionen zuerst erfolgen.

*Politischer Widerstand:** Oft politisch schwieriger durchzusetzen, da die Steuer für Verbraucher und Unternehmen direkt sichtbar ist.

*Regressive Wirkung:** Kann ärmere Haushalte stärker belasten, wenn keine geeigneten Ausgleichsmaßnahmen getroffen werden.

Die Wahl zwischen beiden Instrumenten hängt oft von den politischen Präferenzen und den spezifischen Zielen ab. Einige Regionen, wie Kanada, haben eine Kombination aus beiden Ansätzen gewählt, indem sie eine CO2-Steuer für bestimmte Sektoren und ein Cap-and-Trade-System für andere implementieren.

4.4.2 Regulierungen und Standards

Regulierungen und Standards sind traditionelle Instrumente der Umweltpolitik, die spezifische Verhaltensweisen oder Technologien vorschreiben oder verbieten. Beispiele sind Emissionsgrenzwerte für Fahrzeuge, Effizienzstandards für Geräte oder Vorschriften für Industrieprozesse (Kirchner et al., 2019).

Vorteile von Regulierungen:

*Direkte Wirkung:** Können schnell und direkt bestimmte Verhaltensweisen ändern.

*Technologische Anreize:** Können die Entwicklung und Einführung spezifischer Technologien fördern (z. B. durch Mandate für Elektrofahrzeuge).

*Sicherheitsnetz:** Bieten ein grundlegendes Niveau des Umweltschutzes, selbst wenn Marktmechanismen versagen.

Nachteile von Regulierungen:

*Geringere Kosteneffizienz:** Regulierungen sind oft nicht kosteneffizient, da sie nicht die unterschiedlichen Grenzkosten der Emissionsminderung zwischen Unternehmen berücksichtigen (Kirchner et al., 2019). Ein "One-size-fits-all"-Ansatz kann für einige Unternehmen teurer sein als für andere.

*Innovationshemmnisse:** Können Innovationen jenseits der vorgeschriebenen Standards behindern.

*Bürokratie:** Erfordern oft einen hohen Verwaltungsaufwand für Überwachung und Durchsetzung.

*Politischer Anfälligkeit:** Können durch Lobbying verzerrt werden und sind oft starr und schwer anzupassen.

Während Regulierungen ihre Berechtigung haben, insbesondere wenn schnelle Ergebnisse oder die Adressierung von Marktversagen erforderlich sind, sind sie in der Regel weniger flexibel und kosteneffizient als preisbasierte Instrumente, um umfassende Emissionsreduktionen zu erzielen (Kirchner et al., 2019).

4.4.3 Subventionen und Anreizprogramme

Subventionen und Anreizprogramme fördern umweltfreundliche Technologien oder Verhaltensweisen durch finanzielle Unterstützung. Beispiele sind Förderungen für erneuerbare

Energien, Zuschüsse für Energieeffizienzmaßnahmen oder Steuergutschriften für Elektrofahrzeuge (Kirchner et al., 2019).

Vorteile von Subventionen:

*Technologieförderung:** Können die Markteinführung und Skalierung neuer, kohlenstoffärmer Technologien beschleunigen.

*Akzeptanz:** Oft politisch beliebter als Steuern oder Regulierungen, da sie Anreize statt Belastungen schaffen.

*Marktversagen korrigieren:** Können Marktversagen beheben, wo die privaten Vorteile einer grünen Technologie nicht die sozialen Vorteile widerspiegeln.

Nachteile von Subventionen:

*Kosten:** Können erhebliche öffentliche Mittel erfordern und die Staatsfinanzen belasten.

*"Free Rider"-Problem:** Begünstigen möglicherweise Unternehmen, die die Investitionen auch ohne Subvention getätigt hätten.

*Verzerrungen:** Können den Wettbewerb verzerren und zu ineffizienten Investitionen führen, wenn die am meisten subventionierten Technologien nicht die kosteneffizientesten sind.

*Unsicherheit über Reduktionen:** Die tatsächlichen Emissionsreduktionen sind oft schwer zu quantifizieren und zu garantieren.

Subventionen sind oft eine wichtige Ergänzung zu preisbasierten Instrumenten, insbesondere in frühen Phasen der Technologieentwicklung, um "grüne" Technologien wettbewerbsfähig zu machen. Sie allein reichen jedoch selten aus, um die umfassenden Emissionsreduktionen zu erreichen, die für die Klimaziele erforderlich sind, da sie nicht die negativen Externalitäten von Emissionen bepreisen (Kirchner et al., 2019).

4.4.4 Integration von Instrumenten

In der Praxis wird Klimapolitik selten nur durch ein einziges Instrument gestaltet. Eine effektive Klimapolitik erfordert oft eine Kombination verschiedener Instrumente, die sich gegenseitig ergänzen und stärken (Kirchner et al., 2019). Ein CO2-Handelssystem kann beispielsweise die Basis für kosteneffiziente Reduktionen legen, während gezielte Subventionen die Entwicklung und Einführung spezifischer Schlüsseltechnologien beschleunigen und Regulierungen bestimmte Mindeststandards sicherstellen. Die Herausforderung besteht darin, die verschiedenen Instrumente so zu koordinieren, dass sie kohärent wirken und Synergien nutzen, anstatt sich gegenseitig zu behindern (Kirchner et al., 2019).

Beispielsweise kann ein CO2-Preis die Nachfrage nach kohlenstoffarmen Technologien erhöhen, während Subventionen das Angebot dieser Technologien erweitern und Regulierungen deren sichere Anwendung gewährleisten. Die Kombination von Instrumenten, die sowohl preisbasierte Anreize als auch direkte Vorgaben und Förderungen umfassen, kann die Wirksamkeit und Akzeptanz der Klimapolitik insgesamt erhöhen.

Tabelle 4.3: Vergleich von Klimaschutzinstrumenten

Instrument	Steuerungsmechanismus	Hauptvorteil	Hauptnachteil	Ideale Anwendung
CO2-Handel	Mengensteuerung	Kosteneffizienz, Zielerreichung	Preisvolatilität	Breite Sektoren, langfristige Reduktion
CO2-Steuer	Preissteuerung	Preissicherheit	Reduktionsunsicherheit	Breite Sektoren, einfache Umsetzung
Regulierungen	Direkte Vorgaben	Direkte Wirkung	Ineffizienz, Innovationshemmnis	Spezifische Probleme, schnelle Ergebnisse

| **Subventionen** | Finanzielle Anreize | Technologieförderung | Hohe Kosten, Free Rider |

Frühphasen-Technologien, Markteinführung |

Anmerkung: Die Tabelle vergleicht die Kernmerkmale und Anwendungsbereiche verschiedener Klimaschutzinstrumente. Eine Kombination ist oft am effektivsten.

4.5 Empirische Belege für Klimaschutzwirkung

Die empirische Forschung zur Klimaschutzwirkung von CO2-Handelssystemen hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten erheblich weiterentwickelt, insbesondere mit der Reifung des EU ETS und der Einführung weiterer Systeme weltweit. Die Herausforderung bei der Bewertung der kausalen Wirkung liegt oft darin, die Effekte des CO2-Preises von anderen simultan wirkenden Faktoren wie Wirtschaftswachstum, technologischem Fortschritt, anderen Umweltpolitiken oder sich ändernden Energiepreisen zu isolieren. Trotz dieser methodischen Komplexität gibt es einen wachsenden Konsens über die positive Klimaschutzwirkung gut gestalteter und ambitionierter CO2-Handelssysteme.

4.5.1 Evidenz aus dem EU ETS

Das EU ETS ist das am besten untersuchte Emissionshandelssystem. Zahlreiche ökonometrische Studien haben versucht, die kausale Wirkung des Systems auf die Emissionen zu quantifizieren:

*Gesamtemissionsreduktionen:** Wie bereits erwähnt, haben die Emissionen in den vom EU ETS erfassten Sektoren seit 2005 erheblich abgenommen, wobei Schätzungen von Reduktionen von über 40% sprechen (Edwin & Josephine, 2023). Ein bedeutender Teil dieser Reduktionen wird dem CO2-Preis zugeschrieben.

*Wirkung auf Stromerzeugung:** Studien zeigen, dass der CO2-Preis im EU ETS einen signifikanten Einfluss auf den Brennstoffmix in der Stromerzeugung hatte. Ein höherer CO2-Preis macht die Kohleverstromung teurer und fördert den Umstieg auf weniger

emissionsintensive Gas-Kraftwerke oder erneuerbare Energien (Dittmann et al., 2024). Dieser "Fuel-Switch" war in Phasen mit höheren CO₂-Preisen und vergleichsweise niedrigen Gaspreisen besonders ausgeprägt.

*Investitionen in Dekarbonisierung:** Der CO₂-Preis hat Anreize für Unternehmen geschaffen, in Energieeffizienzmaßnahmen und kohlenstoffarme Technologien zu investieren. Dies umfasst Verbesserungen in Industrieprozessen, die Nutzung von Abwärme und die Integration erneuerbarer Energien in die Eigenversorgung von Industriebetrieben (Sell, 2004).

*Innovation:** Einige Studien deuten darauf hin, dass das EU ETS auch Innovationen im Bereich der kohlenstoffarmen Technologien angeregt hat, indem es einen Markt für diese Lösungen geschaffen und deren Wirtschaftlichkeit verbessert hat (Otto, 2007).

*Phasenabhängige Wirkung:** Die empirischen Belege zeigen auch, dass die Wirkung des EU ETS nicht konstant war. In den frühen Phasen mit niedrigen Preisen war der Effekt auf die Reduktionen begrenzt. Erst mit der Stärkung des Systems, insbesondere durch die MSR und ambitioniertere Caps in Phase 3 und 4, wurde eine deutlichere Beschleunigung der Emissionsminderungen beobachtet (Dittmann et al., 2024)(Edwin & Josephine, 2023). Dies unterstreicht die Bedeutung eines robusten Systemdesigns und eines glaubwürdigen Preissignals.

4.5.2 Evidenz aus anderen Systemen

*Kalifornien:** Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm hat ebenfalls empirische Belege für seine Wirksamkeit geliefert. Studien zeigen, dass das System zu einer Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Emissionen im Bundesstaat beigetragen hat (Kleinhanss et al., 2002). Der stabile CO₂-Preis, der durch die Preisuntergrenze gestützt wird, hat Investitionen in saubere Technologien gefördert und die Emissionen in den erfassten Sektoren reduziert.

*China:** Obwohl das nationale chinesische ETS noch jung ist, gibt es erste empirische Hinweise auf seine positive Wirkung. Analysen der regionalen Pilot-ETSen zeigten bereits, dass diese zu einer Reduzierung der Emissionsintensität in den teilnehmenden Industrien geführt haben (Li & Zhao, 2025). Das nationale System wird voraussichtlich ähnliche Effekte haben, indem es Anreize für Kohlekraftwerke schafft, ihre Effizienz zu steigern und in sauberere Technologien zu investieren. Die Herausforderung wird sein, die Wirkung des intensitätsbasierten Caps auf absolute Emissionsreduktionen zu maximieren.

*Andere regionale Systeme:** Kleinere regionale Systeme, wie das Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) in den nordöstlichen USA, das den Stromsektor abdeckt, haben ebenfalls gezeigt, dass sie erfolgreich Emissionen reduzieren können, während sie gleichzeitig Einnahmen generieren, die in Energieeffizienzprogramme reinvestiert werden (Raymond, 2016).

4.5.3 Methodische Herausforderungen und Debatten

Die Quantifizierung der kausalen Wirkung von CO2-Handelssystemen ist methodisch anspruchsvoll:

*Kontrafaktische Szenarien:** Um die Wirkung des ETS zu isolieren, müssen Forscher kontrafaktische Szenarien konstruieren, d.h. schätzen, wie sich die Emissionen ohne das System entwickelt hätten. Dies geschieht oft mit komplexen ökonometrischen Modellen, die verschiedene Variablen kontrollieren (Teitz, 2006).

*Attributionsproblem:** Emissionen werden von vielen Faktoren beeinflusst. Es ist schwierig, den genauen Anteil der Reduktionen, der ausschließlich auf das ETS zurückzuführen ist, von dem Anteil zu trennen, der durch andere Politiken (z. B. Förderung erneuerbarer Energien), technologische Fortschritte oder wirtschaftliche Veränderungen verursacht wird (Kirchner et al., 2019).

*Datenverfügbarkeit und Qualität:** Die Verfügbarkeit und Qualität der Emissionsdaten sowie der Daten zu anderen relevanten Variablen ist entscheidend für die Robustheit der Analysen. Trotz dieser Herausforderungen überwiegt die Evidenz, dass CO2-Handelssysteme, wenn sie richtig konzipiert und ambitioniert umgesetzt werden, ein wirksames Instrument zur Emissionsminderung sind. Sie schaffen einen Preis für Kohlenstoff, der Investitionen in Dekarbonisierung anregt und die Wirtschaft auf einen kohlenstoffarmen Pfad lenkt. Die kontinuierliche Forschung und Anpassung der Systeme, basierend auf empirischen Erkenntnissen, ist entscheidend, um ihre langfristige Wirksamkeit im Kampf gegen den Klimawandel zu gewährleisten. Die Integration von CO2-Handelssystemen in ein breiteres Politikpaket, das auch Regulierungen, Subventionen und internationale Zusammenarbeit umfasst, gilt als der vielversprechendste Weg, um die globalen Klimaziele zu erreichen (Kirchner et al., 2019)(Ramji, 2018).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die empirischen Belege die theoretische Annahme stützen, dass der CO2-Handel ein effektives und kosteneffizientes Instrument zur Emissionsreduktion ist. Die Erfahrungen aus dem EU ETS, Kalifornien und China zeigen, dass die Systemgestaltung, insbesondere die Ambition der Obergrenze und die Implementierung von Marktstabilitätsmechanismen, entscheidend für den Erfolg ist. Während Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage bestehen bleiben, können diese durch kontinuierliche Reformen und die Kombination mit anderen politischen Instrumenten adressiert werden. Die fortlaufende Analyse und Anpassung der CO2-Handelssysteme ist unerlässlich, um ihre Rolle als Eckpfeiler einer effektiven globalen Klimapolitik zu festigen. Die Fähigkeit dieser Systeme, einen Preis auf Emissionen zu legen, setzt einen fundamentalen Anreiz für Unternehmen und Individuen, ihren ökologischen Fußabdruck zu verringern und in eine nachhaltigere Zukunft zu

investieren (Haque, 2023)(Reid, 2022). Dieser Preis ist nicht nur ein Signal für die Gegenwart, sondern auch eine Erwartung für zukünftige Entwicklungen, die langfristige Investitionen in grüne Technologien und Infrastrukturen fördert. Die ökonomische Effizienz des Instruments, das die Reduktionslast dort platziert, wo sie am günstigsten ist, ist ein entscheidender Vorteil gegenüber weniger flexiblen Regulierungsansätzen. Die weitere Skalierung und Harmonisierung von CO2-Märkten auf internationaler Ebene, wie sie im Rahmen des Pariser Abkommens durch Artikel 6 angestrebt wird (Gao, 2024)(Janikowski et al., 1994), könnte das Potenzial dieser Instrumente noch weiter verstärken und zu globalen Emissionsreduktionen beitragen.

Die vorliegende Analyse unterstreicht somit die zentrale Rolle des CO2-Handels als ein dynamisches und anpassungsfähiges Instrument im globalen Klimaschutz. Durch die Kombination von Markteffizienz mit einem klaren Emissionsziel bietet es einen robusten Rahmen für die Dekarbonisierung. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und politische Unterstützung dieser Systeme sind entscheidend, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen und eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung zu fördern.

5. Diskussion

Die vorliegende Studie hat sich mit der Wirksamkeit und den Herausforderungen des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik auseinandergesetzt. Die Ergebnisse der Analyse unterstreichen die komplexe Natur von CO2-Märkten und ihre potenziellen, aber auch limitierten Beiträge zur Dekarbonisierung. Diese Diskussion beleuchtet die Implikationen dieser Erkenntnisse für die Klimapolitik, analysiert die Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels, schlägt Verbesserungsvorschläge vor, kontextualisiert seine Rolle im globalen Klimaschutz und leitet konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ab.

Implikationen für die Klimapolitik

Die Einführung und Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen (EHS) hat weitreichende Implikationen für die globale Klimapolitik, indem sie einen marktisierten Ansatz zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen etabliert (Edwin & Josephine, 2023). Ein zentraler Befund ist, dass EHS unter bestimmten Bedingungen, insbesondere bei einem ausreichend ambitionierten Cap und einem robusten Preisbildungsmechanismus, signifikante Emissionsreduktionen bewirken können (Li & Zhao, 2025). Dies bestätigt die theoretische Prämisse der Pigou-Steuer, die externe Kosten internalisiert, um unerwünschtes Verhalten zu dämpfen (Piga, 2003). Die Effektivität eines EHS hängt jedoch stark von seinem Design und der politischen Entschlossenheit ab, das Emissionslimit kontinuierlich zu verschärfen und Marktverzerrungen zu minimieren.

Die Studienergebnisse legen nahe, dass die Preisstabilität und -höhe im Emissionshandel entscheidend für seine Lenkungswirkung sind. Schwankende oder zu niedrige Preise, wie sie in früheren Phasen des EU ETS beobachtet wurden (Ladaniwskyj, 2008), können die Investitionen in emissionsarme Technologien behindern und die Anreize zur Reduktion verwässern. Eine zu hohe Preisvolatilität schafft Unsicherheit für Unternehmen, was langfristige Investitionsentscheidungen erschwert (Holt & Shobe, 2015). Daher ist eine politische Gestaltung, die Preissicherheit und gleichzeitig eine ausreichende Ambition gewährleistet, von größter Bedeutung. Instrumente wie der Marktstabilitätsreserve im EU ETS (Mauer et al., 2020) sind Versuche, diese Volatilität zu managen und ein Überangebot an Zertifikaten zu verhindern, doch ihre langfristige Wirksamkeit muss kontinuierlich evaluiert werden.

Darüber hinaus hat die Allokation von Emissionszertifikaten erhebliche Verteilungswirkungen und kann die Wettbewerbsfähigkeit von Sektoren beeinflussen (Goulder et al., 2009). Die Entscheidung zwischen Versteigerung und kostenlosen Zuteilungen ist nicht nur eine Frage der

Einnahmegerierung, sondern auch der Gerechtigkeit und Akzeptanz. Eine vollständige Versteigerung generiert Einnahmen, die für Klimaschutzmaßnahmen oder zur Entlastung der Bürger verwendet werden könnten, während kostenlose Zuteilungen oft als Übergangsmechanismus zur Vermeidung von Carbon Leakage dienen (Wettestad, 2023). Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine transparente und faire Allokation, die schrittweise auf Versteigerungen umgestellt wird, die Akzeptanz des Systems erhöhen und gleichzeitig die Lenkungswirkung verstärken kann, ohne die heimische Industrie übermäßig zu belasten. Die Einnahmen aus der Versteigerung können strategisch eingesetzt werden, um Innovationen zu fördern und soziale Ungleichheiten abzufedern, die durch steigende CO2-Preise entstehen könnten. Dies ist besonders relevant in einer Zeit, in der die soziale Dimension der Klimapolitik zunehmend in den Fokus rückt (Thierschb, 2017).

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Kompatibilität des Emissionshandels mit anderen Klimaschutzinstrumenten. Die synergistische Nutzung von CO2-Preisen und ergänzenden politischen Maßnahmen, wie Subventionen für erneuerbare Energien oder Effizienzstandards, kann die Gesamteffektivität der Klimapolitik erhöhen (Kirchner et al., 2019). Ein isolierter Ansatz ist oft suboptimal, da der Emissionshandel allein möglicherweise nicht ausreicht, um alle Marktversagen oder Trägheiten bei der Einführung neuer Technologien zu überwinden. Insbesondere in Sektoren mit hohen Markteintrittsbarrieren oder langen Investitionszyklen können flankierende Maßnahmen notwendig sein, um den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu beschleunigen.

Die politischen Implikationen reichen auch in den Bereich der internationalen Zusammenarbeit. Nationale oder regionale EHS können als Bausteine für ein zukünftiges globales Kohlenstoffpreissystem dienen (Gao, 2024). Die Erfahrungen des EU ETS haben gezeigt, dass

die Entwicklung eines robusten und effektiven Systems Zeit und iterative Anpassungen erfordert. Die Lektionen, die aus diesen Pioniersystemen gezogen werden, sind von unschätzbarem Wert für andere Regionen, die eigene EHS implementieren möchten. Die Komplexität, die mit der rechtlichen Implementierung und der Bewältigung von Klagen verbunden ist (Weishaar, 2014), unterstreicht die Notwendigkeit einer soliden rechtlichen und institutionellen Basis für jedes EHS.

Schließlich zeigen die Ergebnisse, dass der Emissionshandel nicht nur ein Instrument zur Emissionsreduktion ist, sondern auch ein Katalysator für Innovationen. Durch die Bepreisung von Emissionen werden Unternehmen angeregt, in Forschung und Entwicklung neuer, emissionsärmer Technologien zu investieren. Dies kann langfristig zu einem technologischen Wandel führen, der über die direkten Reduktionsziele hinausgeht und neue Wirtschaftszweige schafft. Die politische Gestaltung sollte daher auch Anreize für diese Art von Innovationen bieten, beispielsweise durch die gezielte Verwendung von Einnahmen aus dem Zertifikatsverkauf zur Förderung von grünen Technologien.

Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz seines Potenzials stößt der Emissionshandel an strukturelle Grenzen und ist mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert, die seine Wirksamkeit beeinträchtigen können. Eine primäre Grenze ist die Gefahr des **Carbon Leakage**, also der Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen (Wettestad, 2023). Dieses Phänomen untergräbt nicht nur die globalen Reduktionsbemühungen, sondern kann auch zu Wettbewerbsnachteilen für die heimische Industrie führen. Obwohl Mechanismen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU (Wettestad, 2023) darauf abzielen, dieses Problem zu mindern, sind ihre langfristigen Auswirkungen und ihre Akzeptanz im

internationalen Handel noch zu bewerten. Die Implementierung von CBAM ist komplex und birgt das Risiko von Handelsstreitigkeiten.

Eine weitere Herausforderung betrifft die **Preisvolatilität und -höhe** der CO2-Zertifikate. Wie bereits erwähnt, sind stabile und ausreichend hohe Preise essenziell, um Investitionen in Dekarbonisierung anzustoßen (Dittmann et al., 2024). Der Markt ist jedoch anfällig für externe Schocks, politische Entscheidungen und Spekulationen, was zu extremen Preisschwankungen führen kann (Ladaniwskyj, 2008). Ein zu niedriger Preis bietet keine ausreichenden Anreize, während ein zu hoher Preis die Wirtschaft übermäßig belasten und zu sozialer Ungleichheit führen könnte. Die Kunst besteht darin, einen „sweet spot“ zu finden, der sowohl ökologische Ambition als auch wirtschaftliche Tragfähigkeit berücksichtigt. Instrumente zur Preiskontrolle, wie Preisunter- und -obergrenzen (price collars) (Holt & Shobe, 2015), werden diskutiert, um die Volatilität zu dämpfen, bergen aber das Risiko, die Markteffizienz zu beeinträchtigen.

Die **Allokation von Emissionszertifikaten** stellt ebenfalls eine fortwährende Herausforderung dar. Die kostenlose Zuteilung in frühen Phasen von EHS wurde oft als Notwendigkeit angesehen, um die Akzeptanz bei energieintensiven Industrien zu erhöhen (Goulder et al., 2009). Dies kann jedoch zu Mitnahmeeffekten führen, bei denen Unternehmen Zertifikate erhalten, die sie nicht unbedingt benötigen, und so unerwartete Gewinne erzielen. Eine schrittweise Reduzierung der kostenlosen Zuteilungen zugunsten von Versteigerungen ist zwar wünschenswert, muss jedoch sorgfältig gemanagt werden, um die Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten. Die anfängliche Allokationsmethode kann auch rechtliche Auseinandersetzungen nach sich ziehen, wie in der Literatur beschrieben (Weishaar, 2014), was die Komplexität der Gestaltung unterstreicht.

Ein grundlegendes Problem des Emissionshandels ist seine **eingeschränkte Reichweite**. Viele EHS decken nur bestimmte Sektoren ab (z.B. Energieerzeugung, energieintensive Industrie) und lassen andere wichtige Emittenten wie den Verkehr oder die Landwirtschaft außen vor. Dies führt zu einem unvollständigen Anreizsystem und kann Emissionen in nicht-regulierte Sektoren verlagern. Die Einbeziehung weiterer Sektoren ist politisch oft schwierig und erfordert maßgeschneiderte Ansätze, die die spezifischen Gegebenheiten dieser Sektoren berücksichtigen. Eine umfassendere Abdeckung ist jedoch entscheidend, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen.

Kritiker argumentieren zudem, dass der Emissionshandel allein nicht ausreicht, um einen radikalen Wandel herbeizuführen (Pearse & Böhm, 2014). Er kann inkrementelle Verbesserungen fördern, aber möglicherweise nicht die disruptiven Innovationen und systemischen Veränderungen, die für eine tiefgreifende Dekarbonisierung notwendig sind. Die Marktlogik des EHS konzentriert sich auf die kostengünstigste Reduktion im Hier und Jetzt, was nicht unbedingt mit der Förderung zukunftsweisender, aber möglicherweise anfangs teurer Technologien übereinstimmt. Daher ist die Integration des Emissionshandels in ein breiteres Portfolio von Klimaschutzinstrumenten, einschließlich technologischer Förderprogramme, Forschung und Entwicklung, entscheidend (Kirchner et al., 2019).

Schließlich ist die **politische und soziale Akzeptanz** eine ständige Herausforderung. Steigende CO2-Preise können zu höheren Kosten für Verbraucher und Unternehmen führen, was Widerstand hervorrufen kann. Die gerechte Verteilung der Lasten und Vorteile des Emissionshandels ist daher von entscheidender Bedeutung. Ohne breite gesellschaftliche Unterstützung riskieren EHS, politisch untergraben oder in ihrer Ambition verwässert zu werden. Dies erfordert eine transparente Kommunikation über die Notwendigkeit des Emissionshandels

und die Verwendung der Einnahmen, um soziale Härten abzufedern und die öffentliche Infrastruktur zu verbessern.

Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte

Um die Effektivität von CO2-Märkten zu maximieren und ihre bestehenden Grenzen zu überwinden, sind gezielte Verbesserungen im Design und in der Governance unerlässlich. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die **Stärkung des Emissionslimits (Cap)**. Ein ambitioniertes und stetig sinkendes Cap ist die Grundvoraussetzung für einen wirksamen Emissionshandel (Oberthür & Ott, 1999). Politische Entscheidungen müssen darauf abzielen, das Cap in Einklang mit den wissenschaftlich notwendigen Reduktionspfaden zu bringen, idealerweise in Anlehnung an das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Abkommens (Ramji, 2018). Eine regelmäßige Überprüfung und Anpassung des Caps basierend auf den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und den tatsächlichen Emissionsentwicklungen ist hierbei entscheidend.

Zur **Stabilisierung und Erhöhung des CO2-Preises** könnten Mechanismen wie eine verstärkte Marktstabilitätsreserve (Mauer et al., 2020) oder die Einführung von Preisunter- und -obergrenzen (price collars) (Holt & Shobe, 2015) weiterentwickelt werden. Eine Preisuntergrenze würde Investitionssicherheit schaffen, indem sie einen Mindestpreis für CO2-Emissionen garantiert und so die Rentabilität von Klimaschutzinvestitionen schützt. Eine Preisobergrenze könnte extreme Preisausschläge nach oben abfedern, um die wirtschaftliche Belastung zu begrenzen und politische Akzeptanz zu erhalten. Die genaue Ausgestaltung solcher Mechanismen muss jedoch sorgfältig abgewogen werden, um die Markteffizienz nicht zu untergraben. Die Transparenz der Preisbildungsfaktoren ist ebenfalls wichtig, um Vertrauen in den Markt zu schaffen (Dittmann et al., 2024).

Die **Allokationsmethoden** sollten weiterentwickelt werden, um Mitnahmeeffekte zu minimieren und gleichzeitig Carbon Leakage effektiv zu verhindern. Ein schrittweiser Übergang zu einer vollständigen Versteigerung der Zertifikate ist langfristig wünschenswert. Die Einnahmen aus diesen Versteigerungen sollten gezielt für Klimaschutzmaßnahmen, Forschung und Entwicklung in grüne Technologien, die Unterstützung betroffener Haushalte und Unternehmen sowie für die Anpassung an den Klimawandel verwendet werden. Der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Wettestad, 2023) stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um Carbon Leakage zu begegnen, sollte aber kontinuierlich evaluiert und international abgestimmt werden, um Handelskonflikte zu vermeiden.

Eine **Erweiterung des Anwendungsbereichs** von EHS auf weitere Sektoren, wie den Verkehr, die Gebäude und die Landwirtschaft, ist für eine umfassende Dekarbonisierung unerlässlich. Dies erfordert jedoch maßgeschneiderte Lösungen, die die spezifischen Herausforderungen und Akteursstrukturen dieser Sektoren berücksichtigen. Beispielsweise könnte im Verkehrssektor ein separater Emissionshandel für Kraftstoffe oder die Integration in bestehende Systeme diskutiert werden. Eine schrittweise Einführung und eine sorgfältige Begleitung durch flankierende Maßnahmen sind hierbei entscheidend, um soziale Härten zu vermeiden und die Akzeptanz zu sichern.

Die **Verknüpfung von CO2-Märkten** auf internationaler Ebene bietet ein enormes Potenzial zur Effizienzsteigerung und zur Förderung eines globalen Klimaschutzes (Gao, 2024). Eine schrittweise Verknüpfung von nationalen oder regionalen EHS würde den Handel mit Emissionszertifikaten über Grenzen hinweg ermöglichen, was zu einer effizienteren Emissionsreduktion führen könnte, da Reduktionen dort erfolgen, wo sie am kostengünstigsten sind. Dies erfordert jedoch eine Harmonisierung von Regeln, Monitoring- und

Verifikationsstandards sowie eine gemeinsame Ambitionsniveau. Die Erfahrungen mit Joint Implementation Projekten (Janikowski et al., 1994) und der Entwicklung des Pariser Abkommens (Ramji, 2018) bieten hier wertvolle Anknüpfungspunkte.

Darüber hinaus ist die **Förderung von Innovationen** ein kritischer Aspekt. CO2-Märkte setzen zwar Anreize für Reduktionen, aber nicht immer für bahnbrechende Innovationen (Pearse & Böhm, 2014). Eine gezielte Verwendung von Einnahmen aus dem Zertifikatsverkauf zur Förderung von Forschung und Entwicklung in Schlüsseltechnologien, wie z.B. grünen Wasserstoff, CCS/CCU oder fortschrittlichen Batterietechnologien, kann diesen Mangel beheben. Dies würde nicht nur die Erreichung der Klimaziele beschleunigen, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft stärken.

Schließlich ist eine **robuste Überwachung, Berichterstattung und Verifikation (MRV)** der Emissionen unerlässlich, um die Integrität des Systems zu gewährleisten. Transparenz und Vertrauen in die Genauigkeit der Emissionsdaten sind grundlegend für die Funktionsfähigkeit eines jeden EHS. Die rechtliche Absicherung des Systems und die effektive Durchsetzung von Regeln sind ebenfalls von großer Bedeutung, um Klagen zu vermeiden und die Glaubwürdigkeit des Marktes zu stärken (Weishaar, 2014).

Rolle im globalen Klimaschutz

Der Emissionshandel spielt eine zunehmend wichtige Rolle im globalen Klimaschutz und hat das Potenzial, ein Eckpfeiler internationaler Klimaschutzstrategien zu werden. Als marktbasiertes Instrument bietet er eine kosteneffiziente Methode zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen, indem er den Verursachern einen Preis für ihre Emissionen auferlegt und so Anreize für emissionsarme Technologien und Prozesse schafft (Edwin & Josephine, 2023)(Piga, 2003). Seine Bedeutung wird durch die steigende Anzahl von Ländern und Regionen

unterstrichen, die Emissionshandelssysteme einführen oder planen, um ihre nationalen Klimaziele zu erreichen.

Das Pariser Abkommen (Ramji, 2018) hat die Grundlage für eine verstärkte internationale Zusammenarbeit im Klimaschutz geschaffen, indem es flexible Mechanismen wie Artikel 6 vorsieht, die den internationalen Handel mit Emissionsreduktionen ermöglichen. Dies eröffnet die Möglichkeit, nationale oder regionale EHS miteinander zu verknüpfen (Gao, 2024), was zu einer globalen Effizienzsteigerung führen könnte. Durch die Verknüpfung könnten Reduktionen dort erfolgen, wo sie am kostengünstigsten sind, was die globalen Gesamtkosten des Klimaschutzes senken würde. Die Erfahrungen des EU ETS (Edwin & Josephine, 2023) dienen hierbei als Blaupause und Lernfeld für andere aufstrebende Märkte, obwohl die Herausforderungen bei der Harmonisierung unterschiedlicher Systeme nicht zu unterschätzen sind.

Ein kritischer Aspekt ist die Komplementarität des Emissionshandels mit anderen globalen Klimaschutzmaßnahmen. Der Emissionshandel ist kein Allheilmittel, sondern ein wichtiges Instrument in einem umfassenden politischen Portfolio. Er kann synergistisch mit anderen Politiken wie Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards und Investitionen in Forschung und Entwicklung (Kirchner et al., 2019) wirken, um die Dekarbonisierung zu beschleunigen. Insbesondere in Entwicklungsländern, wo der Aufbau von Kapazitäten und die Verfügbarkeit von Finanzmitteln entscheidend sind, kann der Emissionshandel in Kombination mit internationaler Klimafinanzierung eine wichtige Rolle spielen.

Die globale Dimension des Carbon Leakage (Wettestad, 2023) unterstreicht die Notwendigkeit einer koordinierten internationalen Klimapolitik. Wenn einzelne Länder oder Regionen

ambitionierte CO₂-Preise einführen, ohne dass andere folgen, besteht das Risiko, dass Emissionen einfach verlagert werden, anstatt global reduziert zu werden. Dies erfordert Mechanismen wie den CBAM, aber auch eine verstärkte Diplomatie und den Aufbau von Vertrauen, um eine breitere internationale Einführung von CO₂-Preisen zu fördern. Die Entwicklung eines globalen Konsenses über die Bepreisung von Kohlenstoffemissionen ist eine langfristige, aber notwendige Vision.

Darüber hinaus trägt der Emissionshandel zur **Transparenz und Rechenschaftspflicht** im Klimaschutz bei. Durch die Quantifizierung und den Handel von Emissionsrechten wird ein klarer Wert für Kohlenstoffemissionen geschaffen, der in Unternehmensbilanzen und nationalen Emissionsinventaren sichtbar wird. Dies fördert eine datengestützte Politikgestaltung und ermöglicht eine bessere Überwachung des Fortschritts bei der Erreichung der Klimaziele. Die Genauigkeit der Emissionsdaten und die Robustheit der Verifizierungsprozesse sind hierbei von entscheidender Bedeutung, um die Glaubwürdigkeit des gesamten Systems zu gewährleisten und die globale atmosphärische Konzentration von Treibhausgasen effektiv zu beeinflussen (Reid, 2022).

Die Verbreitung des Emissionshandels in verschiedenen Regionen der Welt, von Nordamerika über Europa bis nach Asien, zeigt seine wachsende Akzeptanz als effektives Instrument. Jedes System hat seine Eigenheiten, doch die zugrunde liegende Logik, Emissionen zu bepreisen und so Anreize zu schaffen, bleibt dieselbe. Die Herausforderung besteht darin, diese unterschiedlichen Systeme so zu gestalten, dass sie miteinander kompatibel sind und langfristig zu einem kohärenten globalen Ansatz beitragen können, der die komplexen Wechselwirkungen zwischen Wirtschaft, Technologie und Umwelt berücksichtigt (Haque, 2023)(Guest, 2010).

Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Erkenntnissen dieser Studie ergeben sich mehrere konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft, um die Wirksamkeit des Emissionshandels zu maximieren und seine Rolle im globalen Klimaschutz zu stärken.

Für die Politik:

1. **Ambitioniertes und dynamisches Cap-Management:** Die Politik sollte das Emissionslimit (Cap) kontinuierlich verschärfen, um es an die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse und die Ziele des Pariser Abkommens anzupassen (Oberthür & Ott, 1999)(Ramji, 2018). Ein dynamisches Cap, das auf den tatsächlichen Emissionsentwicklungen basiert, ist entscheidend, um ein Überangebot an Zertifikaten zu vermeiden und die Lenkungswirkung des EHS zu gewährleisten. Die Erfahrungen mit der Marktstabilitätsreserve (Mauer et al., 2020) sollten genutzt und bei Bedarf weiterentwickelt werden, um die Marktintegrität zu sichern.
2. **Preisklarheit und -stabilität fördern:** Um Investitionssicherheit zu gewährleisten, sollte die Politik Maßnahmen zur Reduzierung der Preisvolatilität prüfen, wie die Einführung von Preisunter- und -obergrenzen (price collars) (Holt & Shobe, 2015). Eine transparente Kommunikation über die langfristige Preisentwicklung von CO2-Zertifikaten kann Unternehmen helfen, strategische Entscheidungen zu treffen und in Dekarbonisierung zu investieren. Die Faktoren, die den CO2-Preis bestimmen (Dittmann et al., 2024), sollten regelmäßig analysiert und in die Politikgestaltung einbezogen werden.
3. **Reform der Allokationsmechanismen:** Die kostenlose Zuteilung sollte schrittweise zugunsten von Versteigerungen reduziert werden (Goulder et al., 2009). Die Einnahmen aus der Versteigerung müssen transparent und zweckgebunden eingesetzt werden, beispielsweise zur Förderung grüner Technologien, zur Unterstützung von Innovationen, zur Entlastung

einkommensschwacher Haushalte oder zur Finanzierung von Klimaanpassungsmaßnahmen. Dies erhöht die Akzeptanz und Legitimität des Systems.

4. Sektorerweiterung und Integration: Der Emissionshandel sollte schrittweise auf weitere Sektoren wie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft ausgedehnt werden, um eine umfassendere Abdeckung der Emissionen zu erreichen. Dies erfordert jedoch maßgeschneiderte Ansätze und flankierende Maßnahmen, um soziale und wirtschaftliche Härten zu vermeiden.

5. Internationale Zusammenarbeit und Verknüpfung: Die Politik sollte aktiv die Verknüpfung von nationalen und regionalen EHS fördern (Gao, 2024), um die Effizienz des globalen Klimaschutzes zu steigern und Carbon Leakage entgegenzuwirken (Wettestad, 2023). Dies erfordert eine Harmonisierung von Standards und Regeln sowie eine robuste diplomatische Anstrengung zur Schaffung eines globalen Kohlenstoffpreises.

6. Flankierende Maßnahmen und Kohärenz: Der Emissionshandel sollte in ein kohärentes und umfassendes Klimaschutzpaket eingebettet werden, das auch nicht-preisliche Maßnahmen wie Subventionen für Forschung und Entwicklung, Technologie-Roadmaps und Regulierungen umfasst (Kirchner et al., 2019). Dies ist besonders wichtig, um disruptive Innovationen zu fördern, die der Markt allein möglicherweise nicht ausreichend anreizt (Pearse & Böhm, 2014).

7. Rechtliche und institutionelle Robustheit: Die Politik muss sicherstellen, dass EHS auf einer soliden rechtlichen Grundlage stehen, um Klagen zu minimieren (Weishaar, 2014) und die langfristige Stabilität und Vorhersehbarkeit des Systems zu gewährleisten. Robuste MRV-Systeme sind unerlässlich.

Für die Wirtschaft:

1. Proaktive Dekarbonisierungsstrategien: Unternehmen sollten den Emissionshandel nicht nur als Kostenfaktor, sondern als Anreiz für proaktive Dekarbonisierungsstrategien betrachten.

Investitionen in Energieeffizienz, erneuerbare Energien und emissionsarme Technologien sind nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern können langfristig auch die Wettbewerbsfähigkeit stärken (Haque, 2023).

2. Risikomanagement für CO2-Preise: Unternehmen sollten Strategien zur Absicherung gegen CO2-Preisrisiken entwickeln, beispielsweise durch Hedging-Instrumente oder die interne Bepreisung von Kohlenstoff. Eine genaue Kenntnis der Faktoren, die den Preis beeinflussen (Dittmann et al., 2024), ist hierbei von Vorteil.

3. Innovation und Technologieführerschaft: Durch Investitionen in Forschung und Entwicklung neuer, emissionsarmer Technologien können Unternehmen nicht nur ihre eigenen Emissionen reduzieren, sondern auch neue Märkte erschließen und Technologieführer werden. Die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Start-ups kann diesen Prozess beschleunigen.

4. Transparenz und Berichterstattung: Unternehmen sollten ihre Emissionen transparent berichten und ihre Fortschritte bei der Dekarbonisierung offenlegen. Dies schafft Vertrauen bei Investoren, Kunden und der Öffentlichkeit. Eine detaillierte Lebenszyklusanalyse kann helfen, den gesamten Kohlenstoff-Fußabdruck zu verstehen (Haque, 2023).

5. Engagement in der Politikgestaltung: Die Wirtschaft sollte sich aktiv und konstruktiv in den politischen Dialog über die Weiterentwicklung des Emissionshandels einbringen. Durch die Bereitstellung von Fachwissen und praktischen Erfahrungen kann sie dazu beitragen, effektive und praktikable Lösungen zu entwickeln, die sowohl ökologischen als auch ökonomischen Anforderungen gerecht werden.

Die Umsetzung dieser Empfehlungen erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. Nur durch einen gemeinsamen, ambitionierten

und evidenzbasierten Ansatz kann der Emissionshandel sein volles Potenzial entfalten und einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der globalen Klimaziele leisten.

6. Einschränkungen

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

Methodologische Einschränkungen

Die vorliegende Studie stützt sich primär auf eine umfassende Literaturanalyse und die Synthese empirischer Evidenz aus bestehenden Fallstudien. Dies beinhaltet die Herausforderung der Attribuierung, da die genaue Isolierung der kausalen Effekte von CO₂-Bepreisungsinstrumenten von anderen simultan wirkenden Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, technologischem Fortschritt, komplementären Politiken) methodisch anspruchsvoll ist. Obwohl ökonometrische Methoden wie die Differenz-in-Differenzen-Analyse (DiD) und Paneldatenanalyse zur Kontrolle dieser Faktoren vorgeschlagen wurden, bleibt die vollständige Eliminierung von Verzerrungen schwierig.

Die verwendeten Daten stammen aus Sekundärquellen und wurden von verschiedenen Regulierungsbehörden und Forschungseinrichtungen erhoben. Dies kann zu Inkonsistenzen in der Datenerfassung, Definitionen oder Berichtsstandards führen, die die Vergleichbarkeit zwischen den Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China) beeinflussen. Die Qualität und Granularität der öffentlich zugänglichen Daten kann zudem die Tiefe der quantitativen Analyse begrenzen.

Umfang und Generalisierbarkeit

Die Untersuchung konzentrierte sich auf drei prominente Emissionshandelssysteme: das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische nationale ETS. Obwohl diese Systeme repräsentativ für unterschiedliche geografische und ökonomische Kontexte sind, können die Schlussfolgerungen nicht uneingeschränkt auf alle existierenden oder zukünftigen EHS weltweit übertragen werden. Jedes System ist einzigartig in seinem Design, seiner politischen Einbettung und den spezifischen Marktbedingungen.

Bestimmte Sektoren, wie der Verkehr oder die Landwirtschaft, wurden in den analysierten Systemen entweder nicht oder erst spät und mit spezifischen Regeln einbezogen. Dies schränkt die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf diese Sektoren ein und bedeutet, dass die Schlussfolgerungen primär für die Energieerzeugung und energieintensive Industrien gelten. Die spezifischen Herausforderungen der Dekarbonisierung in anderen Sektoren wurden nur am Rande behandelt.

Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen

Die Analyse umfasst einen Zeitraum von der Einführung der jeweiligen EHS bis zum aktuellsten verfügbaren Berichtsjahr. Klimapolitiken und ihre Auswirkungen sind jedoch langfristige Phänomene. Kurz- und mittelfristige Beobachtungen können die vollständigen Effekte, insbesondere im Hinblick auf technologische Transformationen und Verhaltensänderungen, möglicherweise noch nicht vollständig erfassen. Die Dynamik der Kohlenstoffmärkte ist zudem stark von externen Schocks wie Wirtschaftskrisen, geopolitischen Entwicklungen oder Energiepreisschwankungen geprägt. Die Reaktionen der Systeme auf solche Ereignisse sind komplex und können die langfristige Wirksamkeit beeinflussen.

Die politischen und regulatorischen Rahmenbedingungen entwickeln sich ständig weiter. Die Analyse basiert auf dem Stand der Systeme zum Zeitpunkt der Datenerhebung. Zukünftige

Reformen, wie die weitere Sektorerweiterung oder die Anpassung der Marktstabilitätsmechanismen, könnten die hier gezogenen Schlussfolgerungen verändern.

Theoretische und konzeptionelle Einschränkungen

Die Studie konzentriert sich auf die ökonomischen Theorien der CO₂-Bepreisung, insbesondere die Pigou-Steuer und das Coase-Theorem. Obwohl diese Theorien eine starke Grundlage bieten, erfassen sie möglicherweise nicht alle komplexen sozialen, politischen und ethischen Dimensionen des Klimawandels und der Klimapolitik. Alternative theoretische Perspektiven, die sich stärker auf Verhaltensökonomie, Gerechtigkeitstheorien oder politische Ökonomie konzentrieren, könnten zusätzliche Einblicke bieten, wurden aber in dieser Arbeit nicht vertieft. Das Konzept der "Additionality" bei Offsets und die genaue Quantifizierung von "Carbon Leakage" bleiben konzeptionell und empirisch herausfordernd. Trotz der Berücksichtigung dieser Aspekte in der Diskussion sind die Unsicherheiten bei ihrer genauen Messung und Attribution weiterhin eine Einschränkung für eine abschließende Bewertung der Gesamtwirkung von EHS.

Trotz dieser Einschränkungen bietet die Forschung wertvolle Einblicke in die Kernmechanismen und die Wirksamkeit des Emissionshandels. Die identifizierten Grenzen dienen als wichtige Anhaltspunkte für zukünftige Forschungsarbeiten, um ein noch umfassenderes und präziseres Verständnis dieser entscheidenden Klimaschutzinstrumente zu entwickeln.

7. Zukünftige Forschungsrichtungen

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

1. Empirische Validierung und großflächige Tests

Zukünftige Forschung sollte sich auf eine noch präzisere empirische Validierung der kausalen Effekte von Emissionshandelssystemen (EHS) konzentrieren. Dies beinhaltet die Anwendung fortschrittlicher ökonometrischer Methoden, wie synthetische Kontrollmethoden oder Machine Learning-Ansätze, um die Wirkung der CO₂-Bepreisung von anderen Einflussfaktoren noch besser zu isolieren. Großflächige, vergleichende Studien über verschiedene EHS hinweg, die eine harmonisierte Datenerfassung und -analyse nutzen, könnten zu robusteren und generalisierbareren Ergebnissen führen. Insbesondere die Entwicklung von kontrafaktischen Szenarien für die neu eingeführten oder sich entwickelnden Systeme, wie das chinesische ETS, ist von großem Interesse.

2. Integration von Sektoren und geografischer Umfang

Die Erweiterung des Geltungsbereichs von EHS auf bisher nicht oder nur begrenzt erfasste Sektoren wie den Verkehr, den Gebäudesektor und die Landwirtschaft bietet ein weites Forschungsfeld. Hierbei sind maßgeschneiderte Ansätze gefragt, die die spezifischen Emissionsstrukturen, Akteurslandschaften und politischen Herausforderungen dieser Sektoren berücksichtigen. Forschung könnte sich auf die optimale Gestaltung von Sektorkopplungsmechanismen, die Vermeidung von Doppelbepreisung und die Untersuchung der sozioökonomischen Auswirkungen einer solchen Erweiterung konzentrieren. Zudem ist die Analyse der Wirksamkeit und Herausforderungen von EHS in Entwicklungsländern und Schwellenländern, die oft andere Prioritäten und institutionelle Kapazitäten aufweisen, von großer Bedeutung.

3. Sozioökonomische Verteilungswirkungen

Die Verteilungswirkungen von Kohlenstoffpreisen, insbesondere auf Haushalte mit geringem Einkommen und auf bestimmte Regionen, sind ein kritischer Forschungsbereich. Zukünftige Studien könnten detaillierte Analysen der regressiven Effekte durchführen und die Wirksamkeit verschiedener Kompensationsmechanismen (z.B. Klimadividenden, gezielte Subventionen für Energieeffizienz) bewerten. Die Forschung sollte sich auch mit der politischen Akzeptanz und den Mechanismen zur Stärkung des gesellschaftlichen Konsenses für ambitionierte Klimapolitiken befassen. Dies beinhaltet die Untersuchung von Kommunikationsstrategien und Beteiligungsprozessen, die eine gerechte Transformation fördern.

4. Resilienz gegenüber externen Schocks

Die Fähigkeit von EHS, auf externe Schocks wie Wirtschaftskrisen, geopolitische Konflikte oder Pandemien zu reagieren, ist von entscheidender Bedeutung. Zukünftige Forschung könnte die Resilienz von EHS-Designs untersuchen und Mechanismen zur besseren Anpassung an unvorhersehbare Ereignisse entwickeln. Dies umfasst die Optimierung von Marktstabilitätsreserven, die Einführung flexibler Cap-Anpassungsmechanismen und die Analyse der Rolle von Preiskorridoren unter Stressbedingungen. Die Untersuchung der Dynamik von CO2-Preisen in Zeiten erhöhter Unsicherheit und ihre Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen ist ebenfalls von hohem Interesse.

5. Technologische Innovation und disruptive Ansätze

Während EHS inkrementelle Innovationen fördern, ist die Rolle von Kohlenstoffmärkten bei der Anregung disruptiver, emissionsarmer Technologien noch nicht vollständig verstanden. Zukünftige Forschung könnte sich auf die Wechselwirkungen zwischen CO2-Preisen und gezielten Innovationspolitiken (z.B. F&E-Subventionen, Technologiemandate) konzentrieren. Dies beinhaltet die Analyse von Innovationspfaden in Schlüsseltechnologien wie grüner

Wasserstoff, Kohlenstoffabscheidung und -nutzung (CCU/CCS) oder fortschrittlichen Energiespeichern und die Bewertung, wie EHS deren Marktreife beschleunigen können.

6. Politik und Implementierungsforschung

Die Untersuchung der Governance-Herausforderungen und des politischen Widerstands gegen EHS ist ein kontinuierliches Forschungsfeld. Dies umfasst die Analyse von Lobbying-Aktivitäten, die Rolle von Stakeholder-Beteiligung bei der Politikgestaltung und die Effektivität von Durchsetzungsmechanismen. Forschung könnte auch die rechtlichen Herausforderungen und Streitigkeiten im Zusammenhang mit dem Emissionshandel genauer beleuchten, um Empfehlungen für robustere rechtliche Rahmenbedingungen zu formulieren. Die vergleichende Analyse von Implementierungsstrategien in verschiedenen politischen Systemen könnte wertvolle Erkenntnisse liefern.

7. Internationale Harmonisierung und Verknüpfung

Die internationale Verknüpfung von nationalen und regionalen EHS ist ein vielversprechender Weg zur Effizienzsteigerung im globalen Klimaschutz. Zukünftige Forschung sollte sich auf die technischen, rechtlichen und politischen Herausforderungen der Harmonisierung unterschiedlicher Systeme konzentrieren. Dies beinhaltet die Entwicklung von Modellen für die Verknüpfung, die Analyse der Auswirkungen auf Preisbildung und Carbon Leakage sowie die Erforschung der Rolle von Artikel 6 des Pariser Abkommens bei der Förderung globaler Kohlenstoffmärkte. Die Untersuchung von Best Practices für die Zusammenarbeit und den Kapazitätsaufbau in diesem Bereich ist ebenfalls von großer Bedeutung. Diese Forschungsrichtungen kollektiv zielen darauf ab, ein reicheres, nuancierteres Verständnis des Emissionshandels und seiner Implikationen für Theorie, Praxis und Politik zu entwickeln.

8. Fazit

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der komplexen und vielschichtigen Rolle von Emissionshandelssystemen (EHS) als zentrales Instrument im globalen Kampf gegen den Klimawandel auseinandergesetzt. Angesichts der Dringlichkeit, die globalen Durchschnittstemperaturen gemäß den Zielen des Pariser Abkommens (Ramji, 2018) zu begrenzen, sind effektive und effiziente politische Instrumente unerlässlich. Diese Studie zielte darauf ab, die Klimaschutzwirkung von EHS umfassend zu bewerten, ihren Beitrag zum Verständnis der ökonomischen und politischen Dynamiken des Emissionshandels zu beleuchten und zukünftige Forschungsrichtungen aufzuzeigen. Die Ergebnisse unterstreichen die kritische Bedeutung von EHS als marktbasierter Instrument, das Anreize für Emissionsreduktionen schafft und gleichzeitig die Herausforderungen einer gerechten und effektiven Umsetzung aufzeigt.

Die Hauptergebnisse dieser Untersuchung zur Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen sind vielschichtig und bestätigen deren Potenzial, aber auch ihre Grenzen. Es wurde deutlich, dass gut konzipierte und streng implementierte EHS, wie das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS), signifikante Reduktionen von Treibhausgasemissionen bewirken können (Edwin & Josephine, 2023)(Li & Zhao, 2025). Insbesondere hat das EU-EHS in Phasen mit hohen und stabilen Kohlenstoffpreisen zu einer messbaren Dekarbonisierung in den erfassten Sektoren geführt (Dittmann et al., 2024). Der Mechanismus der Obergrenze und des Handels (Cap-and-Trade) schafft einen direkten Preis für CO₂-Emissionen, der Unternehmen dazu anregt, in emissionsärmere Technologien und Prozesse zu investieren, um Kosten zu senken (Kirchner et al., 2019). Diese ökonomische Anreizwirkung ist ein Kernvorteil gegenüber reinen ordnungsrechtlichen Ansätzen, da sie Flexibilität bei der Erreichung von Reduktionszielen ermöglicht und die kosteneffizientesten Reduktionspfade

fördert (Goulder et al., 2009). Studien zeigen, dass der Emissionshandel, wenn er mit weiteren politischen Maßnahmen wie Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz kombiniert wird, seine volle Wirkung entfalten kann (Kirchner et al., 2019). Die Analyse der atmosphärischen Konzentration von Kohlenstoffdioxid in Regionen mit etablierten EHS deutet auf einen positiven, wenn auch langfristigen und global vernetzten Effekt hin (Reid, 2022). Es ist jedoch entscheidend zu erkennen, dass die Wirksamkeit stark von der Ambition der Obergrenze, der Marktstabilität und der Vermeidung von Überallokationen abhängt. Eine zu lockere Obergrenze oder ein Überschuss an Zertifikaten können den Preisanreiz untergraben und die Klimaschutzwirkung minimieren (Mauer et al., 2020). Darüber hinaus sind die Effekte des Emissionshandels nicht isoliert zu betrachten, sondern im Kontext der gesamten Klimapolitik eines Landes oder einer Region zu bewerten, einschließlich der nationalen Verpflichtungen unter internationalen Abkommen wie dem Kyoto-Protokoll (Oberthür & Ott, 1999) und dem Pariser Abkommen (Ramji, 2018). Die Integration von Lebenszyklusanalysen in die Bewertung der Kohlenstoffemissionen kann zudem ein umfassenderes Bild der tatsächlichen Reduktionspotenziale liefern (Haque, 2023). Die Ergebnisse deuten ferner darauf hin, dass die Einführung von Mechanismen zur Marktstabilität, wie die Marktstabilitätsreserve im EU-EHS, entscheidend ist, um Preisschwankungen zu dämpfen und Investitionssicherheit zu gewährleisten (Ladaniwskyj, 2008)(Holt & Shobe, 2015). Ohne solche Mechanismen können unvorhersehbare Preisentwicklungen die langfristige Planung und somit die Investitionen in Dekarbonisierung behindern.

Die vorliegende Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels, indem sie die verschiedenen Facetten seiner Gestaltung, Implementierung und Auswirkungen synthetisiert. Erstens vertieft sie das Verständnis der komplexen Preisdynamiken

auf den Kohlenstoffmärkten. Die Untersuchung hat gezeigt, dass Kohlenstoffpreise nicht nur durch Angebot und Nachfrage nach Zertifikaten bestimmt werden, sondern auch durch externe Faktoren wie Energiepreise, Wirtschaftswachstum, politische Entscheidungen und sogar spekulative Aktivitäten beeinflusst werden (Dittmann et al., 2024). Dies unterstreicht die Notwendigkeit robuster Regulierungsrahmen, die diesen externen Schocks standhalten können.

Zweitens beleuchtet die Arbeit die Herausforderungen im Zusammenhang mit der Zuteilung von Emissionszertifikaten. Die Wahl zwischen kostenfreier Zuteilung und Versteigerung hat weitreichende Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, die Einnahmen für den Staat und die Akzeptanz des Systems (Goulder et al., 2009). Die Studie betont, dass eine progressive Abkehr von der kostenfreien Zuteilung hin zur Versteigerung nicht nur Einnahmen generieren, sondern auch das Problem des "Windfall-Profits" reduzieren kann, bei dem Unternehmen Zertifikate kostenlos erhalten und zu Marktpreisen verkaufen (Mauer et al., 2020).

Drittens trägt die Analyse von "Carbon Leakage" und den Maßnahmen zu dessen Vermeidung zum aktuellen Diskurs bei. Das Konzept des Kohlenstoffgrenzenausgleichsmechanismus (CBAM) der EU wurde als proaktiver Ansatz zur Verhinderung von Carbon Leakage diskutiert (Wettestad, 2023), der die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Unternehmen schützen und gleichzeitig den globalen Klimaschutz fördern soll. Die Arbeit betont, dass solche Mechanismen sorgfältig kalibriert werden müssen, um internationale Handelsbeziehungen nicht unnötig zu belasten und gleichzeitig ihre Klimaschutzziele zu erreichen. Viertens bietet die Arbeit eine kritische Auseinandersetzung mit der politischen Akzeptanz und den rechtlichen Herausforderungen von EHS, einschließlich der Notwendigkeit, Klagen im Zusammenhang mit Emissionshandelssystemen zu managen (Weishaar, 2014). Die Rolle der öffentlichen Wahrnehmung und die Notwendigkeit einer transparenten Kommunikation über die Vorteile und

Kosten des Emissionshandels sind entscheidend für seinen langfristigen Erfolg (Pearse & Böhm, 2014). Schließlich integriert die Studie die Perspektive der internationalen Verknüpfung von EHS (Gao, 2024) und Joint Implementation Projekten (Janikowski et al., 1994), was für ein holistisches Verständnis der globalen Kohlenstoffmärkte unerlässlich ist. Dieser integrative Ansatz ermöglicht es, die Stärken und Schwächen verschiedener EHS-Designs besser zu verstehen und Lehren für neue oder sich entwickelnde Systeme zu ziehen.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich mehrere vielversprechende Richtungen für zukünftige Forschungsarbeiten. Erstens ist eine vertiefte Analyse der Wechselwirkungen zwischen EHS und anderen Klimaschutzinstrumenten erforderlich. Insbesondere die Synergien und potenziellen Konflikte zwischen Emissionshandel, Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards und CO2-Steuern bedürfen weiterer Untersuchung (Kirchner et al., 2019). Wie können diese Instrumente optimal aufeinander abgestimmt werden, um maximale Klimaschutzwirkung bei minimalen Kosten zu erzielen? Zweitens sollte die Forschung die langfristigen sozioökonomischen Auswirkungen von EHS genauer beleuchten. Dies umfasst Studien zu den Verteilungseffekten auf Haushalte und Industrien, die Auswirkungen auf die Beschäftigung und die Rolle von EHS bei der Förderung von Innovationen und technologischem Wandel. Eine detaillierte Analyse der Gerechtigkeitsaspekte von Kohlenstoffpreisen, ähnlich der Pigou-Steuer-Diskussion (Piga, 2003), ist hierbei von großer Bedeutung, um sicherzustellen, dass die Lasten des Klimaschutzes fair verteilt werden und die Akzeptanz in der Bevölkerung erhalten bleibt (Tol, 2001). Drittens ist die Weiterentwicklung von Modellen zur Vorhersage und Steuerung von Kohlenstoffpreisen von entscheidender Bedeutung, insbesondere angesichts der zunehmenden Volatilität auf den Energiemarkten und der geopolitischen Unsicherheiten (Dittmann et al., 2024). Forschung in

diesem Bereich könnte dazu beitragen, die Stabilität der Kohlenstoffmärkte zu verbessern und Investitionsanreize zu festigen. Viertens bedarf die internationale Verknüpfung von Emissionshandelssystemen weiterer Forschung. Wie können unterschiedliche EHS-Designs und -Regularien effektiv miteinander verbunden werden, um einen globalen Kohlenstoffmarkt zu schaffen, der Effizienz und Integrität gewährleistet (Gao, 2024)? Hierbei sind auch die Herausforderungen der Governance und der Vermeidung von Doppelzählungen zu berücksichtigen. Fünftens ist die Rolle der Digitalisierung und künstlichen Intelligenz bei der Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen sowie bei der Optimierung des Handels mit Zertifikaten ein aufstrebendes Forschungsfeld. Sechstens sollten zukünftige Studien die Anpassung von EHS an demografische Veränderungen und deren Einfluss auf Kohlenstoffemissionen (Guest, 2010) sowie die Resilienz von EHS gegenüber externen Schocks, wie Pandemien oder Wirtschaftskrisen, untersuchen. Schließlich ist die Analyse der Wirksamkeit von Carbon Border Adjustment Mechanismen (CBAM) in der Praxis und ihre Auswirkungen auf den internationalen Handel und die Klimapolitik weiterer Länder von hohem Forschungsinteresse (Wettestad, 2023).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Emissionshandelssysteme ein mächtiges, wenn auch komplexes Instrument im Arsenal des Klimaschutzes darstellen. Ihre Fähigkeit, ökonomische Anreize zu schaffen und Emissionsreduktionen kosteneffizient zu fördern, ist unbestreitbar. Doch ihr Erfolg hängt maßgeblich von einer robusten Gestaltung, einer ambitionierten Obergrenze, effektiven Marktstabilitätsmechanismen und einer kohärenten Einbettung in ein breiteres Politikportfolio ab. Die vorliegende Arbeit hat nicht nur die bisherigen Erfolge und Herausforderungen von EHS aufgezeigt, sondern auch eine Agenda für zukünftige Forschung gesetzt, die darauf abzielt, diese Systeme noch effektiver und gerechter zu gestalten. Der Weg zu

einer dekarbonisierten Wirtschaft ist lang und steinig, aber Emissionshandelssysteme, richtig angewendet und kontinuierlich verbessert, werden dabei eine Schlüsselrolle spielen.

Anhang A: Theoretisches Rahmenwerk für Emissionshandelssysteme

A.1 Theoretische Fundamente der Umweltökonomie

Das theoretische Fundament für Emissionshandelssysteme (EHS) liegt tief in der Umweltökonomie, die sich mit der optimalen Allokation von Ressourcen unter Berücksichtigung von Umwelteffekten befasst. Im Kern geht es um die Internalisierung externer Kosten, die durch Umweltverschmutzung entstehen. Ein zentraler Ansatz ist die Pigou-Steuer, benannt nach Arthur C. Pigou (Piga, 2003). Sie besagt, dass eine Steuer auf Aktivitäten, die negative Externalitäten verursachen, die Emittenten dazu zwingt, die sozialen Kosten ihrer Handlungen zu tragen. Im Kontext von CO₂-Emissionen würde eine solche Steuer den Preis des emittierten Gutes erhöhen und so Anreize zur Reduktion schaffen. Die optimale Höhe der Steuer entspricht dabei den Grenzkosten der externen Effekte, um ein sozial effizientes Emissionsniveau zu erreichen.

A.2 Das Coase-Theorem und die Rolle von Eigentumsrechten

Eine alternative, aber komplementäre Perspektive bietet das Coase-Theorem von Ronald Coase (Coase, 1960). Es argumentiert, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und ohne Transaktionskosten private Parteien durch Verhandlungen eine effiziente Lösung für Externalitäten finden können, unabhängig von der anfänglichen Zuteilung der Eigentumsrechte. Für den Emissionshandel bedeutet dies, dass die Schaffung von handelbaren Emissionszertifikaten – die ein Eigentumsrecht an der Fähigkeit zur Emission darstellen – einen Markt entstehen lässt. Unternehmen mit niedrigen Reduktionskosten verkaufen Zertifikate an solche mit hohen Reduktionskosten, wodurch die Reduktionslasten effizient dort platziert

werden, wo sie am günstigsten sind. Dies unterstreicht die Bedeutung von gut definierten und durchsetzbaren Rechten für die Funktionsfähigkeit von Kohlenstoffmärkten.

A.3 Marktbasierter Instrumente und ihre Effizienz

EHS sind ein Paradebeispiel für marktbasierter Instrumente, die im Gegensatz zu "Command-and-Control"-Ansätzen eine Gesamtobergrenze (Cap) für Emissionen festlegen, die durch den Handel von Zertifikaten erreicht wird (Carter, 2018). Der Hauptvorteil ist die Kosteneffizienz: Der Markt sorgt dafür, dass Reduktionen dort stattfinden, wo sie am billigsten sind. Dies fördert zudem kontinuierliche Innovationen, da Unternehmen stets motiviert sind, noch kostengünstigere Emissionsminderungstechnologien zu finden. Die Flexibilität des Systems, kombiniert mit der garantierten Emissionsmenge durch das Cap, macht EHS zu einem attraktiven Instrument für die Klimapolitik.

A.4 Anreizmechanismen und Preisbildung

Der CO₂-Preis, der sich auf dem Markt bildet, ist das zentrale Anreizsignal. Er wird durch das Zusammenspiel von Angebot (Cap und Zuteilungsmethoden) und Nachfrage (Emissionsbedürfnisse der Unternehmen und deren Reduktionskosten) bestimmt (Dittmann et al., 2024). Eine transparente Preisbildung und stabile, ausreichend hohe Preise sind entscheidend für die Investitionssicherheit in emissionsarme Technologien. Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS oder Preisuntergrenzen in Kalifornien dienen dazu, extreme Preisschwankungen zu dämpfen und ein glaubwürdiges Preissignal aufrechtzuerhalten (Mauer et al., 2020)(Holt & Shobe, 2015).

Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Metriken und Szenarien

Dieses Appendix präsentiert detailliertere quantitative Metriken und Szenarien für das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) und das kalifornische Cap-and-Trade-Programm, um die Auswirkungen der CO2-Bepreisung zu veranschaulichen. Die Daten sind exemplarisch und basieren auf aggregierten Erkenntnissen aus der Literatur.

C.1 Szenario 1: Emissionsentwicklung im EU ETS (2005-2023)

Tabelle C.1: Emissionsreduktionen und Preisentwicklung im EU ETS

Metrik	Phase 1 (2005-07)	Phase 2 (2008-12)	Phase 3 (2013-20)	Phase 4 (2021-23)
Durchschnittliche Emissionen (Mio. tCO2eq/Jahr)	2.200	2.050	1.750	1.400
Reduktion ggü. Baseline (%)	-5%	-12%	-25%	-40%
Durchschnittlicher EUA-Preis (€/tCO2)	8	15	25	80
MSR-Aktivierung	Nein	Nein	Ab 2019 ja	Ja
Wirtschaftswachstum (EU-BIP, Ø p.a.)	2.5%	0.5%	1.8%	3.0%

Anmerkung: Die Baseline ist das Jahr 2005. Daten sind aggregierte Schätzungen und dienen der Illustration. Die Reduktionen in Phase 4 sind besonders stark nach der Umsetzung des "Fit for 55"-Pakets.

C.2 Szenario 2: Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm (2013-2023)

Tabelle C.2: Emissions- und Wirtschaftsentwicklung in Kalifornien

Metrik	2013-2015	2016-2018	2019-2021	2022-2023
Durchschnittliche Emissionen (Mio. tCO2eq/Jahr)	420	405	390	375
Reduktion ggü. 2012 (%)	-5%	-8%	-12%	-15%

Durchschnittlicher CCA-Preis (\$/tCO2)	12	15	20	30	
BIP-Wachstum (Kalifornien, Ø p.a.)	3.2%	2.8%	1.5%	4.0%	
Verknüpfung mit Québec	Ab 2014	Ja	Ja	Ja	

Anmerkung: Die Baseline für die Reduktion ist das Jahr 2012. Trotz Wirtschaftswachstum konnten Emissionen reduziert werden, was auf eine Entkopplung hindeutet.

C.3 Cross-Szenario Vergleich: Einfluss von Marktstabilität

Tabelle C.3: Einfluss der Marktstabilität auf Investitionen und Dekarbonisierung

System	Preisstabilität	Investitionssicherheit	Innovationsförderung	Emissionsreduktionspfad
EU ETS (Phase 1-2)	Niedrig (volatil)	Gering	Moderat	Langsam
EU ETS (Phase 3-4)	Moderat (durch MSR)	Erhöht	Hoch	Beschleunigt
Kalifornien (mit Floor)	Hoch (stabil)	Sehr hoch	Hoch	Stetig
China ETS (frühe Phase)	Niedrig (volatil)	Gering	Moderat	Initial

Anmerkung: Eine höhere Preisstabilität und ein glaubwürdiges Preissignal korrelieren mit stärkeren Investitionen in Dekarbonisierung und effektiveren Reduktionspfaden.

Anhang D: Zusätzliche Ressourcen und weiterführende Literatur

D.1 Foundational Texts (Grundlagentexte)

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

* Klassisches Werk, das das Konzept der Externalitäten und Pigou-Steuern als Lösung für Marktversagen einführt. Unverzichtbar für das Verständnis der theoretischen Grundlagen der CO2-Bepreisung.

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

* Wegweisender Artikel, der das Coase-Theorem vorstellt und die Rolle von Eigentumsrechten bei der Lösung von Externalitäten ohne staatliche Intervention beleuchtet. Essentiell für das Verständnis marktorientierter Instrumente wie dem Emissionshandel.

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

* Ein umfassender Bericht über die ökonomischen Auswirkungen des Klimawandels und die Kosten-Nutzen-Analyse von Klimaschutzmaßnahmen. Betont die Dringlichkeit von Maßnahmen und die Rolle von Kohlenstoffpreisen.

D.2 Key Research Papers (Wichtige Forschungsarbeiten)

1. *Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). *Carbon Prices and Emissions: The EU ETS Experience*. MIT Press.*

* Eine der ersten umfassenden Analysen des EU ETS, die dessen Design, Funktionsweise und die ersten Auswirkungen auf Emissionen und Preise untersucht.

2. *Keohane, R. O., & Victor, D. G. (2011). *The Regime Complex for Climate Change*. Perspectives on Politics, 9(1), 7-23.*

* Erörtert die Fragmentierung der internationalen Klimapolitik und die Rolle verschiedener Abkommen und Mechanismen, einschließlich des Emissionshandels.

3. *Jaffe, A. B., Newell, R. G., & Stavins, R. N. (2002). *Environmental Policy and Technology Diffusion: The Effects of Past Experience on Adoption*. Environmental and Resource Economics, 22(1-2), 129-152.*

* Untersucht den Zusammenhang zwischen Umweltpolitik und technologischer Innovation, relevant für die Anreizwirkung von CO₂-Preisen.

D.3 Online Resources (Online-Ressourcen)

- **Europäische Kommission – EU Emissionshandelssystem:** [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_de](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_de) - Offizielle Informationen, Daten und Dokumente zum EU ETS.
- **California Air Resources Board (CARB) – Cap-and-Trade Program:** <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program> - Offizielle Informationen und Berichte zum kalifornischen System.
- **International Carbon Action Partnership (ICAP):** <https://icapcarbonaction.com/> - Eine globale Plattform für den Austausch von Wissen und Erfahrungen im Bereich des Emissionshandels, bietet umfassende Übersichten über bestehende und geplante Systeme weltweit.
- **World Bank – Carbon Pricing Dashboard:** [<https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>] (<https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>) - Interaktives Tool, das einen Überblick über Kohlenstoffpreisinstrumente weltweit gibt, einschließlich Steuern und ETS.

D.4 Software/Tools (falls zutreffend)

- **R / Python (mit `tidyverse`, `pandas`, `statsmodels`, `scikit-learn`):** Weit verbreitete Open-Source-Programmiersprachen und Bibliotheken für statistische Analysen, ökonometrische Modellierung und Datenvisualisierung, die für die Analyse von Emissions- und Preisdaten unerlässlich sind.
- **Stata / EViews:** Kommerzielle Statistiksoftwarepakete, die häufig in der Ökonometrie und für Paneldatenanalysen eingesetzt werden.

D.5 Professional Organizations (Berufsverbände)

- **Vereinigung für Umwelt- und Ressourcenökonomien (EAERE):** [<https://www.eaere.org/>] (<https://www.eaere.org/>) - Europäische Vereinigung, die Forschung und Lehre im Bereich der Umwelt- und Ressourcenökonomie fördert.
 - **International Emissions Trading Association (IETA):** [<https://www.ietf.org/>] (<https://www.ietf.org/>) - Globale Non-Profit-Organisation, die sich für die Etablierung effektiver Marktmechanismen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen einsetzt.
-

Anhang E: Glossar wichtiger Begriffe

Additionality (Zusätzlichkeit): Das Prinzip im Kontext von Emissionsreduktionsprojekten (z.B. Offsets), das besagt, dass die erzielten Reduktionen nur aufgrund der Finanzierung durch den Emissionshandelsmechanismus stattgefunden haben und nicht ohnehin realisiert worden wären.

Auctioning (Versteigerung): Eine Methode zur Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei der Unternehmen die Rechte auf einem Markt ersteigern müssen. Gilt als effizienter und transparenter als die kostenlose Zuteilung.

Banking: Die Möglichkeit für Unternehmen in einem Emissionshandelssystem, überschüssige Emissionszertifikate aus einer Periode für zukünftige Emissionsperioden aufzubewahren, was die Flexibilität erhöht.

Cap-and-Trade-System (Obergrenze und Handel): Ein marktbasierteres Instrument der Umweltpolitik, das eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festlegt und den Handel mit Emissionszertifikaten innerhalb dieser Obergrenze ermöglicht.

Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (CO2-Grenzausgleichsmechanismus): Ein Mechanismus, der einen CO2-Preis auf Importe aus Ländern erhebt, die keine vergleichbaren Kohlenstoffpreise haben, um Carbon Leakage zu verhindern.

Carbon Leakage (Kohlenstoff-Leckage): Die Verlagerung von Treibhausgasemissionen oder Produktionsstätten in Länder oder Regionen mit weniger strengen Klimaschutzauflagen, um Kosten zu umgehen.

Carbon Tax (Kohlenstoffsteuer): Eine Steuer, die direkt auf die Emission von Kohlendioxid oder anderen Treibhausgasen erhoben wird, um deren externe Kosten zu internalisieren.

Certified Emission Reductions (CERs): Emissionsreduktionsgutschriften, die im Rahmen des Clean Development Mechanism (CDM) des Kyoto-Protokolls aus Projekten in Entwicklungsländern generiert werden.

Clean Development Mechanism (CDM) (Mechanismus für saubere Entwicklung): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionsgutschriften aus Projekten in Entwicklungsländern zu erwerben.

Coase-Theorem: Ein ökonomisches Theorem, das besagt, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und ohne Transaktionskosten Parteien eine effiziente Lösung für Externalitäten finden können.

Emissions Trading System (ETS) (Emissionshandelssystem): Ein allgemeiner Begriff für Cap-and-Trade-Systeme, die den Handel mit Emissionszertifikaten ermöglichen.

Externalität (externer Effekt): Eine Auswirkung der Produktion oder des Konsums eines Gutes auf Dritte, die nicht am Marktgeschehen beteiligt sind und für diese Auswirkungen weder entschädigt noch zur Kasse gebeten werden.

Grandfathering (kostenlose Zuteilung): Eine Methode zur Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei der Unternehmen diese basierend auf historischen Emissionsdaten oder anderen Kriterien kostenlos erhalten.

Greenwashing: Eine Marketingstrategie, bei der sich Organisationen als umweltfreundlicher darstellen, als sie tatsächlich sind, oft durch irreführende Angaben oder unzureichende Maßnahmen.

Joint Implementation (JI) (Gemeinsame Umsetzung): Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsreduktionsgutschriften aus Projekten in anderen Industrieländern zu erwerben.

Kyoto-Protokoll: Ein internationales Abkommen (1997 verabschiedet), das verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für Industrieländer festlegte und flexible Mechanismen wie den Emissionshandel einföhrte.

Life Cycle Assessment (LCA) (Lebenszyklusanalyse): Eine Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts oder einer Dienstleistung über seinen gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung.

Market Stability Reserve (MSR) (Marktstabilitätsreserve): Ein Mechanismus im EU ETS, der darauf abzielt, das Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage an Emissionszertifikaten zu steuern und so die Preise zu stabilisieren.

Monitoring, Reporting and Verification (MRV) (Überwachung, Berichterstattung und Verifizierung): Ein System zur systematischen Erfassung, Meldung und unabhängigen Überprüfung von Treibhausgasemissionen, entscheidend für die Integrität von EHS.

Offsets: Emissionsreduktionsgutschriften, die aus Projekten außerhalb des regulierten Sektors stammen und von Emittenten erworben werden können, um ihre eigenen Emissionsverpflichtungen zu erfüllen.

Pariser Abkommen: Ein internationales Klimaabkommen (2015 verabschiedet), das das Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Pigou-Steuer: Eine Steuer, die auf eine Aktivität erhoben wird, die eine negative Externalität verursacht, um die sozialen Kosten dieser Aktivität zu internalisieren.

Price Ceiling (Preisobergrenze): Ein Mechanismus in einem Emissionshandelssystem, der einen Höchstpreis für Emissionszertifikate festlegt, oft durch die Freigabe zusätzlicher Zertifikate bei Erreichen dieses Preises.

Price Floor (Preisuntergrenze): Ein Mechanismus in einem Emissionshandelssystem, der einen Mindestpreis für Emissionszertifikate festlegt, um Investitionssicherheit zu gewährleisten.

Regressive Wirkung: Eine Eigenschaft von Steuern oder Abgaben, die einen größeren Anteil des Einkommens von Haushalten mit niedrigem Einkommen als von Haushalten mit hohem Einkommen beanspruchen.

Total Number of Allowances in Circulation (TNAC): Die Gesamtmenge der im Umlauf befindlichen Emissionszertifikate in einem Emissionshandelssystem, eine Kennzahl, die für die Steuerung der Marktstabilitätsreserve relevant ist.

Windfall Profits (Mitnahmeeffekte): Unerwartete Gewinne, die Unternehmen erzielen, wenn sie Emissionszertifikate kostenlos erhalten und deren Kosten auf die Produktpreise umlegen können.

Literaturverzeichnis

Carter. (2018). *Aotearoa/New Zealand and the Emissions Trading Scheme*. Springer International Publishing.

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

Dittmann, Lauter, Prokopcuk, & Sibbertsen. (2024). *What Determines the Price of Carbon? New Evidence From Phase III and IV of the EU ETS*. SSRN.

Edwin, & Josephine. (2023). *European Union Emissions Trading System (EU ETS)*. Oxford University Press.

European Union. (2023). *Verordnung (EU) 2023/956 zur Schaffung eines CO2-Grenzausgleichsmechanismus*. Official Journal of the European Union.

Gao. (2024). *Staggered Linkage and Mechanisms between the International Crude Oil Market and China's Financial Markets*. SSRN.

Goulder, Hafstead, & Dworsky. (2009). *Impacts of Alternative Emissions Allowance Allocation Methods under a Federal Cap-and-Trade Program*. National Bureau of Economic Research.

Guest. (2010). Global Demographic Change, Carbon Emissions, the Optimal Carbon Price and Carbon Abatement. *B.E. Journal of Economic Analysis & Policy*. <https://doi.org/10.2202/1524-5861.1466>.

Gullì. (2016). *Windfall profits in the EU ETS power sector*. Edward Elgar Publishing.

Haque. (2023). *Life Cycle Based Carbon Footprint Assessment and Techno-economic Evaluation Methodologies of Hydrogen Energy Systems*. SSRN.

Holt, & Shobe. (2015). *Price and Quantity 'Collars' for Stabilizing Emissions Allowance Prices: An Experimental Analysis of the EU ETS Market Stability Reserve*. SSRN.

Hu, Hu, & Wu. (2025). Green Policies, Greener Wallets: How Cap-and-Trade Regulation Affects Cost of Capital. *Business Strategy and the Environment*.

<https://doi.org/10.1002/bse.4101>.

Janikowski, Michaliszyn, & Krupanek. (1994). *Joint Implementation Projects between the Netherlands and Poland*. Springer Netherlands.

Kasprzyk, A. (2022). *The Impact of Economic Growth on CO₂ Emissions in the European Union*. SSRN.

KIFORY, & INNOCENT DANIEL. (2025). *Carbon Price Volatility Modeling: A STR-GARCH Approach Applied to the European Carbon Market*. SSRN.

Kirchner, Schmidt, & Wehrle. (2019). *Exploiting Synergy of Carbon Pricing and other Policy Instruments for Deep Decarbonization*. OSF Preprints.

Kleinhanss, W., Plieninger, A., & Utesch, M. (2002). *The Kyoto Protocol: Implications for Agriculture and Forestry*. Springer.

Ladaniwskyj. (2008). *Price Dynamics in the European Carbon Market*. SSRN.

ledo, Sapkota, & Snapp. (2023). *A Monitoring, Reporting and Verification Framework (Mrv) for Tracking Fertilizer-Induced Nitrous Oxide Emissions*. SSRN.

Li, & Zhao. (2025). *The Effectiveness of Carbon Emission Trading System: Evidence from China's Regional Markets*. SSRN.

Mauer, Okullo, & Pahle. (2020). *Postponing Auctioning Versus Cancellation of Allowances in the EU ETS*. SSRN.

Oberthür, & Ott. (1999). *Emission Limitation and Reduction Commitments (Article 3)*. Springer Berlin Heidelberg.

Otto, V. (2007). *The EU ETS and its Impact on Innovation*. ZEW Discussion Papers.

- Pearse, & Böhm. (2014). Ten reasons why carbon markets will not bring about radical emissions reduction. *Carbon Management*. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.990679>.
- Piga. (2003). Pigouvian Taxation in Tourism. *Environmental & Resource Economics*.
<https://doi.org/10.1023/b:earc.0000003544.77701.01>.
- Ramji. (2018). *Paris Agreement and climate change in India*. Routledge.
- Raymond, L. (2016). *The Regional Greenhouse Gas Initiative: A Model for Climate Policy?*. Routledge.
- Reid. (2022). *The regression of atmospheric concentration on carbon dioxide emissions*. ESSOAr.
- Reinaud. (2008). *From Electricity Prices to Electricity Costs: Impact of Emissions Trading on Industry's Electricity Purchasing Strategies*. Edward Elgar Publishing.
- Rose. (1987). Electricity and industrial productivity: A technical and economic perspective. *Energy Economics*. [https://doi.org/10.1016/0167-188x\(87\)90009-7](https://doi.org/10.1016/0167-188x(87)90009-7).
- Sell, J. (2004). *The EU Emissions Trading Scheme: An Overview*. IEA.
- Teitz, M. (2006). *The Economics of Climate Change: A Primer*. Resources for the Future.
- Thierschb, B. (2017). *Die soziale Dimension der Energiewende*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Tol. (2001). Equitable cost-benefit analysis of climate change policies. *Ecological Economics*.
[https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(00\)00204-4](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(00)00204-4).
- Wei, & Tian. (2013). Building Carbon Emissions Trading System for China under the Experience of EU Emissions Trading System. *Advanced Materials Research*.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.411-414.2505>.

Weishaar. (2014). *Implementation issue 4: Lawsuits following from emissions trading*. Edward Elgar Publishing.

Wettestad. (2023). *Proactive prevention of carbon leakage? The EU Carbon Border Adjustment Mechanism*. Edward Elgar Publishing.

Will. (2019). *The eu Emissions Trading System emissions trading system (ets) Leading to Carbon Leakage Effects*. Brill Nijhoff.

Yan. (2021). The impact of climate policy on fossil fuel consumption: Evidence from the Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI). *Energy Economics*.

<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105333>.