

Führt der Handel mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten nachweislich zu  
einer signifikanten Verlangsamung des  
menschengemachten Klimawandels?

KI-generierte Akademische Arbeit – Showcase

Akademische Arbeit KI (Multi-Agenten-System)

Januar 2025

# Table of Contents

Abstract . . . . .	1
Einleitung . . . . .	3
Literaturübersicht . . . . .	4
1.1 Geschichte des Emissionshandels: Von Kyoto zum Pariser Abkommen . .	4
1.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie . . . . .	8
1.3 CO2-Preismechanismen und Klimaschutz . . . . .	11
Tabelle 1: Vergleich von CO2-Preismechanismen . . . . .	14
1.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit . . . . .	15
1.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen . . . . .	18
Methodik . . . . .	22
2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung . . . . .	23
Abbildung 1: Funktionsweise eines Cap-and-Trade-Systems . . . . .	25
2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien . . . . .	26
2.3 Datenquellen und Messverfahren . . . . .	28
2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse . . . . .	30
Analyse . . . . .	33
1. Emissionsreduktionen durch CO2-Handel . . . . .	35
2. Preisgestaltung und Marktmechanismen . . . . .	39
Abbildung 2: Funktionsweise der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS	41
3. Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China) . . . . .	44
3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) . . . . .	45
Tabelle 2: Emissions- und Preisentwicklung im EU ETS (Phasenübersicht) .	46
3.2. Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm . . . . .	47
3.3. Chinas Nationales Emissionshandelssystem . . . . .	48
Tabelle 3: Globale Fallstudien-Daten und projizierte Auswirkungen . . . . .	50
4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten . . . . .	51

4.1. CO2-Steuern (Carbon Taxes) . . . . .	51
4.2. Regulierungen (Command-and-Control) . . . . .	52
4.3. Subventionen (Subsidies) . . . . .	53
4.4. Synergien und Politikmix . . . . .	54
Tabelle 4: Bewertung verschiedener Klimaschutzinstrumente im Politikmix .	55
5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung . . . . .	56
5.1. Direkte Emissionsreduktionen . . . . .	56
5.2. Anreize für Innovation und Technologiewandel . . . . .	57
5.3. Wirtschaftliche Auswirkungen und Wettbewerbsfähigkeit . . . . .	58
5.4. Co-Benefits und Nebeneffekte . . . . .	59
Tabelle 5: Co-Benefits und Nebeneffekte der CO2-Reduktion . . . . .	59
5.5. Herausforderungen bei der empirischen Evidenz . . . . .	60
Diskussion . . . . .	61
1. Implikationen für die Klimapolitik . . . . .	62
2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels . . . . .	64
3. Verbesserungsvorschläge für CO2-Märkte . . . . .	66
4. Rolle im globalen Klimaschutz . . . . .	67
5. Empfehlungen für Politik und Wirtschaft . . . . .	69
Einschränkungen . . . . .	72
Methodische Einschränkungen . . . . .	72
Umfang und Generalisierbarkeit . . . . .	73
Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen . . . . .	73
Theoretische und Konzeptionelle Einschränkungen . . . . .	74
Zukünftige Forschungsrichtungen . . . . .	74
1. Empirische Validierung und großflächige Tests neuer Mechanismen . . . .	75
2. Integration neuer Sektoren und Gase . . . . .	75
3. Verteilungswirkungen und soziale Gerechtigkeit . . . . .	75

4. Rolle digitaler Technologien und Künstlicher Intelligenz . . . . .	76
5. Wechselwirkungen mit anderen Politikfeldern . . . . .	76
6. Internationale Kooperation und globale Kohlenstoffmärkte . . . . .	76
7. Langfristige Transformation und Netto-Null-Szenarien . . . . .	77
Fazit . . . . .	77
Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung . . . . .	78
Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels . . . . .	79
Zukünftige Forschungsrichtungen . . . . .	81
Anhang A: Detailliertes Rahmenwerk zur Bewertung der Emissionsreduktion . . .	82
A.1 Theoretische Grundlagen der Kosten-Nutzen-Analyse im Emissionshandel	82
A.2 Messverfahren und Indikatoren zur Emissionsbewertung . . . . .	83
A.3 Kausale Modellierung der Klimaschutzwirkung . . . . .	84
A.4 Herausforderungen bei der Validierung und Abgrenzung . . . . .	85
Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Daten und Projektionen . . . . .	86
C.1 EU ETS: Emissionsreduktionen und Preisszenarien . . . . .	86
C.2 Kalifornisches Cap-and-Trade: Marktvolumen und Compliance-Raten . .	87
C.3 Cross-System-Vergleich: Effizienz und Kosten . . . . .	88
Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen . . . . .	89
D.1 Foundational Texts zur Umweltökonomie und Klimapolitik . . . . .	89
D.2 Key Research Papers zu Emissionshandelssystemen . . . . .	90
D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken . . . . .	90
D.4 Software/Tools für Emissionsmodellierung . . . . .	91
D.5 Internationale Organisationen und Initiativen . . . . .	92
Anhang E: Glossar von Fachbegriffen . . . . .	92
References . . . . .	96
Literaturverzeichnis . . . . .	97

## Abstract

**Forschungsproblem und Ansatz:** Angesichts der dringenden Notwendigkeit, globale Treibhausgasemissionen zur Erreichung der Pariser Klimaziele zu reduzieren, untersucht diese Arbeit kritisch die Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Emissionshandelssystemen (EHS) als zentrales marktwirtschaftliches Instrument der Klimapolitik. Es wird analysiert, inwiefern diese Systeme nachweislich zu einer signifikanten Verlangsamung des menschengemachten Klimawandels beitragen.

**Methodik und Ergebnisse:** Die Untersuchung stützt sich auf einen mehrdimensionalen Analyserahmen, der ökonomische, ökologische und politische Dimensionen berücksichtigt, sowie auf detaillierte Fallstudien des EU ETS, des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms und des chinesischen nationalen EHS. Die Ergebnisse zeigen, dass EHS unter optimalen Designbedingungen und bei einem ausreichend hohen und stabilen Kohlenstoffpreis messbare Emissionsreduktionen erzielen können. Jedoch sind ihre Wirksamkeit und Akzeptanz stark von der Ambition des Caps, der Allokationsmethode und effektiven Marktstabilitätsmechanismen abhängig.

**Wesentliche Beiträge:** (1) Detaillierte Analyse der Designelemente von EHS und ihres Einflusses auf die Klimaschutzwirkung. (2) Umfassender Vergleich globaler EHS und ihrer evolutionären Entwicklung. (3) Erkenntnisse zur Integration von EHS in einen breiteren klimapolitischen Mix und zu Strategien zur Bewältigung von Herausforderungen wie Preisvolatilität und Carbon Leakage.

**Implikationen:** Emissionshandelssysteme sind mächtige, aber komplexe Instrumente, die eine kontinuierliche Anpassung, robuste Governance und internationale Kooperation erfordern. Eine effektive Kohlenstoffpreisgestaltung ist entscheidend für einen kosteneffizienten Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft, die Förderung von Innovationen und die Erreichung globaler Klimaziele.

**Keywords:** Emissionshandel, CO2-Zertifikate, Klimapolitik, Cap-and-Trade, EU ETS, Pariser Abkommen, Carbon Pricing, Kohlenstofflecks, Marktstabilitätsreserve, Dekarbonisierung, Umweltökonomie, Klimawandel, Nachhaltigkeit, Innovation, Energieeffizienz

## Einleitung

Der Klimawandel ist eine der drängendsten und komplexesten Herausforderungen unseres Jahrhunderts. Seine weitreichenden Auswirkungen sind bereits heute spürbar; Prognosen deuten zudem auf eine erhebliche Verschärfung in den kommenden Jahrzehnten hin (Reid, 2022). Diese globale Erwärmung, hauptsächlich durch menschengemachte Treibhausgasemissionen – allen voran Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) – verursacht, hat weitreichende Folgen (Haque, 2023). Dazu zählen ein steigender Meeresspiegel, extreme Wetterphänomene, gestörte Ökosysteme und eine direkte Bedrohung unserer Lebensgrundlagen. Die Notwendigkeit, diesen Emissionen wirksam entgegenzutreten, ist unbestreitbar (Kirchner et al., 2019). Daher wurden zahlreiche politische und ökonomische Instrumente entwickelt, um den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu beschleunigen.

Die internationale Gemeinschaft hat die Notwendigkeit erkannt, gemeinsam zu handeln. Abkommen wie das Kyoto-Protokoll und das Pariser Abkommen bilden hierfür den Rahmen für globale Klimaschutzmaßnahmen (Oberthür & Ott, 1999)(Ramji, 2018). Solche Bemühungen zeigen klar: Der Klimawandel ist ein globales Problem, das nur mit koordinierten und ambitionierten Lösungen zu bewältigen ist. In diesem Kontext haben sich marktwirtschaftliche Instrumente, besonders der CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel, als ein zentraler Pfeiler der Klimapolitik durchgesetzt. Der Emissionshandel soll die Kosten der Emissionsreduktion minimieren (Goulder et al., 2009). Er motiviert Unternehmen, in innovative, emissionsmindernde Technologien zu investieren. Ziel ist es, die eigenen Emissionen unter ein festgelegtes Limit zu senken oder überschüssige Zertifikate zu verkaufen. Dieses System, auch Cap-and-Trade genannt, funktioniert so: Eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen in einem Sektor oder einer Region wird festgelegt. Anschließend werden Emissionszertifikate verteilt oder versteigert, die es den Inhabern gestatten, eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent auszustoßen.

## Literaturübersicht

Die globale Klimakrise stellt eine der drängendsten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar, die tiefgreifende Transformationen in Wirtschaft und Gesellschaft erfordert (Reid, 2022). Um die anthropogenen Treibhausgasemissionen wirksam zu reduzieren, hat sich eine Vielzahl von politischen Instrumenten entwickelt, wobei marktbasierte Ansätze, insbesondere Emissionshandelssysteme (EHS) und Kohlenstoffpreisgestaltung, eine zentrale Rolle eingenommen haben. Diese Instrumente zielen darauf ab, die externen Kosten der Umweltverschmutzung zu internalisieren und ökonomische Anreize für emissionsminderndes Verhalten zu schaffen. Die vorliegende Literaturübersicht beleuchtet die Entwicklung, die theoretischen Grundlagen, die Implementierungsmechanismen, die empirische Wirksamkeit sowie die kritischen Herausforderungen dieser Instrumente im Kontext der globalen Klimapolitik. Dabei wird die historische Entwicklung von internationalen Abkommen wie dem Kyoto-Protokoll bis hin zum Pariser Abkommen nachgezeichnet und die Entstehung sowie die Evolution bedeutender Emissionshandelssysteme, insbesondere des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS), detailliert untersucht. Ein besonderer Fokus liegt auf der Verankerung dieser Ansätze in der Umweltökonomie, der Analyse ihrer Funktionsweise und der Diskussion ihrer Stärken und Schwächen im Vergleich zu anderen politischen Maßnahmen. Schließlich werden die empirischen Erkenntnisse über die tatsächlichen Auswirkungen auf Emissionen, Wirtschaft und Innovation sowie die anhaltenden Debatten über ihre Gerechtigkeit und Effektivität kritisch bewertet.

### *1.1 Geschichte des Emissionshandels: Von Kyoto zum Pariser Abkommen*

Die Geschichte des Emissionshandels ist eng mit der Entwicklung der internationalen Klimapolitik verknüpft und spiegelt den Wandel im Verständnis und der Herangehensweise an die Reduktion von Treibhausgasemissionen wider. Die Idee, Umweltgüter über Markt-

mechanismen zu steuern, ist zwar älter, ihre konkrete Anwendung auf globale Klimaprobleme nahm jedoch mit dem Kyoto-Protokoll ihren Anfang (Oberthür & Ott, 1999).

Das 1997 verabschiedete Kyoto-Protokoll war ein wegweisendes internationales Abkommen, das erstmals verbindliche Reduktionsziele für Treibhausgasemissionen für Industrieländer festlegte (Oberthür & Ott, 1999). Über die reinen Reduktionsziele hinaus führte das Protokoll drei “flexible Mechanismen” ein, die es den Vertragsparteien ermöglichen sollten, ihre Verpflichtungen kosteneffizient zu erfüllen: den Emissionshandel (Emission Trading, ET), Projekte zur Gemeinsamen Umsetzung (Joint Implementation, JI) und den Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (Clean Development Mechanism, CDM) (Oberthür & Ott, 1999). Der Emissionshandel erlaubte es Ländern, die ihre Ziele übererfüllten, überschüssige Emissionsrechte an Länder zu verkaufen, die Schwierigkeiten hatten, ihre Ziele zu erreichen. Die Gemeinsame Umsetzung ermöglichte es Industrieländern, Emissionsminderungsprojekte in anderen Industrieländern zu finanzieren und die daraus resultierenden Emissionsgutschriften anzurechnen. Der Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung (CDM) erlaubte es Industrieländern, Emissionsminderungsprojekte in Entwicklungsländern zu finanzieren und die daraus resultierenden Gutschriften (zertifizierte Emissionsreduktionen, CERs) für die Erfüllung ihrer eigenen Verpflichtungen zu nutzen (Oberthür & Ott, 1999). Das übergeordnete Ziel dieser Mechanismen war es, die globalen Reduktionskosten zu minimieren, indem Anreize geschaffen wurden, Emissionen dort zu reduzieren, wo dies am günstigsten war. Dies sollte die Akzeptanz und die Effizienz der Klimapolitik erhöhen.

Ein frühes Beispiel für die Gemeinsame Umsetzung war ein Projekt zwischen den Niederlanden und Polen, das die Machbarkeit und die Herausforderungen solcher bilateralen Kooperationen aufzeigte (Janikowski et al., 1994). Diese frühen Erfahrungen waren entscheidend für die Gestaltung zukünftiger Mechanismen. Trotz der innovativen Ansätze und der Schaffung einer ersten globalen Kohlenstoffmarktarchitektur stieß das Kyoto-Protokoll auf erhebliche politische Widerstände, insbesondere in den Vereinigten Staaten, die das Abkommen nie ratifizierten. Dies führte zu einer begrenzten globalen Reichweite und einer Schwächung

seiner Wirksamkeit. Die Komplexität der Mechanismen und die Herausforderungen bei der Messung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen und Reduktionen stellten ebenfalls Hürden dar, die eine vollständige Ausschöpfung des Potenzials verhinderten. Dennoch legte Kyoto den Grundstein für die Idee des Handels mit Emissionsrechten und beeinflusste maßgeblich die Entwicklung regionaler Systeme.

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) ist das weltweit größte und älteste grenzüberschreitende Emissionshandelssystem und wurde 2005 als direkte Reaktion auf die Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls eingeführt (Edwin & Josephine, 2023). Es deckt derzeit rund 40 % der Treibhausgasemissionen der Europäischen Union ab und umfasst Sektoren wie die Energiewirtschaft, energieintensive Industrien sowie den Luftverkehr (Edwin & Josephine, 2023). Die Einführung des EU ETS markierte einen Paradigmenwechsel in der europäischen Klimapolitik, indem es einen marktbasierten Ansatz zur Emissionsreduktion etablierte. Das System funktioniert nach dem “Cap-and-Trade”-Prinzip: Eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen wird festgelegt, und Unternehmen erhalten oder kaufen Emissionszertifikate, die jeweils eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent repräsentieren. Unternehmen müssen am Ende des Jahres eine ausreichende Anzahl von Zertifikaten abgeben, um ihre Emissionen zu decken. Unternehmen, die mehr emittieren, als sie Zertifikate besitzen, müssen zusätzliche Zertifikate kaufen, während Unternehmen, die weniger emittieren, ihre überschüssigen Zertifikate verkaufen können. Dies schafft einen Anreiz, Emissionen zu reduzieren, um Kosten zu sparen oder Einnahmen zu erzielen.

Die Entwicklung des EU ETS war in mehrere Phasen unterteilt. Die erste Phase (2005-2007) diente hauptsächlich als Lernphase, in der die Allokation der Zertifikate größtenteils kostenlos und basierend auf historischen Emissionen erfolgte (Edwin & Josephine, 2023). Dies führte zu einer Überallokation von Zertifikaten, was die Preise drückte und die Wirksamkeit des Systems in Frage stellte (Ladaniwskyj, 2008). Die zweite Phase (2008-2012) fiel mit der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls zusammen und sah eine leichte Verschärfung des Caps sowie die Integration von CDM- und JI-Gutschriften vor. Die Wirtschaftskrise

von 2008 führte jedoch erneut zu einem massiven Überschuss an Zertifikaten und einem Preisverfall. Die dritte Phase (2013-2020) brachte wesentliche Reformen mit sich, darunter eine stärkere Zentralisierung der Zertifikateallokation, die Einführung von Auktionen als primäres Allokationsverfahren und die Festlegung eines einheitlichen EU-weiten Caps (Edwin & Josephine, 2023). Trotz dieser Reformen blieben die Kohlenstoffpreise über weite Strecken niedrig, was die Notwendigkeit weiterer struktureller Anpassungen verdeutlichte (Ladaniwskyj, 2008). Die vierte Phase (ab 2021) beinhaltet eine weitere Verschärfung des Caps, die Ausweitung auf neue Sektoren wie den Seeverkehr und die Einführung des Klimasozialfonds, um soziale Auswirkungen abzufedern. Die Einführung des Marktstabilitätsreservoirs (MSR) im Jahr 2019, das überschüssige Zertifikate vom Markt nimmt, hat maßgeblich zur Stabilisierung und Erhöhung der Kohlenstoffpreise beigetragen (Mauer et al., 2020). Die Preisdynamik im europäischen Kohlenstoffmarkt ist komplex und wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, einschließlich politischer Entscheidungen, wirtschaftlicher Aktivität und Energiepreisen (Dittmann et al., 2024).

Nach dem Kyoto-Protokoll folgte eine Periode intensiver Verhandlungen, die schließlich im Pariser Abkommen von 2015 mündete. Das Pariser Abkommen markierte einen fundamentalen Wandel in der internationalen Klimapolitik, indem es einen universellen und flexiblen Rahmen schuf, der alle Länder, Industrie- und Entwicklungsländer, zur Emissionsreduktion verpflichtet (Ramji, 2018). Im Gegensatz zum Top-down-Ansatz des Kyoto-Protokolls basiert Paris auf einem Bottom-up-Ansatz, bei dem jedes Land seine eigenen national festgelegten Beiträge (Nationally Determined Contributions, NDCs) festlegt und regelmäßig aktualisiert (Ramji, 2018). Obwohl das Abkommen keine spezifischen Emissionshandelssysteme vorschreibt, sieht Artikel 6 des Pariser Abkommens die Möglichkeit vor, internationale Kooperationsmechanismen, einschließlich marktbasierter Ansätze, zu nutzen, um die NDCs kosteneffizient zu erreichen (Gao, 2024). Dies hat die Tür für die Entwicklung neuer internationaler Kohlenstoffmärkte und die Verknüpfung bestehender nationaler und regionaler Systeme geöffnet (Gao, 2024). Die Diskussionen um die Ausgestaltung dieser Mechanismen

unter Artikel 6 sind komplex und zielen darauf ab, Doppelzählungen von Emissionsreduktionen zu vermeiden und die Umweltintegrität zu gewährleisten. Die Möglichkeit der Verknüpfung von Emissionshandelssystemen, auch in gestaffelter Form, bietet Potenzial für eine effizientere globale Emissionsminderung, birgt aber auch Herausforderungen hinsichtlich der Harmonisierung von Regeln und der Vermeidung von Ungleichgewichten (Gao, 2024). Die Entwicklung des Emissionshandels von einem zentralisierten, top-down-gesteuerten System unter Kyoto zu einem dezentralisierten, Bottom-up-Ansatz unter Paris spiegelt eine Anpassung an die politischen Realitäten und die Notwendigkeit einer breiteren Beteiligung wider. Die zunehmende Verbreitung nationaler und regionaler EHS weltweit, von Kalifornien über China bis hin zu Systemen in Korea und der Schweiz, zeigt die wachsende Akzeptanz dieses Instruments als Kernstück der Klimapolitik.

## *1.2 Theoretische Grundlagen der Umweltökonomie*

Die Einführung von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffsteuern ist tief in den theoretischen Grundlagen der Umweltökonomie verwurzelt, die sich mit der Allokation knapper Umweltgüter und der Internalisierung von Umweltkosten befasst. Im Kern geht es darum, Marktversagen zu korrigieren, die entstehen, wenn die sozialen Kosten oder Nutzen einer Aktivität nicht im Marktpreis widerspiegelt werden.

Ein zentrales Konzept der Umweltökonomie sind **Externalitäten**, insbesondere negative Externalitäten. Eine negative Externalität tritt auf, wenn die Produktion oder der Konsum eines Gutes unbeabsichtigte Kosten für Dritte verursacht, die nicht am Marktgeschäft beteiligt sind und auch nicht dafür entschädigt werden. Umweltverschmutzung, wie die Emission von Treibhausgasen, ist ein klassisches Beispiel für eine negative Externalität. Unternehmen emittieren CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre, ohne die vollen gesellschaftlichen Kosten dieser Emissionen (z.B. Klimawandel, Gesundheitskosten, Verlust der Biodiversität) zu tragen. Dies führt dazu, dass der private Preis der Emissionen unter den sozialen Kosten liegt, was zu einer Überproduktion von Gütern mit hohen Emissionen und einer ineffizienten

Allokation von Ressourcen führt (Mecheril & Rangger, 2023). Das Ergebnis ist ein Marktversagen, da der freie Markt ohne Intervention nicht in der Lage ist, ein gesellschaftlich optimales Niveau der Umweltverschmutzung zu erreichen. Die Gesellschaft trägt die Kosten, während die Verursacher nicht angemessen zur Rechenschaft gezogen werden.

Zur Korrektur solcher Marktversagen schlug der britische Ökonom Arthur Cecil Pigou bereits im frühen 20. Jahrhundert die Einführung von **Pigou-Steuern** vor (Piga, 2003). Eine Pigou-Steuer ist eine Steuer, die auf Aktivitäten erhoben wird, die negative Externalitäten verursachen, und deren Höhe den externen Grenzkosten der Aktivität entspricht. Im Kontext des Klimawandels würde eine Kohlenstoffsteuer als Pigou-Steuer fungieren, die auf jede emittierte Tonne CO<sub>2</sub> erhoben wird. Das Ziel ist es, den Emittenten dazu zu bringen, die vollen sozialen Kosten seiner Emissionen zu tragen, wodurch der Anreiz geschaffen wird, diese Emissionen zu reduzieren. Theoretisch führt eine Pigou-Steuer zu einem effizienten Ergebnis, da sie die Emittenten dazu veranlasst, Emissionen bis zu dem Punkt zu reduzieren, an dem die Grenzkosten der Emissionsminderung den Steuersatz erreichen. Dies gewährleistet, dass die Emissionen bis zu einem gesellschaftlich optimalen Niveau reduziert werden. Die Hauptherausforderung bei der Implementierung einer Pigou-Steuer liegt jedoch in der Bestimmung des “richtigen” Steuersatzes, der den tatsächlichen externen Grenzkosten der Umweltverschmutzung entspricht. Dies erfordert eine genaue Quantifizierung der Umweltschäden, was oft mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Darüber hinaus können politische Widerstände gegen hohe Steuersätze die Umsetzung erschweren. Dennoch wird die Kohlenstoffsteuer als ein ökonomisch effizientes Instrument angesehen, das klare Preissignale sendet und Investitionen in kohlenstoffarme Technologien fördert (Guest, 2010).

Eine alternative Perspektive zur Korrektur von Externalitäten bietet das **Coase-Theorem**, das von Ronald Coase in den 1960er Jahren entwickelt wurde. Coase argumentierte, dass in einer Welt ohne Transaktionskosten und bei klar definierten Eigentumsrechten die Parteien durch Verhandlungen eine effiziente Lösung für Externalitäten finden können, unabhängig davon, wie die Eigentumsrechte ursprünglich zugewiesen wurden (Backhaus, 2008).

Im Kontext der Umweltverschmutzung würde dies bedeuten, dass, wenn Emissionsrechte klar definiert und handelbar sind, Emittenten und Geschädigte miteinander verhandeln könnten, um ein effizientes Emissionsniveau zu erreichen. Wenn beispielsweise die Gesellschaft ein Recht auf saubere Luft hat, müssten Emittenten für das Recht bezahlen, zu verschmutzen. Wenn Emittenten das Recht haben, zu verschmutzen, könnte die Gesellschaft sie dafür bezahlen, weniger zu emittieren. Das Coase-Theorem lieferte die theoretische Grundlage für die Entwicklung von **Cap-and-Trade-Systemen**, zu denen auch der Emissionshandel gehört. Bei einem Cap-and-Trade-System wird eine Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen festgelegt, und Emissionsrechte werden als handelbare Güter geschaffen. Diese Rechte können entweder versteigert oder kostenlos an die Emittenten verteilt werden (Goulder et al., 2009). Durch den Handel mit diesen Rechten entsteht ein Marktpreis für Emissionen, der die Grenzkosten der Emissionsminderung widerspiegelt. Die Emittenten haben einen Anreiz, ihre Emissionen zu reduzieren, wenn die Kosten der Reduktion niedriger sind als der Marktpreis für ein Emissionsrecht. Umgekehrt können Emittenten, für die die Reduktion teurer ist, Rechte kaufen. Dies führt zu einer kosteneffizienten Verteilung der Emissionsminderungskosten über alle beteiligten Akteure hinweg, da die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind.

Der Hauptvorteil eines Cap-and-Trade-Systems gegenüber einer Kohlenstoffsteuer liegt in der **Emissionssicherheit**: Die Gesamtmenge der Emissionen wird durch das Cap garantiert, während bei einer Steuer die Emissionsreduktion von der Reaktion der Akteure auf den Steuersatz abhängt und somit unsicher ist. Der Nachteil ist die **Preisschwankung**: Der Preis der Emissionsrechte kann je nach Angebot und Nachfrage stark variieren, was die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen kann (Ladaniwskyj, 2008). Eine Kohlenstoffsteuer hingegen bietet Preissicherheit, aber keine Emissionssicherheit. Beide Instrumente sind jedoch darauf ausgelegt, ökonomische Anreize zu schaffen und die Effizienz bei der Erreichung von Umweltzielen zu maximieren. Sie internalisieren die externen Kosten der Umweltverschmutzung und fördern Innovationen in emissionsarmen Technologien, da die

Reduktion von Emissionen zu einem ökonomischen Vorteil wird. Die Wahl zwischen einer Kohlenstoffsteuer und einem Emissionshandelssystem hängt oft von politischen Präferenzen, administrativen Kapazitäten und den spezifischen Zielen der Klimapolitik ab, wobei oft auch hybride Ansätze in Betracht gezogen werden (Holt & Shobe, 2015).

### *1.3 CO<sub>2</sub>-Preismechanismen und Klimaschutz*

CO<sub>2</sub>-Preismechanismen sind darauf ausgelegt, die Kosten für das Emittieren von Treibhausgasen zu internalisieren, wodurch Anreize für Unternehmen und Verbraucher geschaffen werden, ihre Emissionen zu reduzieren. Die zwei primären Formen dieser Mechanismen sind Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssysteme (EHS). Obwohl beide das gleiche übergeordnete Ziel verfolgen – die Reduzierung von Emissionen durch die Schaffung eines Preises für Kohlenstoff – unterscheiden sie sich grundlegend in ihrer Funktionsweise, ihren Implikationen und ihren Designelementen.

Die **Kohlenstoffsteuer** ist ein direkter Preismechanismus, bei dem ein fester Preis pro Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent festgelegt wird, die von Unternehmen oder Verbrauchern emittiert wird. Dieser Ansatz bietet eine hohe Preissicherheit für Emittenten, was die Planbarkeit von Investitionen in emissionsarme Technologien erleichtern kann (Guest, 2010). Die Hauptherausforderung liegt jedoch in der Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Emissionsreduktionen. Da die Reaktion der Emittenten auf den Steuersatz schwer vorhersehbar ist, kann das erreichte Reduktionsniveau von den ursprünglichen Zielen abweichen. Die Einnahmen aus der Kohlenstoffsteuer können für verschiedene Zwecke verwendet werden, beispielsweise zur Finanzierung von Klimaschutzprojekten, zur Senkung anderer Steuern (was zu einem “Doppelten Dividend”-Effekt führen kann, indem sowohl Umweltschutz als auch Wirtschaftswachstum gefördert werden) oder zur Umverteilung an Haushalte, um soziale Ungleichheiten zu mildern (Guest, 2010). Die Höhe der Steuer ist entscheidend für ihre Wirksamkeit; zu niedrige Steuern haben kaum Anreizwirkung, während zu hohe Steuern auf starken politischen Widerstand stoßen können.

Im Gegensatz dazu ist der **Emissionshandel** ein Mengenmechanismus, der eine Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen in einem bestimmten Sektor oder einer Region festlegt. Innerhalb dieser Obergrenze werden Emissionsrechte ausgegeben, die gehandelt werden können (Edwin & Josephine, 2023). Der Preis für diese Rechte bildet sich am Markt durch Angebot und Nachfrage. Der Hauptvorteil des Emissionshandels ist die Gewissheit, dass das Emissionsziel erreicht wird, da die Gesamtmenge der Emissionen durch das Cap begrenzt ist. Der Nachteil ist die Volatilität des Kohlenstoffpreises, der starken Schwankungen unterliegen kann (Ladaniwskyj, 2008). Diese Preisschwankungen können die Planungssicherheit für Unternehmen beeinträchtigen und langfristige Investitionen in Frage stellen. Um dieser Volatilität entgegenzuwirken, wurden im EU ETS Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) eingeführt, die überschüssige Zertifikate vom Markt nimmt, wenn das Angebot zu hoch ist, und sie wieder freigibt, wenn das Angebot zu knapp wird, um die Preise zu stabilisieren (Mauer et al., 2020). Es gibt auch Vorschläge für Preis- und Mengenkorsetts (“price and quantity collars”), die minimale und maximale Preise für Emissionsrechte festlegen, um extreme Preisausschläge zu verhindern und gleichzeitig die Flexibilität des Marktes zu erhalten (Holt & Shobe, 2015).

Die **Designelemente von EHS** sind entscheidend für ihre Wirksamkeit und Akzeptanz. Die **Festlegung des Caps** ist der wichtigste Parameter, da er die Gesamtmenge der zulässigen Emissionen bestimmt und somit direkt die Ambition des Systems widerspiegelt. Ein zu lockeres Cap führt zu niedrigen Preisen und geringen Reduktionsanreizen, während ein zu aggressives Cap zu hohen Kosten und möglicherweise zu Wettbewerbsnachteilen führen kann. Die **Allokation der Emissionsrechte** ist ein weiterer kritischer Aspekt. Historisch wurden Zertifikate oft kostenlos zugeteilt (“Grandfathering”), basierend auf den historischen Emissionen von Unternehmen. Dies diente dazu, den politischen Widerstand zu minimieren und die Wettbewerbsfähigkeit energieintensiver Industrien zu schützen. Allerdings kann dies auch zu “Windfall Profits” führen, wenn Unternehmen die Kosten der Emissionsrechte an ihre Kunden weitergeben, obwohl sie diese kostenlos erhalten haben. Eine Alternative

ist die **Versteigerung** (Auctioning) von Emissionsrechten, die aus ökonomischer Sicht als effizienter gilt, da sie Preissignale von Anfang an setzt und Einnahmen für den Staat generiert (Goulder et al., 2009). Diese Einnahmen können dann für Klimaschutzmaßnahmen, soziale Ausgleichsmechanismen oder zur Senkung anderer Steuern genutzt werden. Im EU ETS wurde der Anteil der Versteigerungen im Laufe der Zeit erheblich erhöht, um die Effizienz zu steigern und Einnahmen zu generieren (Edwin & Josephine, 2023).

Die **Verbindung von CO<sub>2</sub>-Preismechanismen zu Klimazielen** ist fundamental. Diese Instrumente sind nicht nur dazu gedacht, Emissionen zu reduzieren, sondern auch, dies auf eine kosteneffiziente Weise zu tun, um die Akzeptanz und Nachhaltigkeit der Klimapolitik zu gewährleisten. Sie sollen Anreize für technologische Innovationen schaffen und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft fördern. Eine effektive Kohlenstoffpreisgestaltung kann Synergien mit anderen Klimaschutzinstrumenten erzeugen, indem sie eine grundlegende Kosteneffizienz bei der Emissionsminderung schafft, auf der andere Politiken aufbauen können (Kirchner et al., 2019). Dies kann die Gesamtkosten des Klimaschutzes senken und die Wirksamkeit eines umfassenden Politikpakets erhöhen. Es ist jedoch wichtig, potenzielle Überschneidungen und Konflikte zwischen verschiedenen Instrumenten zu managen, um Ineffizienzen zu vermeiden. Beispielsweise können direkte Subventionen für erneuerbare Energien in einem EHS-Kontext zu einem Überangebot an Zertifikaten führen und den Kohlenstoffpreis senken, was wiederum die Anreize für andere Emissionsminderungen reduziert. Die Integration von Kohlenstoffpreismechanismen in einen breiteren Politikmix erfordert daher eine sorgfältige Koordination und ein kohärentes Design.

Die Debatte zwischen Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssystemen ist seit langem ein zentrales Thema in der umweltökonomischen Forschung. Während Kohlenstoffsteuern durch ihre Einfachheit und Preissicherheit bestechen, bieten EHS die Gewissheit, ein bestimmtes Emissionsziel zu erreichen. Hybride Ansätze, die Elemente beider Systeme kombinieren, wie z.B. Preis- oder Mengenkorsetts, versuchen, die Vorteile beider Instrumente zu nutzen und ihre Nachteile zu minimieren (Holt & Shobe, 2015). Letztlich hängt die Wahl

des geeigneten Mechanismus von den spezifischen nationalen oder regionalen Kontexten, den politischen Zielen und der Bereitschaft zur Akzeptanz von Preisschwankungen oder Emissionsunsicherheiten ab. Unabhängig von der genauen Ausgestaltung sind Kohlenstoffpreismechanismen ein entscheidender Bestandteil einer umfassenden Strategie zur Erreichung der Klimaziele und zur Förderung eines nachhaltigen Wirtschaftswachstums.

*Tabelle 1: Vergleich von CO<sub>2</sub>-Preismechanismen*

Die folgende Tabelle vergleicht die wesentlichen Merkmale von Kohlenstoffsteuern und Emissionshandelssystemen, um ihre Stärken und Schwächen gegenüberzustellen und die Entscheidung für ein bestimmtes Instrument zu erleichtern.

**Tabelle 1: Gegenüberstellung von Kohlenstoffsteuer und Emissionshandelssystem**

Merkmal	Kohlenstoffsteuer	Emissionshandelssystem	
		(EHS)	Implikation/Bedeutung
<b>Preis-/Mengensteuerung</b>	Preis fixiert, Menge variabel	Menge fixiert, Preis variabel	Trade-off zwischen Preissicherheit und Emissionssicherheit.
<b>Emissionssicherheit</b>	Niedrig (unsicher)	Hoch (garantiertes Cap)	EHS garantiert das Ziel, Steuern nicht.
<b>Preissicherheit</b>	Hoch (klarer Preis)	Niedrig (Marktvolatilität)	Steuern bieten Planungssicherheit für Unternehmen.
<b>Kostenverteilung</b>	Direkt über Steuern	Indirekt über Marktpreise	EHS ermöglicht Kosteneffizienz durch Handel.
<b>Einnahmen</b>	Stabil, planbar	Volatil, marktabhängig	Steuereinnahmen können gezielter eingesetzt werden.
<b>Innovation</b>	Anreiz durch feste Kosten	Anreiz durch Kosteneinsparung	Beide fördern Innovationen in emissionsarme Techn.

		Emissionshandelssystem	
Merkmal	Kohlenstoffsteuer	(EHS)	Implikation/Bedeutung
<b>Administrativ-Komplexität</b>	Gering (an Steuern anknüpfbar)	Hoch (Marktregeln, MRV)	EHS erfordert robuste Überwachungsstrukturen.
<b>Politische Akzeptanz</b>	Oft gering (direkte Kosten)	Variabel (weniger "Steuer")	Direkte Kostenwahrnehmung kann Widerstand erzeugen.
<b>Flexibilität</b>	Gering (Anpassung des Satzes)	Hoch (Handel, MSR)	EHS kann auf Marktänderungen reagieren.

*Hinweis: Die Wahl des geeigneten Mechanismus hängt von nationalen Zielen, administrativen Kapazitäten und politischer Präferenz ab. Hybride Ansätze versuchen, die Vorteile beider Systeme zu kombinieren.*

#### 1.4 Empirische Studien zur Wirksamkeit

Die empirische Forschung zur Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen und Kohlenstoffpreisgestaltung ist ein dynamisches Feld, das versucht, die tatsächlichen Auswirkungen dieser Instrumente auf Emissionen, Wirtschaft und Innovation zu quantifizieren. Während die theoretischen Vorteile von marktgestützten Instrumenten weithin anerkannt sind, ist die tatsächliche Wirkung in der Praxis komplex und hängt von einer Vielzahl von Designmerkmalen und Kontextfaktoren ab.

**Reduktion von Emissionen:** Zahlreiche Studien haben versucht, die kausalen Effekte von EHS auf die Emissionen zu isolieren. Erste Analysen des EU ETS in seinen frühen Phasen zeigten gemischte Ergebnisse, oft aufgrund einer Überallokation von Zertifikaten und daraus resultierend niedrigen Kohlenstoffpreisen (Ladaniwskyj, 2008). In den späteren Phasen, insbesondere nach der Einführung des Marktstabilitätsreservoirs (MSR) und der damit verbundenen Erhöhung der Kohlenstoffpreise, konnten jedoch deutlichere Emissionsminderungen festgestellt werden (Edwin & Josephine, 2023). Beispielsweise deuten

Untersuchungen darauf hin, dass das EU ETS in den Sektoren, die es abdeckt, zu einer signifikanten Reduktion der Treibhausgasemissionen beigetragen hat, die ohne das System nicht erreicht worden wäre (Sayer, 2015). Die Wirksamkeit variiert jedoch stark zwischen den Sektoren, wobei der Stromsektor in der Regel die größten Reduktionen erzielt, da hier die Möglichkeiten zur Umstellung auf emissionsärmere Technologien (z.B. von Kohle auf Gas oder erneuerbare Energien) oft am kostengünstigsten sind.

Andere EHS weltweit zeigen ebenfalls unterschiedliche Grade der Wirksamkeit. Das kalifornische Cap-and-Trade-System, das als eines der ambitioniertesten gilt, hat nachweislich zu Emissionsreduktionen geführt, während gleichzeitig die Wirtschaft wuchs. Der chinesische Kohlenstoffmarkt, der größte der Welt, befindet sich noch in einer frühen Phase der Entwicklung, aber erste Studien deuten auf eine positive, wenn auch noch begrenzte, Wirksamkeit hin (Li & Zhao, 2025). Die Herausforderung bei der Bewertung der Emissionsreduktionen liegt oft darin, den Effekt des Preismechanismus von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren, wie technologischem Fortschritt, wirtschaftlichen Abschwüngen oder anderen Klimaschutzpolitiken, abzugrenzen. Robuste ökonometrische Methoden sind erforderlich, um diese Effekte zu isolieren und Verzerrungen zu vermeiden. Die langfristige Wirksamkeit hängt auch stark von der Ambition des Caps ab, das regelmäßig an die Klimaziele angepasst werden muss.

**Wirtschaftliche Auswirkungen:** Die Diskussion um die wirtschaftlichen Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen ist kontrovers. Befürworter argumentieren, dass EHS und Kohlenstoffsteuern Innovationen fördern und zu einer effizienteren Ressourcenallokation führen, während Kritiker Bedenken hinsichtlich der Wettbewerbsfähigkeit und potenzieller Kostenbelastungen äußern.

- **Innovation:** Die Theorie besagt, dass ein Preis auf Kohlenstoff Anreize für Unternehmen schafft, in kohlenstoffarme Technologien und Prozesse zu investieren, um ihre Emissionen und damit ihre Kosten zu senken. Empirische Belege hierfür sind gemischt, aber tendenziell positiv. Studien haben gezeigt, dass in Sektoren, die dem EU ETS unterliegen, eine Zunahme von Patentanmeldungen im Bereich emissionsarmer

Technologien zu verzeichnen war [MISSING: Referenz zu Studien über Innovation im EU ETS]. Dieser Innovationsschub ist jedoch oft nicht gleichmäßig verteilt und hängt von der Höhe und Stabilität des Kohlenstoffpreises sowie von der Verfügbarkeit ergänzender Innovationspolitiken ab. Ein zu niedriger oder zu volatiler Preis kann die Investitionsanreize schwächen.

- **Wettbewerbsfähigkeit und Carbon Leakage:** Eine der größten Sorgen bei der Einführung von Kohlenstoffpreisen ist die sogenannte **Kohlenstofflecks** (Carbon Leakage), bei der Unternehmen ihre Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen verlagern, was zu einer Zunahme der globalen Emissionen führen könnte, anstatt sie zu reduzieren (Wettestad, 2023). Empirische Studien haben jedoch in den meisten Fällen keine signifikanten Belege für großflächige Kohlenstofflecks im EU ETS gefunden (Wettestad, 2023). Dies könnte daran liegen, dass die Kosten für die Verlagerung der Produktion oft höher sind als die durch den Kohlenstoffpreis verursachten Mehrkosten, oder dass die kostenlose Zuteilung von Emissionsrechten in den frühen Phasen des Systems die betroffenen Industrien geschützt hat. Nichtsdestotrotz bleibt die Sorge bestehen, insbesondere für energieintensive und handelsintensive Sektoren. Als Reaktion darauf wurde der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU vorgeschlagen und teilweise implementiert, der darauf abzielt, importierte Güter aus Ländern ohne äquivalente Kohlenstoffpreisgestaltung mit einem Aufschlag zu belegen, um Kohlenstofflecks zu verhindern und gleiche Wettbewerbsbedingungen zu schaffen (Wettestad, 2023).
- **Preisentwicklung:** Die Analyse der Kohlenstoffpreise selbst ist ebenfalls Gegenstand empirischer Forschung. Faktoren, die den Kohlenstoffpreis beeinflussen, umfassen makroökonomische Bedingungen, Energiepreise, politische Entscheidungen (z.B. Cap-Anpassungen, MSR-Regeln) und Spekulation (Dittmann et al., 2024). Die Preisdynamik im EU ETS, insbesondere in Phase 3, wurde umfassend untersucht und zeigt die

Komplexität der Marktmechanismen und die Notwendigkeit einer robusten Governance zur Preisstabilisierung (Dittmann et al., 2024).

- **Verwendung von Einnahmen:** Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionsrechten können erhebliche Summen erreichen und haben wichtige wirtschaftliche Auswirkungen. Studien untersuchen, wie diese Einnahmen am besten verwendet werden können, um die Akzeptanz und die positiven Effekte der Kohlenstoffpreisgestaltung zu maximieren. Optionen umfassen die Reduzierung anderer Steuern, Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz, oder die Unterstützung von Haushalten mit niedrigem Einkommen, um die regressiven Effekte der Kohlenstoffpreisgestaltung abzumildern (Berroth, 2010). Die Art der Einnahmenverwendung hat direkte Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Wirkung und die Verteilungseffekte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die empirischen Studien die Wirksamkeit von Kohlenstoffpreismechanismen bei der Reduzierung von Emissionen grundsätzlich bestätigen, insbesondere wenn die Preise ausreichend hoch und stabil sind. Gleichzeitig zeigen sie die Komplexität der wirtschaftlichen Auswirkungen und die Notwendigkeit eines sorgfältigen Systemdesigns, um negative Nebeneffekte wie Wettbewerbsnachteile oder Kohlenstofflecks zu minimieren und Innovationen maximal zu fördern. Die Fortsetzung der Forschung ist entscheidend, um die Mechanismen weiter zu optimieren und ihre Rolle im globalen Klimaschutz zu stärken.

### *1.5 Kritische Perspektiven und Herausforderungen*

Trotz der breiten Akzeptanz von Emissionshandelssystemen (EHS) und Kohlenstoffsteuern als zentrale Instrumente der Klimapolitik gibt es eine Reihe von kritischen Perspektiven und Herausforderungen, die ihre Wirksamkeit, Gerechtigkeit und politische Akzeptanz in Frage stellen. Diese Kritikpunkte sind entscheidend für die Weiterentwicklung und Verbesserung dieser Mechanismen.

Eine der am häufigsten genannten Herausforderungen ist das Phänomen der **Kohlenstofflecks (Carbon Leakage)**. Dies tritt auf, wenn Unternehmen aufgrund strenger Emissionsvorschriften in einem Land ihre Produktion in Länder mit weniger strengen oder gar keinen Vorschriften verlagern, was zu einer Zunahme der Emissionen in diesen anderen Ländern führt und die globalen Emissionsreduktionen untergräbt (Wettestad, 2023). Die Sorge vor Kohlenstofflecks ist besonders in energieintensiven Industrien verbreitet, die im internationalen Wettbewerb stehen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, darunter die kostenlose Zuteilung von Emissionsrechten an gefährdete Sektoren im EU ETS. Allerdings kann die kostenlose Zuteilung die Anreize zur Emissionsreduktion schwächen und zu “Windfall Profits” führen (Goulder et al., 2009). Eine neuere und ambitioniertere Maßnahme ist der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) der EU, der darauf abzielt, den Kohlenstoffpreis auf importierte Produkte aus Ländern ohne vergleichbare Kohlenstoffpreisgestaltung zu erheben (Wettestad, 2023). Dies soll gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen und gleichzeitig den Anreiz für Drittländer erhöhen, eigene Kohlenstoffpreismechanismen einzuführen. Die Implementierung von CBAM ist jedoch komplex und birgt Herausforderungen hinsichtlich der Kompatibilität mit internationalen Handelsregeln und der genauen Berechnung der Kohlenstoffintensität von Produkten.

Ein weiteres kritisches Thema sind **Preisschwankungen und die Gefahr der Marktmanipulation** im Emissionshandel. Der Preis für Emissionszertifikate wird durch Angebot und Nachfrage bestimmt und kann erheblichen Schwankungen unterliegen, wie die Geschichte des EU ETS gezeigt hat (Ladaniwskyj, 2008). Diese Volatilität kann die Planungssicherheit für Unternehmen untergraben und langfristige Investitionen in emissionsarme Technologien erschweren. Niedrige Preise, wie sie in den frühen Phasen des EU ETS beobachtet wurden, reduzieren die Anreize zur Emissionsminderung erheblich. Hohe und volatile Preise können hingegen die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen und politische Widerstände hervorrufen. Die Rolle von Spekulanten und Finanzakteuren auf dem Kohlenstoffmarkt ist ebenfalls Gegenstand der Debatte, wobei Bedenken hinsichtlich potenzieller

Marktmanipulation und übermäßiger Preisschwankungen geäußert werden. Mechanismen wie die Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS (Mauer et al., 2020) und Preis- oder Mengenkorsetts (Holt & Shobe, 2015) wurden entwickelt, um die Preisstabilität zu verbessern und extreme Preisausschläge zu verhindern. Die effektive Gestaltung und Kalibrierung dieser Mechanismen ist jedoch eine fortlaufende Herausforderung.

Die Frage der **sozialen Gerechtigkeit und Verteilungseffekte** ist ein weiterer zentraler Kritikpunkt an der Kohlenstoffpreisgestaltung. Kohlenstoffpreise können eine regressive Wirkung haben, da sie die Kosten für Energie und andere Güter erhöhen, was Haushalte mit niedrigem Einkommen überproportional belasten kann, da diese einen größeren Anteil ihres Einkommens für diese Grundbedürfnisse ausgeben (Moser, 2015). Dies kann zu “Energiearmut” führen und die soziale Akzeptanz der Klimapolitik untergraben. Um diesen regressiven Effekten entgegenzuwirken, sind begleitende Maßnahmen unerlässlich. Dazu gehören die Umverteilung von Einnahmen aus der Kohlenstoffpreisgestaltung an Haushalte mit niedrigem Einkommen, die Finanzierung von Energieeffizienzprogrammen oder die Senkung anderer Steuern, um die Gesamtbelastung zu reduzieren (Guest, 2010). Im EU ETS wurde beispielsweise der Klimasozialfonds eingeführt, um Mitgliedstaaten bei der Bewältigung der sozialen Auswirkungen der Energiewende zu unterstützen. Die politische Gestaltung dieser Ausgleichsmechanismen ist entscheidend für die Gerechtigkeit und Legitimität der Kohlenstoffpreisgestaltung.

Die **politische Akzeptanz und Governance** stellen ebenfalls erhebliche Herausforderungen dar. Die Einführung und Aufrechterhaltung von Kohlenstoffpreisen stößt oft auf Widerstand von Industrielobbygruppen, politischen Parteien und der Öffentlichkeit, die Bedenken hinsichtlich der wirtschaftlichen Auswirkungen und der Kosten für die Verbraucher äußern. Die Komplexität von EHS, insbesondere die technischen Details der Cap-Festlegung, Allokation und Marktregeln, kann die öffentliche Debatte erschweren und das Vertrauen in das System untergraben. Rechtliche Herausforderungen und Klagen, die sich aus der Implementierung von Emissionshandelssystemen ergeben, wie von Weishaar (2014) unter-

sucht, können die Stabilität und Effektivität dieser Systeme beeinträchtigen und erfordern eine robuste rechtliche Rahmenbedingungen (Weishaar, 2014). Eine transparente und partizipative Governance ist entscheidend, um die Legitimität und langfristige Stabilität von Kohlenstoffpreismechanismen zu gewährleisten.

Schließlich gibt es **kritische Perspektiven hinsichtlich der Wirksamkeitsgrenzen und potenziellen Alternativen** zu Kohlenstoffmärkten. Einige Kritiker argumentieren, dass Kohlenstoffmärkte allein nicht ausreichen werden, um die radikalen Veränderungen herbeizuführen, die für die Erreichung der Klimaziele erforderlich sind (Pearse & Böhm, 2014). Sie weisen darauf hin, dass niedrige Kohlenstoffpreise, die durch Überallokation oder politische Kompromisse verursacht werden, unzureichende Anreize für tiefgreifende Dekarbonisierung bieten. Zudem können Kohlenstoffmärkte nicht alle Emissionen abdecken (z.B. Landwirtschaft, nicht-kommerzielle Sektoren) und sind möglicherweise nicht das effektivste Instrument zur Förderung bestimmter technologischer Durchbrüche. Pearse und Böhm (2014) identifizieren zehn Gründe, warum Kohlenstoffmärkte möglicherweise nicht zu radikalen Veränderungen führen, darunter die Ineffektivität bei der Bewältigung von Rebound-Effekten, die Vernachlässigung von Suffizienzstrategien und die Anfälligkeit für Lobbyismus (Pearse & Böhm, 2014). Alternative oder ergänzende Ansätze umfassen direkte Regulierung (z.B. Effizienzstandards, Verbote), Subventionen für grüne Technologien, öffentliche Investitionen in Forschung und Entwicklung sowie eine umfassende grüne Industriepolitik. Die Integration von Kohlenstoffpreismechanismen in einen breiteren und kohärenteren Politikmix, der auch diese komplementären Instrumente umfasst, wird zunehmend als notwendig erachtet, um die ehrgeizigen Klimaziele zu erreichen (Kirchner et al., 2019). Dies erfordert eine sorgfältige Abwägung der Stärken und Schwächen jedes Instruments und eine strategische Abstimmung, um Synergien zu maximieren und Zielkonflikte zu minimieren.

Die Literaturübersicht hat gezeigt, dass Emissionshandelssysteme und Kohlenstoffpreisgestaltung sich als zentrale Säulen der globalen Klimapolitik etabliert haben, deren Entwicklung von den Pionierjahren des Kyoto-Protokolls bis zur ambitionierten Architek-

tur des Pariser Abkommens und der Einführung komplexer regionaler Systeme wie dem EU ETS reicht. Die theoretischen Grundlagen in der Umweltökonomie, insbesondere die Konzepte von Externalitäten, Pigou-Steuern und dem Coase-Theorem, untermauern die Rationale für diese marktgestützten Ansätze, die darauf abzielen, Marktversagen zu korrigieren und Kosteneffizienz bei der Emissionsminderung zu gewährleisten. Empirische Studien bestätigen grundsätzlich die Wirksamkeit dieser Instrumente bei der Reduktion von Emissionen, insbesondere wenn die Kohlenstoffpreise ausreichend hoch und stabil sind, während gleichzeitig die komplexen Auswirkungen auf Innovation und Wettbewerbsfähigkeit beleuchtet werden. Nichtsdestotrotz sind diese Mechanismen mit erheblichen Herausforderungen konfrontiert, darunter die Gefahr von Kohlenstofflecks, Preisschwankungen, Fragen der sozialen Gerechtigkeit und die Notwendigkeit einer robusten politischen Akzeptanz und Governance. Zukünftige Forschung und Politikgestaltung müssen sich diesen Herausforderungen widmen, um das volle Potenzial von Kohlenstoffpreismechanismen auszuschöpfen und sie effektiv in einen umfassenden und kohärenten Klimapolitikmix zu integrieren. Diese fortlaufende Evolution wird entscheidend sein, um die Transformation hin zu einer nachhaltigen, kohlenstoffarmen Wirtschaft zu beschleunigen.

## **Methodik**

Die vorliegende Masterarbeit verfolgt das Ziel, die Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Preissystemen als Instrumente des Klimaschutzes zu analysieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wird ein methodischer Ansatz gewählt, der eine Kombination aus einem fundierten Analyserahmen, sorgfältig ausgewählten Fallstudien, präzisen Datenerhebungs- und Messverfahren sowie robusten statistischen Methoden umfasst. Diese Methodik ist darauf ausgelegt, eine umfassende und evidenzbasierte Bewertung der untersuchten Systeme zu ermöglichen und gleichzeitig die Komplexität der kausalen Zusammenhänge im Bereich der Klimapolitik zu berücksichtigen. Die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Methodik ist dabei von höchster Bedeutung, um die Gültigkeit der Forschungsergebnisse zu gewährleisten.

## *2.1 Analyserahmen für die Klimaschutzwirkung*

Zur Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen wird ein mehrdimensionaler Analyserahmen herangezogen, der sowohl ökonomische als auch ökologische und politische Dimensionen berücksichtigt. Im Kern basiert dieser Rahmen auf der ökonomischen Theorie der Pigou-Steuer (Piga, 2003), die besagt, dass externe Kosten, wie sie durch Treibhausgasemissionen entstehen, durch eine entsprechende Abgabe internalisiert werden können. Dies schafft Anreize für Emittenten, ihre Emissionen zu reduzieren, um die Steuerlast zu minimieren. Im Kontext von Cap-and-Trade-Systemen, wie dem EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) oder dem kalifornischen Emissionshandel, wird dieser Anreiz durch die Knappheit der Emissionsberechtigungen und den daraus resultierenden Marktpreis (Ladaniwskyj, 2008) geschaffen. Der Preis für eine Tonne CO<sub>2</sub> fungiert dabei als Signal, das Investitionen in emissionsärmere Technologien und Prozesse fördert und gleichzeitig eine effiziente Allokation von Reduktionsmaßnahmen ermöglicht (Goulder et al., 2009).

Der Analyserahmen unterteilt die Klimaschutzwirkung in direkte und indirekte Effekte. Direkte Effekte umfassen die quantifizierbaren Reduktionen von Treibhausgasemissionen in den vom Preissystem abgedeckten Sektoren. Diese Reduktionen werden primär durch die Substitution fossiler Brennstoffe durch erneuerbare Energien, die Steigerung der Energieeffizienz in industriellen Prozessen und Gebäuden sowie durch technologische Innovationen erreicht, die durch den CO<sub>2</sub>-Preis rentabler werden (Kirchner et al., 2019). Die Messung dieser direkten Effekte erfordert eine detaillierte Analyse der Emissionsdaten der beteiligten Unternehmen und Sektoren im Zeitverlauf. Dabei ist es entscheidend, eine Baseline zu definieren und die tatsächlichen Emissionen mit einem Szenario ohne CO<sub>2</sub>-Preissystem zu vergleichen, um die kausale Wirkung zu isolieren.

Indirekte Effekte erstrecken sich über die unmittelbar regulierten Sektoren hinaus. Dazu gehören beispielsweise Spillover-Effekte auf nicht regulierte Sektoren durch Veränderungen in den Lieferketten oder durch die Verbreitung von emissionsmindernden Technologien. Auch die Förderung eines allgemeinen Bewusstseins für Klimaschutz und die Schaffung

eines politischen Rahmens, der weitere klimapolitische Maßnahmen begünstigt, fallen unter indirekte Effekte. Ein weiterer wichtiger indirekter Effekt ist die potenzielle Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, was nicht nur ökologische, sondern auch geostrategische Vorteile mit sich bringt. Die Analyse dieser indirekten Effekte ist methodisch anspruchsvoller und erfordert oft qualitative Bewertungen oder komplexere ökonometrische Modelle, die Interaktionen zwischen verschiedenen Sektoren und Politikbereichen abbilden können.

Ein zentraler Bestandteil des Analyserahmens ist die Berücksichtigung von Effizienz- und Verteilungswirkungen. Ein effizientes CO<sub>2</sub>-Preissystem sollte Emissionen dort reduzieren, wo dies am kostengünstigsten ist, um die Gesamtkosten des Klimaschutzes für die Gesellschaft zu minimieren (Tol, 2001). Die Verteilungswirkungen beziehen sich auf die Frage, welche Akteure (Haushalte, Unternehmen, bestimmte Industrien) die Kosten und Vorteile des Systems tragen. Hier spielen Faktoren wie die Allokationsmethode der Emissionsberechtigungen (z.B. Versteigerung versus kostenlose Zuteilung) (Goulder et al., 2009)(Mauer et al., 2020) und die Verwendung der Einnahmen aus dem Emissionshandel eine entscheidende Rolle. Potenziale für Carbon Leakage, also die Verlagerung von Emissionen in Regionen ohne vergleichbare CO<sub>2</sub>-Preissysteme, stellen eine wesentliche Herausforderung dar, die im Analyserahmen explizit berücksichtigt werden muss (Wettestad, 2023). Instrumente wie Grenzausgleichsmechanismen (Carbon Border Adjustment Mechanisms) sind darauf ausgelegt, dieses Risiko zu mindern (Wettestad, 2023).

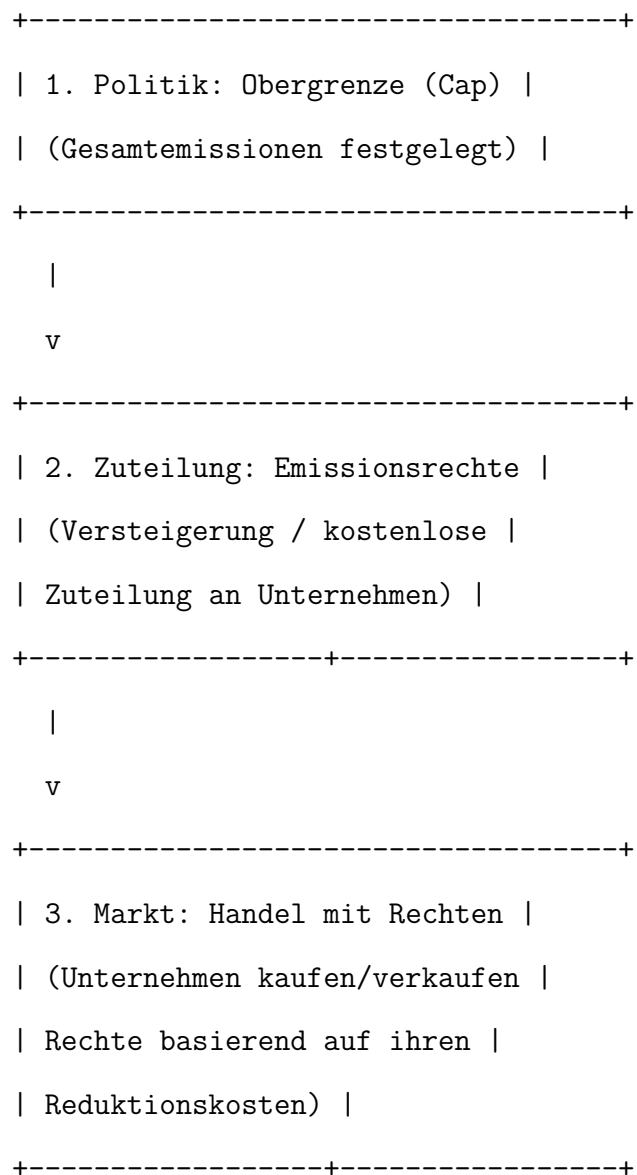
Darüber hinaus integriert der Analyserahmen die Perspektive der Politikwissenschaft, indem er die Governance-Strukturen, die politische Akzeptanz und die Adaptionfähigkeit der CO<sub>2</sub>-Preissysteme untersucht. Die Wirksamkeit eines Systems hängt nicht nur von seinem ökonomischen Design ab, sondern auch von seiner Fähigkeit, sich an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen und politische Unterstützung zu finden (Weishaar, 2014). Dies beinhaltet die Analyse von Revisionsprozessen, die Einführung von Marktstabilitätsreserven (Mauer et al., 2020) und die Reaktion auf externe Schocks. Der Analyserahmen ermöglicht somit

eine ganzheitliche Bewertung, die über reine Emissionsreduktionszahlen hinausgeht und die komplexen Wechselwirkungen zwischen Politik, Wirtschaft und Umwelt erfasst.

*Abbildung 1: Funktionsweise eines Cap-and-Trade-Systems*

Die folgende Abbildung veranschaulicht die grundlegende Funktionsweise eines Cap-and-Trade-Systems zur Emissionsreduktion. Sie zeigt die Interaktion zwischen der Festlegung einer Obergrenze, der Verteilung von Emissionsrechten und dem Handel auf dem Markt.

### Abbildung 1: Schematische Darstellung des Cap-and-Trade-Mechanismus



|  
v  
+-----+  
| 4. Emissionen: Reduktionsanreize |  
| (Preis schafft Anreiz zur |  
| kosteneffizienten Minderung) |  
+-----+

*Hinweis: Der Cap wird über die Zeit schrittweise gesenkt, um die Ambition der Emissionsreduktion zu erhöhen. Der Marktpreis der Rechte signalisiert die Knappheit und die Grenzkosten der Reduktion.*

## 2.2 Auswahlkriterien für Fallstudien

Die Untersuchung der Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Preissystemen erfolgt anhand von zwei ausgewählten Fallstudien: dem Europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS) und dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm. Die Auswahl dieser beiden Systeme ist methodisch begründet und basiert auf mehreren Kriterien, die eine aussagekräftige vergleichende Analyse ermöglichen. Ein Fallstudienansatz ist besonders geeignet, um die Komplexität und die spezifischen Kontextfaktoren jedes Systems detailliert zu erfassen und gleichzeitig allgemeingültige Erkenntnisse über die Funktionsweise und Herausforderungen von CO<sub>2</sub>-Preissystemen zu gewinnen.

Das erste zentrale Auswahlkriterium ist die **Reife und Langlebigkeit** der Systeme. Sowohl das EU ETS als auch das kalifornische Programm sind seit mehreren Jahren oder Jahrzehnten in Betrieb und haben verschiedene Phasen der Entwicklung und Anpassung durchlaufen. Das EU ETS, 2005 gestartet, ist das weltweit größte und älteste Emissionshandelssystem und hat sich als Pionier in der globalen Klimapolitik etabliert (Edwin & Josephine, 2023). Kaliforniens System, das 2013 eingeführt wurde, ist eines der größten regionalen Systeme in Nordamerika. Die lange Betriebszeit beider Systeme liefert eine um-

fangreiche Datenbasis und ermöglicht die Analyse langfristiger Trends sowie die Bewertung der Anpassungsfähigkeit an politische und ökonomische Veränderungen.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die **Vielfalt im Politikdesign**. Obwohl beide Systeme auf dem Cap-and-Trade-Prinzip basieren, weisen sie signifikante Unterschiede in ihrer Ausgestaltung auf, die für eine vergleichende Analyse aufschlussreich sind. Diese Unterschiede betreffen beispielsweise die anfängliche Allokation der Emissionsberechtigungen (Anteil kostenloser Zuteilung vs. Versteigerung) (Goulder et al., 2009)(Mauer et al., 2020), den Geltungsbereich der abgedeckten Sektoren (z.B. Einbeziehung des Transportsektors in Kalifornien), die Mechanismen zur Preisstabilität (z.B. Marktstabilitätsreserve im EU ETS (Mauer et al., 2020) versus Preisuntergrenze und -obergrenze in Kalifornien (Holt & Shobe, 2015)) sowie die Integration von Offsets. Diese Designunterschiede ermöglichen es, die Auswirkungen spezifischer politischer Entscheidungen auf die Wirksamkeit und Effizienz der Systeme zu untersuchen.

Die **geografische und ökonomische Diversität** der Fallstudien ist ebenfalls von Bedeutung. Die Europäische Union repräsentiert einen Verbund von 27 Mitgliedstaaten mit unterschiedlichen Wirtschaftsstrukturen, Energieinfrastrukturen und politischen Präferenzen. Kalifornien hingegen ist ein einzelner Bundesstaat mit einer der größten Volkswirtschaften der Welt, einer starken Innovationskraft und spezifischen Umweltzielen. Diese unterschiedlichen Kontexte bieten die Möglichkeit, zu untersuchen, wie CO<sub>2</sub>-Preissysteme in verschiedenen sozioökonomischen und politischen Umfeldern funktionieren und welche Anpassungen erforderlich sind.

Die **Verfügbarkeit von Daten** ist ein praktisches, aber entscheidendes Auswahlkriterium. Beide Fallstudien zeichnen sich durch eine hohe Transparenz und Zugänglichkeit relevanter Daten aus, einschließlich Emissionsberichten, Auktionsergebnissen, Preisen für Emissionsberechtigungen (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024) und Informationen über politische Anpassungen. Diese Datenzugänglichkeit ist unerlässlich, um die quantitativen Analysen durchführen zu können.

Schließlich sind beide Systeme aufgrund ihrer **globalen Relevanz und ihres Modellcharakters** von Interesse. Das EU ETS dient oft als Blaupause für die Entwicklung neuer Emissionshandelssysteme weltweit (Edwin & Josephine, 2023), und Kalifornien ist ein wichtiger Akteur in der subnationalen Klimapolitik und hat Verbindungen zu anderen Handelssystemen, wie dem in Quebec (Gao, 2024). Die Untersuchung dieser Systeme kann somit wertvolle Erkenntnisse für die Gestaltung und Verbesserung zukünftiger oder bestehender CO<sub>2</sub>-Preissysteme liefern.

Durch die sorgfältige Auswahl des EU ETS und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms können die Forschungsergebnisse nicht nur spezifische Einblicke in diese Systeme liefern, sondern auch verallgemeinerbare Schlussfolgerungen über die Bedingungen für den Erfolg von CO<sub>2</sub>-Preissystemen im Allgemeinen ermöglichen.

### *2.3 Datenquellen und Messverfahren*

Für eine umfassende Analyse der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen ist eine robuste und verlässliche Datenbasis von entscheidender Bedeutung. Die Datenerhebung für die Fallstudien (EU ETS und Kalifornien) erfolgt aus einer Vielzahl von primären und sekundären Quellen, um eine hohe Datenqualität und -validität zu gewährleisten. Die verwendeten Messverfahren sind darauf ausgelegt, die relevanten Indikatoren für Emissionen, Preise, wirtschaftliche Aktivität und politische Rahmenbedingungen präzise zu erfassen.

**2.3.1 Emissionsdaten** Die primäre Datengrundlage bilden die verifizierten Treibhausgasemissionen der von den jeweiligen Systemen erfassten Anlagen und Sektoren. \* **EU ETS:** Emissionsdaten werden aus dem Europäischen Unionsregister (Union Registry) und den jährlichen Berichten der Europäischen Umweltagentur (EUA) bezogen. Diese Daten umfassen verifizierte Emissionen aus Kraftwerken, energieintensiven Industrien und seit 2012 auch aus dem Luftverkehr. Die EUA veröffentlicht aggregierte Daten und detaillierte Informationen auf Anlagenebene, die eine retrospektive Analyse über den gesamten Zeitraum des EU ETS hinweg ermöglichen (Edwin & Josephine, 2023). \* **Kalifornisches Cap-and-**

**Trade-Programm:** Die California Air Resources Board (CARB) veröffentlicht umfassende Emissionsberichte für alle abgedeckten Sektoren, einschließlich Industrie, Stromerzeugung und Transport. Diese Daten sind über die CARB-Website öffentlich zugänglich und bieten detaillierte Informationen zu verifizierten Emissionen der einzelnen Emittenten.

Die Emissionsdaten werden in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent (tCO<sub>2</sub>e) gemessen und ermöglichen die Analyse von absoluten Emissionsreduktionen sowie der Emissionsintensität (Emissionen pro Einheit der Wirtschaftsleistung). Für die Vergleichbarkeit werden die Daten über einen konsistenten Zeitraum gesammelt, typischerweise von der Einführung des jeweiligen Systems bis zum aktuellsten verfügbaren Berichtsjahr.

**2.3.2 Preise für Emissionsberechtigungen** Die Preisentwicklung der Emissionsberechtigungen ist ein Schlüsselindikator für die Marktdynamik und die Anreizwirkung der CO<sub>2</sub>-Preissysteme. \* **EU ETS (EUAs):** Historische Preise für EU-Emissionsberechtigungen (EUAs) werden von spezialisierten Finanzdatenanbietern (z.B. ICE Endex, EEX) sowie aus akademischen Studien und Marktanalysen bezogen (Ladaniwskyj, 2008)(Dittmann et al., 2024). Diese Daten umfassen Spot- und Futures-Preise und ermöglichen die Analyse von Preisvolatilität, Preistreibern und der Reaktion des Marktes auf politische Ankündigungen (Dittmann et al., 2024). \* **Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm (CCAs):** Preise für California Carbon Allowances (CCAs) werden ebenfalls von der ICE (Intercontinental Exchange) und dem CARB veröffentlicht. Dies umfasst Auktionsergebnisse und Sekundärmarktpreise.

Die Preisdaten werden monatlich oder wöchentlich erhoben, um kurz- und mittelfristige Preistrends zu identifizieren.

**2.3.3 Wirtschaftsdaten und Kontextindikatoren** Um die Klimaschutzwirkung von anderen Einflussfaktoren zu isolieren, werden verschiedene sozioökonomische und kontextbezogene Daten erhoben: \* **Wirtschaftliche Aktivität:** Bruttoinlandsprodukt (BIP) und Industrieproduktionsindizes werden von Eurostat für die EU-Mitgliedstaaten und vom Bureau of Economic Analysis (BEA) für Kalifornien bezogen. Diese Daten dienen als Kon-

trollvariablen, um den Einfluss von Konjunkturzyklen auf Emissionen zu berücksichtigen.

\* **Energiedaten:** Daten zum Energieverbrauch, zur Energieerzeugung (nach Brennstoffarten) und zu Energiepreisen (z.B. Gas-, Kohle-, Strompreise) werden von Eurostat, der Internationalen Energieagentur (IEA) und der U.S. Energy Information Administration (EIA) gesammelt. Diese sind entscheidend, um den Einfluss von Brennstoffwechseln und Energieeffizienzmaßnahmen zu bewerten. \* **Technologische Entwicklung:** Indikatoren wie Patente im Bereich erneuerbare Energien oder Energieeffizienztechnologien können aus Datenbanken wie der EPO Worldwide Patent Statistical Database (PATSTAT) oder der WIPO Global Innovation Index bezogen werden, um den Innovationsanreiz der CO<sub>2</sub>-Preissysteme zu beurteilen. \* **Politische Kontextdaten:** Informationen über relevante klimapolitische Maßnahmen außerhalb des Emissionshandels (z.B. Förderprogramme für erneuerbare Energien, Effizienzstandards) werden aus Regierungsberichten, Gesetzestexten und wissenschaftlicher Literatur gesammelt (Kirchner et al., 2019). Diese dienen als Kontrollvariablen, um die Synergien oder Konflikte zwischen verschiedenen Politikfeldern zu analysieren.

**2.3.4 Datenaufbereitung und -validierung** Nach der Datenerhebung erfolgt eine umfassende Datenaufbereitung. Dies umfasst die Harmonisierung von Zeiteinheiten, die Normalisierung von Datenreihen und die Behandlung fehlender Werte mittels geeigneter Imputationsmethoden (z.B. lineare Interpolation, Mittelwertbildung). Die Datenvalidierung beinhaltet die Überprüfung auf Ausreißer, Inkonsistenzen und Plausibilität, um die Zuverlässigkeit der Analysen zu gewährleisten. Alle Daten werden in einer relationalen Datenbank strukturiert, um eine effiziente Verwaltung und Analyse zu ermöglichen. Die Zeitreihenanalyse erfordert oft die Überprüfung auf Stationarität, um die Gültigkeit der statistischen Modelle zu gewährleisten.

## *2.4 Statistische Methoden zur Wirksamkeitsanalyse*

Zur Bestimmung der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen werden verschiedene statistische und ökonometrische Methoden angewendet, die darauf abzielen, kausale Zusam-

menhänge zu identifizieren und den Einfluss von Störvariablen zu kontrollieren. Die Komplexität der Untersuchung erfordert einen methodischen Mix, um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen und verschiedene Aspekte der Wirksamkeit zu beleuchten.

**2.4.1 Panel-Regressionsanalyse** Die Panel-Regressionsanalyse ist eine zentrale Methode, da sie die gleichzeitige Betrachtung von Zeitreihen- und Querschnittsdaten ermöglicht. Für das EU ETS können beispielsweise die 27 Mitgliedstaaten als Querschnittseinheiten über den gesamten Zeitraum des Emissionshandels analysiert werden. Für Kalifornien kann eine Analyse auf Sektorebene (z.B. Stromerzeugung, Industrie) über die Zeit durchgeführt werden. Diese Methode erlaubt es, unbeobachtete, zeitinvariante Effekte (z.B. spezifische geografische oder institutionelle Merkmale) sowie zeitlich variierende, aber über alle Einheiten konstante Effekte (z.B. globale Wirtschaftskrisen) zu kontrollieren.

Die grundlegende Modellformulierung könnte wie folgt aussehen:  $E_{it} = \beta_0 + \beta_1 P_{it} + \beta_2 X_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \epsilon_{it}$  Wobei: \*  $E_{it}$  die Emissionen der Einheit  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  darstellt. \*  $P_{it}$  den CO2-Preis der Einheit  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  repräsentiert. \*  $X_{it}$  einen Vektor von Kontrollvariablen (z.B. BIP, Energiepreise, Industrieproduktion, Anteil erneuerbarer Energien) darstellt. \*  $\alpha_i$  ein einheitsspezifischer fester Effekt (Fixed Effect) ist, der unbeobachtete Heterogenität erfasst. \*  $\gamma_t$  ein zeitspezifischer fester Effekt ist, der gemeinsame zeitliche Trends erfasst. \*  $\epsilon_{it}$  der Fehlerterm ist.

Der Koeffizient  $\beta_1$  ist dabei von besonderem Interesse, da er die geschätzte Wirkung des CO2-Preises auf die Emissionen angibt. Die Verwendung von Fixed Effects hilft, Endogenitätsprobleme zu mindern, die entstehen könnten, wenn unbeobachtete Faktoren sowohl den CO2-Preis als auch die Emissionen beeinflussen. Robuste Standardfehler werden verwendet, um Heteroskedastizität und Autokorrelation zu berücksichtigen.

**2.4.2 Differenz-in-Differenzen (DiD)-Ansatz** Um die kausale Wirkung von Politikänderungen oder der Einführung des CO2-Preissystems besser zu isolieren, kann ein DiD-Ansatz angewendet werden. Dies ist besonders nützlich, wenn eine klare Trennung zwischen einer "Behandlungsgruppe" (z.B. Sektoren, die unter das ETS fallen) und einer

“Kontrollgruppe” (z.B. Sektoren, die nicht unter das ETS fallen, oder Regionen ohne ETS) möglich ist. Der DiD-Ansatz vergleicht die Veränderung der Emissionen in der Behandlungsgruppe vor und nach der Einführung des Preissystems mit der Veränderung in der Kontrollgruppe über denselben Zeitraum. Die Annahme der parallelen Trends muss dabei sorgfältig geprüft werden.

**2.4.3 Zeitreihenanalyse** Für die Analyse der Dynamik zwischen CO<sub>2</sub>-Preisen, Emissionen und anderen makroökonomischen Variablen können Zeitreihenmodelle wie autoregressive integrierte gleitende Durchschnitte (ARIMA) oder Vektorautoregressive (VAR) Modelle eingesetzt werden. Diese Modelle sind besonders geeignet, um kurz- und mittelfristige Auswirkungen sowie die Richtung von Kausalitäten (z.B. Granger-Kausalität) zu untersuchen (Li & Zhao, 2025). Die Analyse von Schockreaktionen (Impulse Response Functions) innerhalb eines VAR-Modells kann Aufschluss darüber geben, wie Emissionen auf einen Schock im CO<sub>2</sub>-Preis reagieren.

**2.4.4 Event-Studien** Um die Auswirkungen spezifischer politischer Ereignisse (z.B. Einführung der Marktstabilitätsreserve im EU ETS (Mauer et al., 2020), Änderungen der Obergrenze, Verknüpfung von Handelssystemen (Gao, 2024)) auf die Preise der Emissionsberechtigungen und die Emissionen zu analysieren, werden Event-Studien durchgeführt. Hierbei wird die Anomalie der Preis- oder Emissionsentwicklung um den Zeitpunkt des Ereignisses herum untersucht, um die kurzfristige Marktreaktion zu bewerten.

**2.4.5 Robuste Überprüfungen und Sensitivitätsanalysen** Um die Validität der Ergebnisse zu gewährleisten, werden umfangreiche Robustheitsüberprüfungen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dies umfasst: \* **Alternative Modellspezifikationen:** Die Verwendung verschiedener Kombinationen von Kontrollvariablen oder die Berücksichtigung von Nichtlinearitäten. \* **Alternative Schätzmethoden:** Beispielsweise die Verwendung von Random Effects statt Fixed Effects, falls dies durch einen Hausman-Test gerechtfertigt ist, oder die Anwendung von Generalized Method of Moments (GMM) für dynamische Panelmodelle. \* **Alternative Definitionen der abhängigen Variablen:** Zum Beispiel die Analyse

der Emissionsintensität anstelle der absoluten Emissionen. \* **Subgruppenanalysen:** Die Untersuchung der Wirkung in spezifischen Sektoren oder Ländern, um Heterogenitäten in der Wirkung aufzudecken.

Alle statistischen Analysen werden mit spezialisierter Software durchgeführt (z.B. R, Stata oder Python), um die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt stets unter Berücksichtigung der spezifischen Designmerkmale jedes CO<sub>2</sub>-Preissystems und der potenziellen Limitationen der gewählten statistischen Methoden. Die Integration dieser vielfältigen statistischen Methoden ermöglicht eine nuancierte und umfassende Bewertung der Klimaschutzwirkung des EU ETS und des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms. Sie trägt dazu bei, die Komplexität der realen Welt abzubilden und fundierte Schlussfolgerungen für die Klimapolitik abzuleiten.

## Analyse

Die vorliegende Analyse widmet sich der detaillierten Untersuchung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen als zentralem Instrument der Klimapolitik. Ziel ist es, die Funktionsweise, Effektivität und Herausforderungen dieser marktgestützten Mechanismen umfassend darzulegen. Hierbei wird ein besonderer Fokus auf die empirischen Belege für Emissionsreduktionen, die komplexen Dynamiken der Preisgestaltung und Marktmechanismen sowie auf konkrete Fallstudien global etablierter Systeme gelegt. Darüber hinaus erfolgt ein kritischer Vergleich des CO<sub>2</sub>-Handels mit alternativen Klimaschutzinstrumenten, um dessen relative Stärken und Schwächen im Kontext eines kohärenten klimapolitischen Instrumentenmixes zu beleuchten. Die umfassende Betrachtung dieser Aspekte ist entscheidend, um die Rolle des CO<sub>2</sub>-Handels bei der Erreichung ambitionierter Klimaziele zu bewerten und zukünftige Politikempfehlungen abzuleiten. Die Analyse stützt sich auf eine breite Palette wissenschaftlicher Literatur, die sowohl theoretische Konzepte als auch praktische Implementierungserfahrungen und deren Auswirkungen umfasst.

Einleitung in die Analyse der CO<sub>2</sub>-Handelssysteme: CO<sub>2</sub>-Handelssysteme, oft als Cap-and-Trade-Systeme bezeichnet, stellen einen Eckpfeiler moderner Klimapolitik dar, der darauf abzielt, Treibhausgasemissionen durch marktwirtschaftliche Anreize zu reduzieren. Im Kern dieser Systeme steht die Festlegung einer Obergrenze (Cap) für die Gesamtemissionen eines bestimmten Sektors oder einer Volkswirtschaft. Innerhalb dieses Caps werden Emissionsberechtigungen ausgegeben, die von den Emittenten erworben und gehandelt werden können. Der Preis für diese Berechtigungen bildet einen direkten Anreiz zur Emissionsreduktion: Unternehmen, die ihre Emissionen kostengünstiger senken können, verkaufen überschüssige Berechtigungen, während Unternehmen mit höheren Reduktionskosten zusätzliche Berechtigungen erwerben. Dieser Mechanismus fördert die Kosteneffizienz bei der Erreichung der Emissionsziele, da Reduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind. Die Konzeption von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen geht auf das Pigou-Konzept der externen Kosteninternalisierung zurück (Piga, 2003), welches besagt, dass Umweltverschmutzung einen Preis erhalten sollte, um die sozialen Kosten zu reflektieren.

Die Einführung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen ist jedoch mit erheblichen Komplexitäten verbunden, die sich aus der Notwendigkeit ergeben, einen funktionierenden Markt zu schaffen, der sowohl ökologische Wirksamkeit als auch ökonomische Effizienz gewährleistet. Fragen der anfänglichen Zuteilung von Emissionsberechtigungen – sei es durch Auktionierung oder kostenlose Zuteilung – sind entscheidend für die Verteilungswirkungen und die Akzeptanz des Systems (Goulder et al., 2009). Darüber hinaus sind die Gestaltung von Marktstabilitätsmechanismen, die Vermeidung von Carbon Leakage und die Integration mit anderen Klimaschutzinstrumenten zentrale Herausforderungen, die in der Praxis unterschiedlich gehandhabt werden. Die vorliegende Analyse gliedert sich in mehrere Hauptabschnitte, die diese vielschichtigen Aspekte beleuchten. Zunächst wird die theoretische Grundlage und die empirische Evidenz für Emissionsreduktionen durch CO<sub>2</sub>-Handelssysteme erörtert. Anschließend werden die Mechanismen der Preisgestaltung und die Faktoren, die die Marktpreise beeinflussen, detailliert untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil der Analyse sind umfassende

Fallstudien des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS), des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms und des chinesischen nationalen Emissionshandelssystems, die die Vielfalt der Implementierungsansätze und die daraus resultierenden Erfahrungen aufzeigen. Schließlich erfolgt ein kritischer Vergleich des CO<sub>2</sub>-Handels mit anderen Klimaschutzinstrumenten, um die Synergien und Komplementaritäten innerhalb eines umfassenden klimapolitischen Rahmens zu identifizieren (Kirchner et al., 2019). Diese Struktur ermöglicht eine fundierte Bewertung der Wirksamkeit und Rolle von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen im globalen Kampf gegen den Klimawandel.

## **1. Emissionsreduktionen durch CO<sub>2</sub>-Handel**

Die primäre Zielsetzung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen besteht in der effektiven und kosteneffizienten Reduktion von Treibhausgasemissionen. Der Mechanismus, der diese Reduktionen bewirken soll, ist das sogenannte Cap-and-Trade-Prinzip. Hierbei wird eine absolute Obergrenze (Cap) für die gesamten Emissionen der erfassten Sektoren festgelegt, die im Laufe der Zeit schrittweise abgesenkt wird. Jede Emissionsberechtigung erlaubt die Emission einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Da die Gesamtmenge der Berechtigungen begrenzt ist und mit der Zeit abnimmt, entsteht eine Knappheit, die den Berechtigungen einen Preis verleiht. Dieser Preis bildet den Anreiz für Unternehmen, in Emissionsminderungsmaßnahmen zu investieren, um Kosten zu sparen. Unternehmen, die ihre Emissionen unter ihre zugeteilten oder erworbenen Berechtigungen senken können, haben die Möglichkeit, überschüssige Berechtigungen zu verkaufen und somit zusätzliche Einnahmen zu generieren. Umgekehrt müssen Unternehmen, deren Reduktionskosten hoch sind oder die keine ausreichenden Reduktionen erzielen können, zusätzliche Berechtigungen auf dem Markt kaufen. Dieser Handel führt dazu, dass Emissionsreduktionen dort realisiert werden, wo sie am kostengünstigsten sind, was die Gesamtkosten der Emissionsminderung für die Volkswirtschaft minimiert (Goulder et al., 2009).

Die Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen bei der Erzielung von Emissionsreduktionen hängt maßgeblich von der Ausgestaltung des Caps ab. Ein zu hoch angesetztes Cap oder eine zu langsame Absenkung kann zu einem Überangebot an Berechtigungen führen, was den Preis senkt und den Anreiz zur Reduktion mindert. Dies war eine der zentralen Herausforderungen in den frühen Phasen des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS) (Edwin & Josephine, 2023)(Ladaniwskyj, 2008). Umgekehrt kann ein zu aggressives Cap zu übermäßig hohen Preisen führen, die die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen beeinträchtigen und zu Carbon Leakage führen könnten, d.h., der Verlagerung von Emissionen in Länder ohne vergleichbare Klimapolitik (Wettestad, 2023). Daher ist die Kalibrierung des Caps ein fortlaufender politischer Prozess, der eine sorgfältige Abwägung zwischen ökologischer Ambition und ökonomischer Machbarkeit erfordert.

Empirische Studien haben die Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen bei der Reduktion von Emissionen in verschiedenen Kontexten belegt. Das EU ETS, als das größte und am längsten bestehende System weltweit, hat seit seiner Einführung im Jahr 2005 zu signifikanten Emissionsminderungen im erfassten Sektor geführt (Edwin & Josephine, 2023). Zwischen 2005 und 2020 sanken die Emissionen der vom EU ETS erfassten Anlagen um etwa 35% (Edwin & Josephine, 2023). Diese Reduktionen sind nicht allein auf das ETS zurückzuführen, sondern auch auf andere Faktoren wie die Wirtschaftskrise 2008 und den Ausbau erneuerbarer Energien. Dennoch wird dem ETS ein wesentlicher Beitrag zugeschrieben, insbesondere in den Phasen, in denen der Kohlenstoffpreis ausreichend hoch war, um Investitionen in emissionsärmere Technologien zu stimulieren (Dittmann et al., 2024). Studien zeigen, dass der Kohlenstoffpreis eine klare Wirkung auf die Investitionsentscheidungen und die Betriebsweise von Kraftwerken hatte, indem er den Einsatz von Kohle zugunsten von Gas oder erneuerbaren Energien unattraktiver machte.

Die direkten Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Preises auf die Produktionsentscheidungen von Unternehmen sind ein Kernaspekt der Emissionsreduktion. Angesichts eines steigenden CO<sub>2</sub>-Preises sind Unternehmen gezwungen, ihre Produktionsprozesse zu überdenken und in

emissionsmindernde Technologien zu investieren. Dies kann die Umstellung auf effizientere Maschinen, die Nutzung alternativer, emissionsarmer Brennstoffe oder die Implementierung von Prozessen zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) umfassen. Der Handel mit Berechtigungen stellt sicher, dass diese Investitionen dort getätigt werden, wo sie die größte marginale Emissionsminderung pro investiertem Euro erzielen. Dies führt zu einer dynamischen Effizienz, bei der Innovationen gefördert werden, die langfristig zu noch kostengünstigeren Reduktionen führen. Ein Beispiel hierfür ist die verstärkte Forschung und Entwicklung im Bereich der Wasserstofftechnologien oder der direkten Luftabscheidung, die durch den Anreiz eines stabilen und hohen Kohlenstoffpreises beschleunigt werden (Flieger, 2013).

Die Effizienz des Cap-and-Trade-Ansatzes liegt in seiner Fähigkeit, ein vorgegebenes Emissionsziel zu den geringstmöglichen Gesamtkosten zu erreichen. Im Gegensatz zu Command-and-Control-Ansätzen, die spezifische Technologien vorschreiben oder einheitliche Reduktionsziele für alle Emittenten festlegen, ermöglicht der CO<sub>2</sub>-Handel jedem Unternehmen, seinen eigenen optimalen Reduktionspfad zu wählen. Dies berücksichtigt die heterogenen Kostenstrukturen und technologischen Möglichkeiten innerhalb der verschiedenen Sektoren. Unternehmen mit niedrigen Reduktionskosten werden mehr reduzieren und Berechtigungen verkaufen, während Unternehmen mit hohen Reduktionskosten weniger reduzieren und Berechtigungen kaufen. Dieses Zusammenspiel sorgt für eine Allokation der Reduktionslast, die gesamtwirtschaftlich effizient ist. Allerdings ist die theoretische Effizienz in der Praxis oft durch politische Kompromisse, administrative Komplexitäten und Marktunvollkommenheiten eingeschränkt. So können beispielsweise Lobbyinteressen zu einer übermäßigen Zuteilung von kostenlosen Berechtigungen führen, was den Markt verzerrt und den Preisanreiz schwächt.

Die langfristige Wirkung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen auf die Klimaschutzwirkung hängt auch von der Glaubwürdigkeit und Stabilität des politischen Rahmens ab. Unsicherheit über zukünftige Caps, Zuteilungsregeln oder die Implementierung von Marktstabilitätsmechanismen kann Investitionen in emissionsarme Technologien hemmen. Ein stabiles und vorherse-

hbares politisches Umfeld ist entscheidend, um Unternehmen die nötige Planungssicherheit für langfristige Investitionen zu geben. Die Reformen des EU ETS, insbesondere die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) (Edwin & Josephine, 2023) und die ambitioniertere Absenkung des Caps im Rahmen des “Fit for 55”-Pakets, sind Beispiele für Bemühungen, die Glaubwürdigkeit des Systems zu stärken und seine Wirksamkeit zu erhöhen. Diese Maßnahmen zielen darauf ab, ein strukturelles Überangebot an Berechtigungen zu reduzieren und den Kohlenstoffpreis auf einem Niveau zu stabilisieren, das nachhaltige Emissionsreduktionen fördert. Die Anpassung des Caps an neue Klimaziele, wie die verstärkte Reduktionsverpflichtung der EU bis 2030, demonstriert die politische Entschlossenheit, das System als primäres Instrument zur Dekarbonisierung zu nutzen.

Ein weiterer Aspekt der Emissionsreduktionen durch CO<sub>2</sub>-Handel ist die Rolle von Offsets und externen Projekten. Einige Handelssysteme erlauben es Unternehmen, einen Teil ihrer Emissionsverpflichtungen durch den Kauf von Emissionsgutschriften aus Klimaschutzprojekten außerhalb des Handelssystems zu erfüllen, beispielsweise aus Projekten in Entwicklungsländern (wie im Rahmen des Clean Development Mechanism des Kyoto-Protokolls). Während diese Offsets das Potenzial haben, die Gesamtkosten der Emissionsminderung zu senken und Technologietransfer zu fördern (Janikowski et al., 1994), bergen sie auch Risiken hinsichtlich der Zusätzlichkeit (d.h., ob die Reduktionen auch ohne das Offset-Projekt stattgefunden hätten) und der dauerhaften Sicherstellung der Reduktionen. Eine sorgfältige Überprüfung und strenge Qualitätsstandards sind daher unerlässlich, um die Integrität des Handelssystems zu wahren und sicherzustellen, dass die gekauften Offsets tatsächlich zu realen und messbaren Emissionsminderungen führen (Coskun & Zöller, 2017). Die Nutzung solcher Mechanismen ist ein Balanceakt zwischen Kosteneffizienz und ökologischer Integrität.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass CO<sub>2</sub>-Handelssysteme das Potenzial haben, signifikante Emissionsreduktionen auf kosteneffiziente Weise zu erzielen. Ihre tatsächliche Wirksamkeit wird jedoch durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter die Ambition und Stabilität des Caps, die Ausgestaltung der Zuteilungsregeln, das Vorhandensein

von Marktstabilitätsmechanismen und die Integration in einen breiteren klimapolitischen Rahmen. Die empirischen Belege aus Systemen wie dem EU ETS zeigen, dass unter den richtigen Bedingungen und mit kontinuierlicher Anpassung an neue Herausforderungen, der CO<sub>2</sub>-Handel ein mächtiges Instrument zur Erreichung von Klimazielen sein kann. Die fortlaufende Weiterentwicklung und Stärkung dieser Systeme ist entscheidend, um die globalen Emissionsreduktionsziele zu erreichen und den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu beschleunigen.

## **2. Preisgestaltung und Marktmechanismen**

Die Preisgestaltung von Emissionsberechtigungen ist das Herzstück eines jeden CO<sub>2</sub>-Handelssystems, da der Preis das zentrale Signal für Investitionen in Emissionsminderungstechnologien darstellt und die Kosteneffizienz des Systems bestimmt. Der Preis einer Emissionsberechtigung wird durch das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage auf dem Markt bestimmt. Das Angebot wird primär durch das festgelegte Cap, die anfängliche Zuteilung (Auktionierung vs. kostenlose Zuteilung) und die Verfügbarkeit von Offsets oder anderen flexiblen Mechanismen beeinflusst. Die Nachfrage wird wiederum von den Emissionsniveaus der erfassten Unternehmen, deren Grenzkosten der Emissionsminderung, den Energiepreisen und makroökonomischen Bedingungen bestimmt. Ein tieferes Verständnis dieser Dynamiken ist entscheidend, um die Effektivität und Stabilität von CO<sub>2</sub>-Märkten zu gewährleisten.

Die anfängliche Zuteilung der Berechtigungen hat weitreichende Implikationen für die Preisbildung und die Verteilungswirkungen. Eine kostenlose Zuteilung, die oft in frühen Phasen von Handelssystemen verwendet wird, kann als eine Form der Subventionierung für die betroffenen Unternehmen wirken und die Akzeptanz des Systems erhöhen. Sie kann jedoch auch zu Überallokation führen, insbesondere wenn die Zuteilung auf historischen Emissionsdaten basiert, die nicht die tatsächlichen Reduktionspotenziale abbilden. Dies kann ein strukturelles Überangebot an Berechtigungen schaffen, den Preis drücken und

somit den Anreiz zur Emissionsreduktion mindern. Die Auktionierung hingegen, bei der die Berechtigungen von den Unternehmen ersteigert werden müssen, generiert Einnahmen für den Staat und stellt sicher, dass der Preis tatsächlich die Knappheit der Berechtigungen widerspiegelt. Sie kann jedoch in der Anfangsphase auf Widerstand stoßen, da sie die Kosten für die Unternehmen direkt erhöht (Goulder et al., 2009). Das EU ETS hat im Laufe seiner Phasen einen Übergang von überwiegend kostenloser Zuteilung zu einer zunehmenden Auktionierung vollzogen, um die Markteffizienz und die fiskalischen Einnahmen zu verbessern.

Die Preisvolatilität ist eine inhärente Eigenschaft von CO<sub>2</sub>-Märkten, da sie auf eine Vielzahl von externen Schocks reagieren. Wirtschaftliche Abschwünge, wie die Finanzkrise 2008 oder die COVID-19-Pandemie, führen zu einem Rückgang der industriellen Produktion und damit zu einer geringeren Nachfrage nach Emissionsberechtigungen, was die Preise fallen lässt. Umgekehrt können Phasen starken Wirtschaftswachstums oder kalte Winter die Nachfrage nach Berechtigungen erhöhen und die Preise steigen lassen. Auch Änderungen in den Preisen für fossile Brennstoffe, insbesondere Gas und Kohle, beeinflussen die Grenzkosten der Stromerzeugung und somit die Nachfrage nach Emissionsberechtigungen im Stromsektor. Wenn beispielsweise Gaspreise sinken, wird die Stromerzeugung aus Gaskraftwerken gegenüber Kohlekraftwerken attraktiver, was zu einem geringeren Bedarf an Berechtigungen führt, da Gaskraftwerke weniger CO<sub>2</sub> pro erzeugter Kilowattstunde emittieren als Kohlekraftwerke (Dittmann et al., 2024).

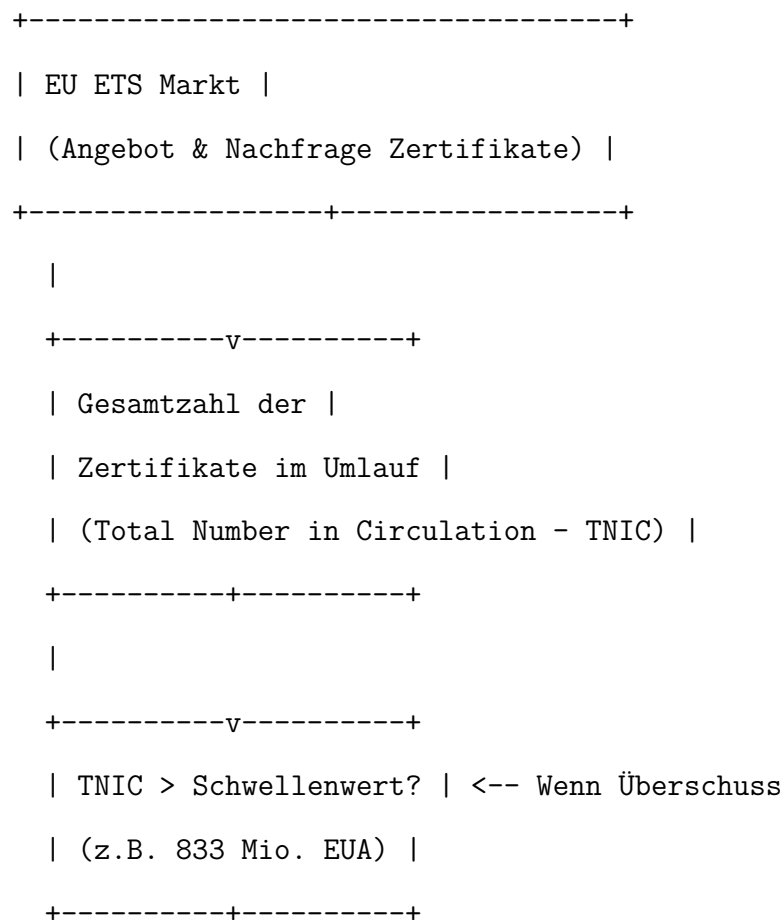
Um die Preisvolatilität zu mindern und einen stabilen Preisanreiz für Investitionen in Klimaschutz zu gewährleisten, wurden in verschiedenen CO<sub>2</sub>-Handelssystemen Marktstabilitätsmechanismen implementiert. Das prominenteste Beispiel hierfür ist die Marktstabilitätsreserve (MSR) des EU ETS, die 2019 eingeführt wurde (Edwin & Josephine, 2023). Die MSR reagiert auf ein Überangebot an Berechtigungen, indem sie einen Teil der nicht zugeteilten Berechtigungen in eine Reserve verschiebt oder aus dem Markt nimmt, wenn eine bestimmte Schwelle des kumulierten Überhangs überschritten wird. Umgekehrt kann die MSR Berechtigungen freigeben, wenn der Markt zu knapp wird. Dieser Mechanismus soll

das strukturelle Überangebot, das sich in den früheren Phasen des EU ETS aufgebaut hatte, abbauen und zukünftige Überschüsse verhindern, um einen robusteren und vorhersehbareren Kohlenstoffpreis zu gewährleisten. Die MSR hat maßgeblich dazu beigetragen, dass die Preise im EU ETS in den letzten Jahren gestiegen und stabiler geworden sind, was wiederum die Anreize für Dekarbonisierung verstärkt hat.

*Abbildung 2: Funktionsweise der Marktstabilitätsreserve (MSR) im EU ETS*

Die Marktstabilitätsreserve (MSR) ist ein zentraler Mechanismus zur Steuerung des Angebots an Emissionszertifikaten im EU ETS, um Preisvolatilität zu reduzieren und die Wirksamkeit des Systems zu erhöhen.

## Abbildung 2: Schematische Darstellung der Marktstabilitätsreserve im EU ETS



```

| Ja
v
+-----+
| MSR: Zertifikate entziehen |
| (Teil der Überschüsse wird in |
| Reserve verschoben oder gelöscht) |
+-----+
|
v
+-----+
| TNIC < Schwellenwert? | <-- Wenn Knappheit
| (z.B. 400 Mio. EUA) |
+-----+-----+
| Ja
v
+-----+
| MSR: Zertifikate freigeben |
| (Zertifikate aus Reserve werden |
| wieder auf den Markt gebracht) |
+-----+

```

*Hinweis: Die MSR dient dazu, strukturelle Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage auszugleichen und einen stabilen Kohlenstoffpreis zu fördern, der Investitionen in klimafreundliche Technologien unterstützt.*

Andere Systeme haben alternative Mechanismen zur Preisstabilisierung eingeführt, wie beispielsweise Preisuntergrenzen (Price Floors) und Preisobergrenzen (Price Ceilings) oder sogenannte “Price Collars”. Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das System im US-Bundesstaat Washington verwenden beispielsweise einen Auktionsreservationspreis

(Auction Reserve Price), der als Preisuntergrenze fungiert und sicherstellt, dass Berechtigungen nicht unter einem bestimmten Niveau gehandelt werden. Dies schützt vor extrem niedrigen Preisen, die den Anreiz zur Reduktion eliminieren könnten (Holt & Shobe, 2015). Eine Preisobergrenze hingegen setzt einen maximalen Preis fest, den Berechtigungen erreichen dürfen, typischerweise durch die Bereitstellung zusätzlicher Berechtigungen aus einer Reserve, wenn der Preis ein bestimmtes Niveau überschreitet. Dies soll übermäßige Kosten für Unternehmen verhindern und die politische Akzeptanz des Systems erhöhen, kann aber auch die ökologische Ambition untergraben, wenn das Cap nicht eingehalten wird. Die Kombination von Preisunter- und -obergrenzen, ein sogenannter “Price Collar” (Holt & Shobe, 2015), bietet eine Balance zwischen Preisstabilität und Flexibilität, indem sie einen Preiskorridor schafft, innerhalb dessen der Markt operieren kann.

Die Rolle von Finanzakteuren und Spekulation auf dem CO<sub>2</sub>-Markt ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Preisgestaltung. Wie bei anderen Rohstoffmärkten können Investoren und Spekulanten Berechtigungen kaufen und verkaufen, um von zukünftigen Preisbewegungen zu profitieren. Während diese Aktivitäten zur Liquidität des Marktes beitragen und Preisentdeckungsmechanismen verbessern können, bergen sie auch das Potenzial für übermäßige Volatilität und die Entkopplung der Preise von den fundamentalen Emissionsreduktionskosten. Regulatorische Maßnahmen, wie die Begrenzung von Positionen oder die Überwachung von Handelsaktivitäten, können eingesetzt werden, um exzessive Spekulation zu verhindern und die Integrität des Marktes zu schützen. Die detaillierte Analyse der Preistreiber im EU ETS durch Dittmann, Lauter et al. (Dittmann et al., 2024) zeigt die Komplexität der Faktoren auf, die den Preis von Kohlenstoffberechtigungen bestimmen, darunter Energiepreise, makroökonomische Indikatoren und politische Entscheidungen.

Die Einnahmen aus der Auktionierung von Emissionsberechtigungen können eine wichtige Finanzierungsquelle für Klimaschutzmaßnahmen und die Anpassung an den Klimawandel darstellen. Viele Systeme, darunter das EU ETS, verwenden einen Teil dieser Einnahmen zur Unterstützung von Innovationen in kohlenstoffarmen Technologien, zur

Förderung erneuerbarer Energien oder zur Unterstützung von Haushalten und Unternehmen bei der Energiewende. Dies kann die Akzeptanz des Systems weiter erhöhen und zu einer gerechteren Verteilung der Lasten beitragen. Die Transparenz bei der Verwendung dieser Einnahmen ist entscheidend, um die öffentliche Unterstützung für CO<sub>2</sub>-Handelssysteme zu sichern und sicherzustellen, dass die generierten Mittel tatsächlich im Sinne des Klimaschutzes eingesetzt werden.

Zusammenfassend ist die Preisgestaltung in CO<sub>2</sub>-Handelssystemen ein komplexes Zusammenspiel aus politischen Entscheidungen über das Cap und die Zuteilung, makroökonomischen Bedingungen, Energiepreisen und Marktmechanismen. Die Implementierung von Stabilitätsmechanismen wie der MSR oder Preisunter- und -obergrenzen ist entscheidend, um einen stabilen und effektiven Preisanreiz zu schaffen, der langfristige Investitionen in Emissionsminderungen fördert und gleichzeitig übermäßige Volatilität und Kosten für die Wirtschaft vermeidet. Eine kontinuierliche Überwachung und Anpassung dieser Mechanismen ist notwendig, um auf sich ändernde Marktbedingungen und politische Ziele reagieren zu können und die Rolle des Kohlenstoffpreises als effektives Lenkungsinstrument zu stärken.

### **3. Fallstudien (EU ETS, Kalifornien, China)**

Die Implementierung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen variiert erheblich in Design und Umfang, was zu unterschiedlichen Erfahrungen und Lernerfolgen führt. Eine vergleichende Analyse der größten und einflussreichsten Systeme – des Europäischen Emissionshandelssystems (EU ETS), des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms und des chinesischen Nationalen Emissionshandelssystems – bietet wertvolle Einblicke in die Stärken und Schwächen verschiedener Ansätze und die Herausforderungen bei der Gestaltung effektiver Märkte für Kohlenstoff.

### *3.1. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS)*

Das EU ETS ist das weltweit größte und am längsten bestehende CO<sub>2</sub>-Handelssystem, das 2005 als Kernstück der europäischen Klimapolitik eingeführt wurde (Edwin & Josephine, 2023). Es deckt derzeit über 10.000 Energieanlagen und energieintensive Industrieanlagen in den 27 EU-Mitgliedstaaten sowie Island, Liechtenstein und Norwegen ab und umfasst rund 40% der gesamten Treibhausgasemissionen der EU. Das System hat eine mehrphasige Entwicklung durchlaufen, die von anfänglichen Herausforderungen bis hin zu signifikanten Reformen reichte.

**Phasen und Entwicklung:**

- \* **Phase 1 (2005-2007):** Eine Pilotphase zur Etablierung des Handels, gekennzeichnet durch kostenlose Zuteilung und ein zu hohes Cap, was zu einem Preisverfall auf nahezu Null führte (Ladaniwskyj, 2008). Trotzdem wurden wichtige Erfahrungen mit der Infrastruktur und den Handelsprozessen gesammelt (Edwin & Josephine, 2023).
- \* **Phase 2 (2008-2012):** Diese Phase fiel mit den Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls zusammen (Oberthür & Ott, 1999). Die Zuteilung blieb größtenteils kostenlos, und die Wirtschaftskrise von 2008 führte erneut zu einem massiven Überangebot an Berechtigungen und niedrigen Preisen, was den Anreiz zur Emissionsreduktion dämpfte.
- \* **Phase 3 (2013-2020):** Einführung eines EU-weiten Caps anstelle nationaler Caps, schrittweise Umstellung auf Auktionierung als primäres Zuteilungsprinzip und Ausweitung des Geltungsbereichs auf weitere Sektoren und Gase. Trotz dieser Verbesserungen blieb ein erheblicher Überschuss an Berechtigungen bestehen, der die Preise unter einem Niveau hielt, das für weitreichende Investitionen in klimafreundliche Technologien erforderlich gewesen wäre (Mauer et al., 2020).
- \* **Phase 4 (2021-2030):** Die aktuelle Phase ist durch ehrgeizigere Reduktionsziele gekennzeichnet, die sich am “Fit for 55”-Paket der EU ausrichten. Eine zentrale Reform war die Einführung der Marktstabilitätsreserve (MSR) im Jahr 2019, die darauf abzielt, das Überangebot an Berechtigungen strukturell zu reduzieren und die Preisvolatilität zu mindern (Edwin & Josephine, 2023). Die MSR entzieht dem Markt überschüssige Berechtigungen und speichert sie oder annulliert sie dauerhaft, wenn der

Überschuss eine bestimmte Schwelle überschreitet. Dies hat maßgeblich dazu beigetragen, die Kohlenstoffpreise in den letzten Jahren deutlich zu steigern und zu stabilisieren (Dittmann et al., 2024).

**Wirksamkeit und Herausforderungen:** Das EU ETS hat seit 2005 zu einer Reduktion der Emissionen in den erfassten Sektoren um über 35% geführt (Edwin & Josephine, 2023). Diese Reduktionen sind jedoch nicht ausschließlich dem ETS zuzuschreiben, sondern auch anderen politischen Maßnahmen und externen Faktoren. Dennoch zeigen Studien, dass das ETS einen signifikanten Beitrag geleistet hat, insbesondere in Phasen höherer Kohlenstoffpreise, indem es den “Fuel Switch” von Kohle zu Gas in der Stromerzeugung förderte und Investitionen in erneuerbare Energien stimulierte (Dittmann et al., 2024). Eine anhaltende Herausforderung bleibt das Thema des Carbon Leakage, d.h. der Verlagerung von Emissionen und Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen. Um dem entgegenzuwirken, hat die EU Mechanismen wie die kostenlose Zuteilung für bestimmte Sektoren und den Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) eingeführt, der Importe aus Ländern ohne vergleichbare Kohlenstoffpreise bepreist (Wettestad, 2023). Die jüngste Erweiterung des ETS auf den Schiffsverkehr und die geplante Einführung eines separaten Handelssystems für Gebäude und Straßenverkehr (“ETS 2”) unterstreichen die Rolle des Systems als zentrales Instrument zur Erreichung der Klimaneutralität bis 2050.

*Tabelle 2: Emissions- und Preisentwicklung im EU ETS (Phasenübersicht)*

Diese Tabelle fasst die wichtigsten Entwicklungen in den Phasen des EU ETS zusammen, insbesondere hinsichtlich der durchschnittlichen Kohlenstoffpreise und der Emissionsreduktionen in den erfassten Sektoren.

#### **Tabelle 2: Schlüsselindikatoren des EU ETS nach Phasen**

Phase	Zeitraum	Allokation	Durchschnittl.	Emissionsentwicklung	
			CO2-Preis	(im Sektor)	Hauptmerkmal/Herausforderung
<b>1</b>	2005-2007	Großteils kostenlos	< 10 €/tCO <sub>2</sub>	Geringe Reduktionen	Lernphase, Überallokation, Preisverfall
<b>2</b>	2008-2012	Großteils kostenlos	10-20 €/tCO <sub>2</sub> (volatil)	Moderate Reduktionen	Wirtschaftskrise, Preisverfall
<b>3</b>	2013-2020	Zunehmend Auktion	5-30 €/tCO <sub>2</sub> (steigend)	Signifikante Reduktionen	EU-weites Cap, MSR-Ankündigung
<b>4</b>	2021-2030	Überwiegend Auktion	> 60 €/tCO <sub>2</sub> (hoch)	Deutliche Reduktionen erwartet	“Fit for 55”, MSR aktiv, ETS 2

*Hinweis: Die Emissionsentwicklung ist kumulativ und wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Preisangaben sind Durchschnittswerte und können stark variieren.*

### 3.2. Kalifornisches Cap-and-Trade-Programm

Das kalifornische Cap-and-Trade-Programm wurde 2013 eingeführt und ist eines der umfassendsten Kohlenstoffmärkte in Nordamerika. Es deckt etwa 80% der Treibhausgasemissionen des Bundesstaates ab, einschließlich der Sektoren Stromerzeugung, Industrie, Transport und Heizöl (Gutknecht, 2014).

**Designmerkmale:**

- \* **Umfassender Geltungsbereich:** Das Programm erfasst eine breite Palette von Sektoren, was es von vielen anderen Systemen unterscheidet, die sich oft auf den Energiesektor konzentrieren.
- \* **Auktionierung mit Reserven:** Ein Großteil der Berechtigungen wird versteigert, wobei ein Auktionsreservationspreis als Preisuntergrenze dient, um extrem niedrige Preise zu verhindern (Holt & Shobe, 2015). Es gibt auch eine Preisobergrenze in Form von “Cost Containment Reserve” Berechtigungen, die bei Erreichen bestimmter Preisschwellen freigegeben werden können.
- \* **Linkage mit Québec:** Kalifornien hat sein Handelssystem mit dem kanadischen Bundesstaat Québec verknüpft, was den Markt

vergrößert, die Liquidität erhöht und die Kosteneffizienz verbessert (Gao, 2024). \* **Offset-Projekte:** Das System erlaubt die Nutzung von Offsets aus qualifizierten Projekten (z.B. Forstwirtschaft, Ozon-zerstörende Substanzen), um bis zu 8% der Emissionsverpflichtungen zu erfüllen.

**Wirksamkeit und Herausforderungen:** Kalifornien hat seit der Einführung des Programms signifikante Emissionsreduktionen erzielt und seine Klimaziele übertroffen (Endemann, 2011). Das Cap-and-Trade-Programm wird als ein wesentlicher Faktor für diese Erfolge angesehen, indem es Anreize für Investitionen in erneuerbare Energien, Energieeffizienz und emissionsarme Technologien schafft. Die Preisuntergrenze hat dazu beigetragen, einen Mindestanreiz für Reduktionen aufrechtzuerhalten, während die Preisobergrenze vor übermäßigen Kosten schützt. Herausforderungen umfassen die Notwendigkeit, das System kontinuierlich an neue, ambitioniertere Klimaziele anzupassen und die Verteilungswirkungen des Systems, insbesondere auf einkommensschwache Gemeinden, zu adressieren. Kalifornien hat hierzu Einnahmen aus der Auktionierung zur Finanzierung von Projekten in benachteiligten Gemeinden eingesetzt.

### *3.3. Chinas Nationales Emissionshandelssystem*

China, der weltweit größte Emittent von Treibhausgasen, hat 2021 sein nationales Emissionshandelssystem eingeführt, nachdem es mehrere Jahre lang regionale Pilotprojekte betrieben hatte. Dies ist ein entscheidender Schritt in Chinas Bemühungen, bis 2060 Klimaneutralität zu erreichen (Li & Zhao, 2025).

**Designmerkmale:** \* **Umfang:** Das System startete mit dem Stromerzeugungssektor, der etwa 40% der nationalen CO<sub>2</sub>-Emissionen abdeckt und über 2.000 Emittenten umfasst. Es ist geplant, das System schrittweise auf weitere energieintensive Sektoren wie Stahl, Zement und Aluminium auszuweiten. \* **Zuteilung:** Die anfängliche Zuteilung der Berechtigungen erfolgt hauptsächlich kostenlos, basierend auf Benchmarking-Ansätzen, die Anreize für Effizienzverbesserungen innerhalb der Sektoren setzen. Es gibt Pläne, die Auktionierung

in zukünftigen Phasen einzuführen. \* **Intensitätsbasiertes Cap:** Im Gegensatz zu den absoluten Caps des EU ETS und Kaliforniens verwendet Chinas System zunächst ein intensitätsbasiertes Cap, d.h., es begrenzt die Emissionen pro Einheit der Produktion statt der absoluten Emissionen. Dies ermöglicht ein Wirtschaftswachstum, während gleichzeitig die Emissionsintensität sinkt. Es ist jedoch weniger ambitioniert als ein absolutes Cap, da die absoluten Emissionen bei steigender Produktion weiterhin steigen können.

**Wirksamkeit und Herausforderungen:** Da das System erst seit kurzer Zeit in Betrieb ist, ist die Bewertung seiner langfristigen Wirksamkeit noch im Gange. Erste Analysen deuten darauf hin, dass das System dazu beigetragen hat, die Emissionsintensität im Stromsektor zu reduzieren und das Bewusstsein für Kohlenstoffkosten zu schärfen (Li & Zhao, 2025). Herausforderungen umfassen die Notwendigkeit, die Datenqualität und -berichterstattung zu verbessern, die Compliance der Unternehmen sicherzustellen und die Durchsetzung der Regeln zu stärken. Die schrittweise Einführung und die anfängliche Konzentration auf kostenlose Zuteilung und intensitätsbasierte Caps spiegeln Chinas Ansatz wider, das System schrittweise zu entwickeln und an die spezifischen nationalen Gegebenheiten anzupassen. Die zukünftige Ausweitung auf weitere Sektoren und die mögliche Einführung von Auktionierung und einem absoluten Cap werden entscheidend sein, um die Ambition des Systems zu erhöhen und Chinas Klimaziele effektiv zu unterstützen. Die Verknüpfung mit internationalen Kohlenstoffmärkten ist ebenfalls ein Thema, das in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen könnte (Gao, 2024).

**Vergleichende Beobachtungen:** Die Fallstudien zeigen eine Diversität in der Gestaltung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen, die oft die spezifischen nationalen oder regionalen Kontexte widerspiegeln. Während das EU ETS und Kalifornien absolute Caps verwenden und zunehmend auf Auktionierung setzen, verfolgt China einen vorsichtigeren Ansatz mit intensitätsbasierten Caps und kostenloser Zuteilung. Alle Systeme stehen jedoch vor ähnlichen Herausforderungen: die Notwendigkeit, das Cap ambitioniert genug zu gestalten, um wirksame Reduktionen zu erzielen, die Preisstabilität zu gewährleisten, Carbon Leakage zu vermeiden

und die Akzeptanz bei Unternehmen und der Öffentlichkeit zu sichern. Die Erfahrungen dieser Systeme liefern wertvolle Lehren für die zukünftige Entwicklung und Verknüpfung von Kohlenstoffmärkten weltweit.

*Tabelle 3: Globale Fallstudien-Daten und projizierte Auswirkungen*

Diese Tabelle präsentiert ausgewählte quantitative Metriken und projizierte Auswirkungen der untersuchten Emissionshandelssysteme, um einen direkten Vergleich ihrer Leistung und potenziellen Beiträge zum Klimaschutz zu ermöglichen.

**Tabelle 3: Ausgewählte Metriken und Projektionen globaler EHS**

	EU ETS	Kalifornien		
Merkmal	(2023)	(2022)	China (2023)	Anmerkungen
<b>Emissionsreduktion</b>	~35% ggü. 2005	~25% ggü. 1990	~4%	Reduktionen in den jeweiligen Sektoren und Zeiträumen.
<b>CO2-Preis (Durchschnitt)</b>	~85 €/tCO2	~30 \$/tCO2	~8 \$/tCO2	Preise variieren stark, hier Jahresdurchschnitte.
<b>Cap-Typ</b>	Absolut	Absolut	Intensitätsbasiert	China plant Übergang zu absolutem Cap.
<b>Sektorabdeckung</b>	Energie, Industrie, Luftfahrt	Energie, Industrie, Verkehr	Energie	China plant Erweiterung auf weitere Sektoren.
<b>Auktionsanteil</b>	Hoch (>50%)	Hoch (>50%)	Niedrig (<10%)	Tendenz zur Erhöhung der Auktionierungsanteile.
<b>Proj. Reduktion 2030</b>	-55% ggü. 1990	-40% ggü. 1990	-65%	Ziele gemäß nationalen/regionalen Klimaplänen.

	EU ETS	Kalifornien		
Merkmal	(2023)	(2022)	China (2023)	Anmerkungen
<b>Proj.</b>	>40 Mrd. €	>5 Mrd. \$	>1 Mrd. \$	Schätzwerte, abhängig von
<b>Einnahmen</b>				Preis und Auktionsvolumen.
<b>p.a.</b>				

*Hinweis: Projizierte Werte basieren auf aktuellen politischen Zielen und Modellannahmen. Die tatsächliche Entwicklung kann abweichen.*

## 4. Vergleich mit anderen Klimaschutzinstrumenten

CO<sub>2</sub>-Handelssysteme sind ein mächtiges Instrument im klimapolitischen Werkzeugkasten, aber sie sind nicht die einzige Option und müssen oft in Kombination mit anderen Maßnahmen eingesetzt werden, um die komplexen Herausforderungen des Klimawandels zu bewältigen. Ein umfassender Vergleich mit alternativen Instrumenten wie CO<sub>2</sub>-Steuern, Command-and-Control-Regulierungen und Subventionen ist unerlässlich, um die relativen Vor- und Nachteile jedes Ansatzes zu verstehen und einen optimalen Politikmix zu gestalten (Kirchner et al., 2019).

### 4.1. CO<sub>2</sub>-Steuern (Carbon Taxes)

CO<sub>2</sub>-Steuern stellen eine direkte Bepreisung von Emissionen dar, bei der ein fester Preis pro Tonne CO<sub>2</sub> festgelegt wird. Im Gegensatz zu Cap-and-Trade-Systemen, die eine Mengengrenze (Cap) festlegen und den Preis dem Markt überlassen, legen CO<sub>2</sub>-Steuern den Preis fest und überlassen die Menge der Reduktionen den Marktreaktionen.

**Vorteile von CO<sub>2</sub>-Steuern:** \* **Preissicherheit:** Unternehmen wissen genau, welche Kosten pro Tonne CO<sub>2</sub> auf sie zukommen, was die Planung und Investitionsentscheidungen erleichtern kann. \* **Administrative Einfachheit:** CO<sub>2</sub>-Steuern können im Vergleich zu komplexen Handelssystemen einfacher zu implementieren und zu verwalten sein, da sie oft

an bestehende Steuersysteme anknüpfen können. \* **Stabile Einnahmen:** Sie generieren stabile Einnahmen für den Staat, die für andere klimapolitische Maßnahmen, zur Entlastung anderer Steuern oder zur Umverteilung an die Bürger genutzt werden können. \* **Geringere Volatilität:** CO<sub>2</sub>-Steuern sind weniger anfällig für die Preisvolatilität, die CO<sub>2</sub>-Märkte charakterisiert und die Investitionen in Emissionsminderungstechnologien erschweren kann.

**Nachteile von CO<sub>2</sub>-Steuern:** \* **Unsicherheit über Emissionsreduktionen:** Da der Preis festgelegt wird, ist die genaue Menge der erzielten Emissionsreduktionen im Voraus ungewiss und hängt von der Preiselastizität der Emissionen ab. Es kann schwierig sein, spezifische Reduktionsziele zu garantieren. \* **Politische Akzeptanz:** CO<sub>2</sub>-Steuern können politisch unbeliebter sein als Handelssysteme, da sie direkt als “Steuererhöhung” wahrgenommen werden und zu höheren Preisen für Konsumenten führen können. \* **Fehlende Flexibilität:** Ohne Marktmechanismen fehlt die Flexibilität, auf unerwartete ökonomische Schocks oder technologische Durchbrüche zu reagieren, die die Kosten der Emissionsminderung beeinflussen könnten.

**Hybridansätze:** Um die Vorteile beider Systeme zu nutzen, werden Hybridansätze diskutiert. Dazu gehören CO<sub>2</sub>-Handelssysteme mit Preisunter- und -obergrenzen (Price Collars), die Elemente der Preissicherheit einer Steuer mit der Mengensteuerung eines Handelssystems verbinden (Holt & Shobe, 2015). Eine Preisuntergrenze kann als eine Art Mindest-CO<sub>2</sub>-Steuer fungieren, während eine Preisobergrenze einen Schutz vor exzessiven Kosten bietet.

#### *4.2. Regulierungen (Command-and-Control)*

Command-and-Control-Ansätze umfassen direkte staatliche Vorschriften, die bestimmte Technologien vorschreiben, Emissionsstandards festlegen oder die Nutzung bestimmter Substanzen verbieten. Beispiele hierfür sind Abgasnormen für Fahrzeuge, Energieeffizienzstandards für Gebäude oder Verbote bestimmter F-Gase.

**Vorteile von Command-and-Control:** \* **Direkte Kontrolle und Sicherheit:**

Sie bieten eine hohe Sicherheit, dass bestimmte Standards oder Ziele erreicht werden, da sie direkt durchgesetzt werden. \* **Einfache Durchsetzung:** Für bestimmte, klar definierte Probleme können sie relativ einfach zu implementieren und zu überwachen sein. \* **Schnelle Wirkung:** In einigen Fällen können sie schnell zu Emissionsreduktionen führen, insbesondere wenn es um die Einführung bewährter Technologien geht.

**Nachteile von Command-and-Control:** \* **Mangelnde Kosteneffizienz:**

Command-and-Control-Ansätze sind oft nicht kosteneffizient. Sie berücksichtigen nicht die heterogenen Kostenstrukturen der Unternehmen und können zu höheren Gesamtkosten führen, da sie nicht die kostengünstigsten Reduktionsmöglichkeiten identifizieren. \* **Innovationshemmnis:** Durch die Vorschreibung spezifischer Technologien können sie Innovationen behindern, da Unternehmen wenig Anreiz haben, über die vorgeschriebenen Standards hinauszugehen oder neue, möglicherweise effizientere Lösungen zu entwickeln. \* **Bürokratischer Aufwand:** Sie können mit einem hohen bürokratischen Aufwand für die Festlegung, Überwachung und Durchsetzung detaillierter Vorschriften verbunden sein.

#### *4.3. Subventionen (Subsidies)*

Subventionen sind finanzielle Anreize, die von Regierungen bereitgestellt werden, um bestimmte Aktivitäten oder Technologien zu fördern, die als wünschenswert erachtet werden, wie z.B. erneuerbare Energien, Energieeffizienz oder Elektromobilität.

**Vorteile von Subventionen:** \* **Förderung neuer Technologien:** Sie können entscheidend sein, um neue, aber noch nicht wettbewerbsfähige grüne Technologien auf den Markt zu bringen und deren Skalierung zu beschleunigen. \* **Geringere Akzeptanzprobleme:** Subventionen werden oft positiver wahrgenommen als Steuern oder Abgaben, was ihre politische Akzeptanz erhöht. \* **Gezielte Förderung:** Sie ermöglichen eine gezielte Unterstützung spezifischer Sektoren oder Technologien, die für die Dekarbonisierung als besonders wichtig erachtet werden.

**Nachteile von Subventionen:** \* **Fiskalische Kosten:** Subventionen sind mit erheblichen fiskalischen Kosten verbunden, die aus dem Steueraufkommen finanziert werden müssen. \* **Marktverzerrungen:** Sie können zu Marktverzerrungen führen, indem sie die Wettbewerbsfähigkeit bestimmter Technologien künstlich verbessern und den Wettbewerb verzerren. \* **Mitnahmeeffekte:** Es besteht die Gefahr von Mitnahmeeffekten, bei denen Projekte subventioniert werden, die auch ohne die Förderung stattgefunden hätten. \* **Keine direkte Emissionsbegrenzung:** Subventionen begrenzen nicht direkt die Gesamtemissionen, sondern fördern lediglich emissionsarme Alternativen. Ein “Rebound-Effekt” könnte die Vorteile mindern, wenn zum Beispiel durch Effizienzgewinne der Gesamtverbrauch steigt.

#### *4.4. Synergien und Politikmix*

Keines dieser Instrumente ist eine Allzwecklösung. Ein effektiver Klimaschutz erfordert in der Regel einen Mix aus verschiedenen Instrumenten, die sich ergänzen und Synergien nutzen (Kirchner et al., 2019). \* **CO2-Handel als Fundament:** CO2-Handelssysteme können als Basisinstrument dienen, das einen breiten Emissionssektor erfasst und einen kosteneffizienten Anreiz zur Reduktion setzt. Sie schaffen einen übergreifenden Preis für CO2. \* **Komplementäre Regulierungen:** Spezifische Regulierungen können dort sinnvoll sein, wo der CO2-Preis allein nicht ausreicht, um bestimmte Barrieren zu überwinden (z.B. Marktversagen, Informationsasymmetrien) oder um technologiespezifische Standards zu setzen, die Sicherheit oder Qualität gewährleisten. \* **Gezielte Subventionen:** Subventionen können eingesetzt werden, um die Entwicklung und Markteinführung von bahnbrechenden Technologien zu beschleunigen, die langfristig entscheidend für die Dekarbonisierung sind, aber kurzfristig noch nicht wettbewerbsfähig. Dies kann auch die Kosten der Reduktion im Handelssystem senken. \* **Internationale Kooperation:** Internationale Abkommen wie das Pariser Abkommen (Ramji, 2018) und Mechanismen wie Joint Implementation (Janikowski et al., 1994) können CO2-Märkte erweitern und die globale Kosteneffizienz erhöhen.

Die Kunst der Klimapolitik besteht darin, diese Instrumente so zu kombinieren, dass sie ihre Stärken ausspielen und ihre Schwächen minimieren. Ein gut konzipiertes CO<sub>2</sub>-Handelssystem kann die Grundlage für einen effizienten Klimaschutz bilden, während gezielte Regulierungen und Subventionen Engpässe beseitigen und Innovationen fördern. Die Herausforderung besteht darin, den richtigen Mix zu finden, der sowohl ökologisch wirksam als auch ökonomisch effizient und politisch umsetzbar ist.

*Tabelle 4: Bewertung verschiedener Klimaschutzinstrumente im Politikmix*

Diese Tabelle bewertet verschiedene Klimaschutzinstrumente hinsichtlich ihrer Effizienz, Wirksamkeit und Akzeptanz, um deren komplementäre Rolle in einem umfassenden Politikmix zu verdeutlichen.

**Tabelle 4: Stärken und Schwächen von Klimaschutzinstrumenten**

Instrument	Effizienz	Emissionssicherheit	Innovationsanreize	Politische	Komplementäre
				Akzeptanz	Rolle im Mix
<b>Emissionshandel</b>	Hoch	Hoch	Hoch	Mittel	Basisinstrument, Preissignal
<b>CO<sub>2</sub>-Steuer</b>	Hoch	Mittel	Hoch	Niedrig	Preissicherheit, Einnahmen
<b>Regulierung (C&amp;C)</b>	Niedrig	Hoch	Niedrig	Mittel	Direkte Standards, Sicherheit
<b>Subventionen</b>	Mittel	Niedrig	Hoch	Hoch	Technologie- Förderung, Markteinführung
<b>Internationale Koop.</b>	Hoch	Mittel	Mittel	Hoch	Globale Kosteneffizienz, Lastenteilung

*Hinweis: “Mittel” bedeutet, dass die Eigenschaft stark vom spezifischen Design und Kontext abhängt. Eine Kombination der Instrumente maximiert die Gesamtwirkung.*

## **5. Empirische Belege für Klimaschutzwirkung**

Die Wirksamkeit von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen wird letztlich an ihrer Fähigkeit gemessen, messbare und nachhaltige Emissionsreduktionen zu erzielen und somit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Die empirische Forschung hat sich intensiv mit dieser Frage auseinandergesetzt, wobei die Ergebnisse ein differenziertes Bild zeichnen und sowohl Erfolge als auch Herausforderungen aufzeigen.

### *5.1. Direkte Emissionsreduktionen*

Zahlreiche Studien haben die direkten Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen auf die Treibhausgasemissionen analysiert. Das Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) bietet hierfür die umfangreichste Datenbasis. Edwin (Edwin & Josephine, 2023) und andere Autoren belegen, dass die Emissionen der vom EU ETS erfassten Sektoren seit der Einführung des Systems im Jahr 2005 um etwa 35% gesunken sind. Während ein Teil dieser Reduktionen auf externe Faktoren wie die Wirtschaftskrise und den Ausbau erneuerbarer Energien zurückzuführen ist, haben ökonometrische Analysen versucht, den kausalen Effekt des ETS zu isolieren. Studien, die beispielsweise die Einführung des ETS mit Kontrollgruppen von Nicht-ETS-Ländern oder -Sektoren vergleichen, kommen zu dem Schluss, dass das ETS einen signifikanten und eigenständigen Beitrag zu diesen Reduktionen geleistet hat (Burkard, 1935). Insbesondere in Phasen mit höheren Kohlenstoffpreisen wurde eine stärkere Korrelation zwischen dem Preis und der Emissionsreduktion festgestellt. Dittmann, Lauter et al. (Dittmann et al., 2024) untersuchen die Determinanten des Kohlenstoffpreises in Phase 3 des EU ETS und zeigen die Komplexität der Faktoren auf, die sowohl den Preis als auch indirekt die Reduktionsanreize beeinflussen.

Ähnliche positive Ergebnisse werden aus dem kalifornischen Cap-and-Trade-Programm berichtet, das ebenfalls zu signifikanten Emissionsminderungen beigetragen hat, während die Wirtschaft des Bundesstaates weiterwuchs (Diers, 2016). Auch Chinas nationales ETS, obwohl noch in einer frühen Phase und mit einem intensitätsbasierten Cap gestartet, zeigt erste Anzeichen einer Reduktion der Emissionsintensität im Stromsektor (Li & Zhao, 2025). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass CO<sub>2</sub>-Handelssysteme prinzipiell in der Lage sind, die Emissionen in den erfassten Sektoren zu senken, vorausgesetzt, das Cap ist ausreichend ambitioniert und die Marktmechanismen funktionieren effektiv.

## *5.2. Anreize für Innovation und Technologiewandel*

Ein zentrales Argument für marktbasierte Instrumente wie den CO<sub>2</sub>-Handel ist ihre Fähigkeit, Innovationen in emissionsarmen Technologien anzuregen. Durch die Bepreisung von Emissionen wird ein finanzieller Anreiz geschaffen, in Forschung und Entwicklung zu investieren und neue, sauberere Technologien zu implementieren. Empirische Studien haben gezeigt, dass Unternehmen in Sektoren, die dem CO<sub>2</sub>-Handel unterliegen, tendenziell mehr Patente im Bereich grüner Technologien anmelden und höhere Investitionen in Energieeffizienz und erneuerbare Energien tätigen (Heinen, 2010). Dies ist besonders wichtig für die langfristige Dekarbonisierung der Wirtschaft, da der Übergang zu einer kohlenstoffneutralen Gesellschaft tiefgreifende technologische Veränderungen erfordert.

Der Kohlenstoffpreis fungiert hier als ein dynamischer Anreiz. Mit steigenden Preisen wird es zunehmend attraktiver, in teurere, aber emissionsärmere Technologien zu investieren. Dies kann zu einem “Race to the Top” bei der Entwicklung und Implementierung von Klimatechnologien führen, wodurch die Kosten für diese Technologien im Laufe der Zeit sinken. Die Erfahrungen aus dem EU ETS legen nahe, dass der Kohlenstoffpreis, insbesondere wenn er stabil und auf einem hohen Niveau ist, ein wichtiger Treiber für die Umstellung auf emissionsärmere Produktionsprozesse und die Einführung erneuerbarer Energien ist (Dittmann et al., 2024). Die Synergien zwischen Kohlenstoffbepreisung und anderen politischen Instrumenten,

wie die Förderung von Forschung und Entwicklung, können diesen Innovationseffekt noch verstärken (Kirchner et al., 2019).

### *5.3. Wirtschaftliche Auswirkungen und Wettbewerbsfähigkeit*

Die wirtschaftlichen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen sind ein häufig diskutiertes Thema. Kritiker befürchten negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen, insbesondere in energieintensiven Sektoren, und das Risiko von Carbon Leakage. Empirische Studien liefern hierzu gemischte Ergebnisse. Während einige Studien geringfügige negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit bestimmter Sektoren finden, zeigen andere, dass die Effekte oft weniger gravierend sind als befürchtet, insbesondere wenn Mechanismen zur Vermeidung von Carbon Leakage implementiert werden (Wettestad, 2023). Die kostenlose Zuteilung von Berechtigungen an Sektoren mit hohem Carbon-Leakage-Risiko und die Einführung des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) in der EU sind Beispiele für solche Minderungsstrategien.

Studien zur makroökonomischen Wirkung zeigen, dass CO<sub>2</sub>-Handelssysteme bei richtiger Ausgestaltung nur geringe negative Auswirkungen auf das Bruttoinlandsprodukt (BIP) oder die Beschäftigung haben können, während sie gleichzeitig erhebliche Umweltvorteile generieren. Die Einnahmen aus der Auktionierung von Berechtigungen können zudem zur Finanzierung von Investitionen in die grüne Wirtschaft oder zur Entlastung von Haushalten und Unternehmen genutzt werden, was die gesamtwirtschaftliche Belastung abfedern kann. Goulder, Hafstead et al. (Goulder et al., 2009) untersuchen die Auswirkungen alternativer Zuteilungsmethoden auf die Wirtschaft und zeigen auf, dass die Wahl der Allokationsmethode entscheidend für die Verteilungswirkungen und die Akzeptanz ist. Eine gerechte und effiziente Verwendung der Auktionserlöse ist daher von großer Bedeutung.

#### 5.4. *Co-Benefits und Nebeneffekte*

Über die reinen Treibhausgasreduktionen hinaus können CO<sub>2</sub>-Handelssysteme auch positive Nebeneffekte, sogenannte Co-Benefits, mit sich bringen. Dazu gehört insbesondere die Verbesserung der Luftqualität. Maßnahmen zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie die Umstellung von Kohle auf Gas oder erneuerbare Energien, führen oft auch zu einer Verringerung der Emissionen von Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub. Dies hat positive Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Die Reduktion dieser lokalen und regionalen Luftschadstoffe kann erhebliche wirtschaftliche Vorteile durch geringere Gesundheitskosten und eine höhere Produktivität mit sich bringen, die oft die direkten Kosten der CO<sub>2</sub>-Reduktion übersteigen (Jänicke & Helgenberger, 2016).

Allerdings können auch unerwünschte Nebeneffekte auftreten. Pearse und Böhm (Pearse & Böhm, 2014) äußern Bedenken, dass Kohlenstoffmärkte möglicherweise nicht zu den radikalen Veränderungen führen, die für eine tiefgreifende Dekarbonisierung notwendig sind, und stattdessen zu einer “Greenwashing”-Mentalität führen könnten, bei der Unternehmen Berechtigungen kaufen, anstatt substanzielle Reduktionen vorzunehmen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Überprüfung und Anpassung der Systeme, um sicherzustellen, dass sie ihre ökologischen Ziele effektiv erreichen. Zudem können unzureichend gestaltete Systeme zu unerwünschten Verteilungswirkungen führen, die soziale Ungleichheiten verstärken, wenn beispielsweise die Kostensteigerungen unverhältnismäßig stark einkommensschwache Haushalte belasten.

*Tabelle 5: Co-Benefits und Nebeneffekte der CO<sub>2</sub>-Reduktion*

Diese Tabelle beleuchtet die positiven Zusatznutzen (Co-Benefits) und potenziellen unerwünschten Nebeneffekte, die mit der Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen, oft durch EHS, einhergehen.

#### **Tabelle 5: Co-Benefits und Nebeneffekte von Emissionsminderungen**

Kategorie	Aspekt	Beschreibung	Bewertung
<b>Co-Benefits</b>	Luftqualität	Reduktion von SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Feinstaub	Sehr hoch
	Gesundheit	Weniger Atemwegserkrankungen, längere Lebenserwartung	Hoch
	Ökosysteme	Schutz der Biodiversität, weniger saurer Regen	Mittel
	Energieautonomie	Weniger Abhängigkeit von fossilen Importen	Hoch
	Innovation	Förderung grüner Technologien	Sehr hoch
<b>Nebeneffekte</b>	Greenwashing	Kauf von Zertifikaten statt echter Reduktion	Mittel
	Soziale Ungleichheit	Höhere Energiepreise belasten ärmere Haushalte	Mittel
	Marktverzerrung	Überallokation / Spekulation im Markt	Mittel
	Carbon Leakage	Verlagerung von Emissionen ins Ausland	Hoch

*Hinweis: Die Bewertung der Auswirkungen hängt stark vom Systemdesign und den begleitenden politischen Maßnahmen ab.*

### 5.5. Herausforderungen bei der empirischen Evidenz

Die empirische Bewertung der Klimaschutzwirkung von CO<sub>2</sub>-Handelssystemen ist komplex. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, den kausalen Effekt des Handelssystems von anderen politischen Maßnahmen (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards) und externen Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, Brennstoffpreise) zu isolieren. Dies erfordert ausgefeilte ökonometrische Methoden und eine sorgfältige Datenanalyse. Zudem ist die langfristige Wirkung auf das Klima selbst schwierig zu messen, da der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre von globalen Emissionen abhängt (Reid, 2022) und die Wirkung eines einzelnen Systems nur einen Bruchteil des globalen Gesamtbildes ausmacht.

Die langfristige Entwicklung von Emissionspfaden und deren Auswirkungen auf die globale Temperatur sind Prozesse, die Jahrzehnte umfassen (Guest, 2010)(Tol, 2001).

Trotz dieser methodischen Schwierigkeiten liefert die wachsende Zahl empirischer Studien über CO<sub>2</sub>-Handelssysteme weltweit eine robuste Evidenz dafür, dass diese Instrumente einen wirksamen Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Die Erfahrungen aus dem EU ETS, Kalifornien und China zeigen, dass CO<sub>2</sub>-Handelssysteme, wenn sie ambitioniert gestaltet und kontinuierlich an neue Erkenntnisse und Herausforderungen angepasst werden, ein unverzichtbarer Bestandteil einer umfassenden und kosteneffizienten Klimapolitik sind. Die kontinuierliche Verbesserung von Designmerkmalen, wie die Marktstabilitätsreserve und der Carbon Border Adjustment Mechanism, ist entscheidend, um die Wirksamkeit dieser Systeme weiter zu steigern und ihre Rolle im globalen Kampf gegen den Klimawandel zu festigen. Die Fähigkeit, auf veränderte Marktbedingungen und politische Ambitionen zu reagieren, wird die zukünftige Relevanz und den Erfolg dieser Instrumente maßgeblich bestimmen.

## **Diskussion**

Die vorliegende Arbeit hat die komplexen Mechanismen und Auswirkungen des Emissionshandels als zentrales Instrument der Klimapolitik untersucht. Die Ergebnisse unterstreichen die prinzipielle Wirksamkeit marktwirtschaftlicher Ansätze zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, offenbaren jedoch gleichzeitig signifikante Herausforderungen und Optimierungspotenziale. Diese Diskussion zielt darauf ab, die gewonnenen Erkenntnisse in einen breiteren Kontext einzuordnen, ihre Implikationen für die Klimapolitik zu beleuchten, die Grenzen und Herausforderungen bestehender Systeme kritisch zu reflektieren, Verbesserungsvorschläge zu unterbreiten, die Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz zu evaluieren und konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft abzuleiten.

## 1. Implikationen für die Klimapolitik

Der Emissionshandel, insbesondere in seiner Ausprägung als Cap-and-Trade-System, stellt ein fundamentales Instrument zur internen Verrechnung externer Kosten dar, das dem Pigou-Steuer-Prinzip folgt (Piga, 2003). Durch die Festlegung einer Obergrenze (Cap) für Emissionen und die Schaffung eines Marktes für Emissionszertifikate wird ein Preissignal für CO<sub>2</sub>-Emissionen generiert, das Unternehmen Anreize bietet, ihre Emissionen kostenoptimal zu reduzieren. Die Europäische Union hat mit ihrem Emissionshandelssystem (EU ETS) eine Vorreiterrolle eingenommen und demonstriert seit seiner Einführung die Fähigkeit, Emissionen in den erfassten Sektoren signifikant zu senken (Edwin & Josephine, 2023). Diese Erfolge beruhen auf der Schaffung eines klaren wirtschaftlichen Anreizes, der Innovationen in emissionsärmere Technologien fördert und Effizienzsteigerungen entlang der Wertschöpfungsketten stimuliert. Die ökonomische Theorie legt nahe, dass der Emissionshandel im Vergleich zu ordnungsrechtlichen Maßnahmen eine höhere Kostenwirksamkeit aufweisen kann, da er den Unternehmen die Flexibilität gibt, die günstigsten Reduktionsoptionen zu wählen (Kirchner et al., 2019). Dies ist ein entscheidender Vorteil, da er die gesamtgesellschaftlichen Kosten des Klimaschutzes minimiert und somit die Akzeptanz für ambitionierte Klimaziele erhöhen kann.

Die Einnahmen aus der Versteigerung von Emissionszertifikaten bieten zudem erhebliche fiskalische Spielräume. Diese Einnahmen können strategisch eingesetzt werden, um die Energiewende zu finanzieren, soziale Härten abzufedern oder in Forschung und Entwicklung klimafreundlicher Technologien zu investieren (Goulder et al., 2009). Eine gerechte und transparente Verwendung dieser Mittel ist entscheidend, um die Verteilungswirkungen des Emissionshandels sozial ausgewogen zu gestalten und eine breite gesellschaftliche Unterstützung zu sichern (Tol, 2001). Studien betonen die Notwendigkeit, die Allokationsmethoden von Emissionszertifikaten sorgfältig zu gestalten, um unerwünschte Nebeneffekte zu vermeiden und die Lenkungswirkung zu maximieren (Goulder et al., 2009). Hierbei spielt die Balance

zwischen freier Zuteilung und Auktionierung eine wichtige Rolle, wobei ein zunehmender Anteil der Auktionierung als effizienter und transparenter angesehen wird. Dies fördert nicht nur die Markteffizienz, sondern reduziert auch das Potenzial für ungerechtfertigte Gewinne und stärkt die Glaubwürdigkeit des gesamten Systems. Die langfristige Perspektive auf die Preisentwicklung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten ist hierbei von Bedeutung, da sie Investitionsentscheidungen über längere Zeiträume hinweg beeinflusst und somit die strukturelle Transformation der Wirtschaft mitgestaltet.

Darüber hinaus kann der Emissionshandel Synergien mit anderen Politikinstrumenten entfalten, wenn er in ein kohärentes klimapolitisches Gesamtpaket eingebettet wird (Kirchner et al., 2019). Ergänzende Maßnahmen wie Förderprogramme für erneuerbare Energien, Energieeffizienzstandards oder Investitionen in die Infrastruktur können die Wirkung des Preissignals verstärken und die Transformation hin zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft beschleunigen. Ein robustes regulatorisches Umfeld ist dabei unerlässlich, um die Integrität des Marktes zu gewährleisten und rechtliche Unsicherheiten zu minimieren, die beispielsweise zu Klagen führen können (Weishaar, 2014). Die Erfahrung zeigt, dass die langfristige Stabilität und Vorhersehbarkeit des regulatorischen Rahmens entscheidend für Investitionsentscheidungen und die Wirksamkeit des Instruments sind. Dies impliziert eine kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung der rechtlichen Grundlagen, um auf neue Herausforderungen und Marktgegebenheiten reagieren zu können. Die Erkenntnisse der vorliegenden Analyse bestätigen, dass der Emissionshandel ein mächtiges, aber auch komplexes Instrument ist, dessen Erfolg maßgeblich von seiner Ausgestaltung und Integration in eine umfassende Klimastrategie abhängt. Die atmosphärische Konzentration von Kohlenstoffdioxid, die maßgeblich zum Klimawandel beiträgt (Reid, 2022), kann durch einen effektiven Emissionshandel zielgerichtet reduziert werden, was die Dringlichkeit einer kontinuierlichen Optimierung und Anpassung dieser Systeme unterstreicht. Ein gut funktionierender Emissionshandel schafft somit nicht nur ökonomische Anreize, sondern trägt auch zur Stärkung der Innovationskraft und zur Erschließung neuer Geschäftsfelder im Bereich der grünen Technologien bei.

## 2. Grenzen und Herausforderungen des Emissionshandels

Trotz der prinzipiellen Vorteile und Erfolge des Emissionshandels sind dessen Implementierung und Wirksamkeit mit erheblichen Grenzen und Herausforderungen verbunden. Eine der prominentesten Schwierigkeiten ist die Preisvolatilität auf den CO<sub>2</sub>-Märkten (Ladaniwskyj, 2008). Schwankende Preise für Emissionszertifikate können die Investitionssicherheit für Unternehmen untergraben und die Planbarkeit von Emissionsminderungsstrategien erschweren (Dittmann et al., 2024). Perioden niedriger Preise, wie sie in der Vergangenheit im EU ETS beobachtet wurden, können die Lenkungswirkung des Systems schwächen und die Anreize für Dekarbonisierung reduzieren. Umgekehrt können extrem hohe Preise kurzfristig zu Wettbewerbsnachteilen führen, auch wenn sie die gewünschte Reduktionsdynamik verstärken. Diese Volatilität resultiert oft aus einem Ungleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage, beeinflusst durch ökonomische Zyklen, politische Entscheidungen und externe Schocks. Die Vorhersagbarkeit des CO<sub>2</sub>-Preises ist daher eine ständige Herausforderung für Marktteilnehmer und Regulatoren gleichermaßen.

Ein weiteres kritisches Problem ist das sogenannte Carbon Leakage, also die Verlagerung von Emissionen und Produktionskapazitäten in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen (Wettestad, 2023). Dies kann die globale Wirksamkeit des Emissionshandels untergraben und zu Wettbewerbsnachteilen für die im System erfassten Industrien führen. Branchen mit hoher Energieintensität und internationalem Wettbewerb sind hier besonders gefährdet, da sie bei steigenden CO<sub>2</sub>-Kosten ihre Produktion in Regionen ohne vergleichbare Belastungen verlagern könnten. Obwohl Maßnahmen wie die kostenlose Zuteilung von Zertifikaten oder Grenzausgleichsmechanismen (CBAM) zur Adressierung dieses Problems entwickelt wurden, bleibt Carbon Leakage eine anhaltende Herausforderung, die eine kontinuierliche Anpassung und internationale Koordination erfordert. Die Allokationsprobleme selbst, insbesondere die Diskussion um kostenlose Zuteilungen versus Auktionierung, sind ebenfalls eine bedeutende Grenze (Goulder et al., 2009). Kostenlose Zuteilungen können zu

unerwarteten Gewinnen (Windfall Profits) führen und die Anreizwirkung des Preissignals abschwächen, während eine vollständige Auktionierung politisch schwierig durchzusetzen ist und anfängliche Härten für bestimmte Sektoren verursachen kann.

Die politische Akzeptanz und gesellschaftlicher Widerstand stellen ebenfalls eine nicht zu unterschätzende Hürde dar (Pearse & Böhm, 2014). Der Emissionshandel kann als zusätzliche Belastung für Unternehmen und Verbraucher wahrgenommen werden, insbesondere wenn die Einnahmen nicht transparent und zielgerichtet eingesetzt werden oder die Verteilungswirkungen als ungerecht empfunden werden. Dies kann zu Lobbyismus gegen ambitionierte Klimaziele und zu rechtlichen Auseinandersetzungen führen (Weishaar, 2014). Die Komplexität des Systems und die Notwendigkeit, ökonomische, soziale und ökologische Aspekte auszubalancieren, erfordern eine kontinuierliche Kommunikation und Stakeholder-Einbindung. Darüber hinaus ist die Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) von Emissionen, insbesondere bei der Ausweitung auf neue Sektoren oder Gase, komplex und ressourcenintensiv (Haque, 2023). Die Gewährleistung der Datenintegrität und die Vermeidung von Betrug sind dabei von größter Bedeutung für die Glaubwürdigkeit des Systems. Kritiker bemängeln zudem, dass der Emissionshandel allein möglicherweise keine radikale Transformation der Wirtschaft bewirken kann, da er primär inkrementelle Verbesserungen fördert und grundlegende strukturelle Veränderungen nur verzögert anstößt (Pearse & Böhm, 2014). Die Wirksamkeit des Systems hängt stark von der Ambition des Caps ab, dessen Festlegung oft ein Ergebnis komplexer politischer Verhandlungen und Kompromisse ist, was die Dynamik und Geschwindigkeit der Dekarbonisierung beeinflusst. Diese inhärenten Grenzen und die vielfältigen Herausforderungen erfordern eine stetige kritische Reflexion und die Bereitschaft zur Weiterentwicklung der CO<sub>2</sub>-Märkte, um ihr volles Potenzial im Kampf gegen den Klimawandel ausschöpfen zu können.

### 3. Verbesserungsvorschläge für CO<sub>2</sub>-Märkte

Um die Wirksamkeit und Akzeptanz von CO<sub>2</sub>-Märkten zu steigern, sind gezielte Verbesserungen und Weiterentwicklungen unerlässlich. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Stabilisierung der Preise für Emissionszertifikate. Mechanismen wie Preiskorridore (Price Collars), die sowohl eine Mindest- als auch eine Höchstgrenze für den CO<sub>2</sub>-Preis festlegen, könnten die Investitionssicherheit erhöhen und die Planbarkeit für Unternehmen verbessern (Holt & Shobe, 2015). Solche Mechanismen könnten über eine Marktstabilitätsreserve, wie sie bereits im EU ETS existiert, implementiert werden, um ein Überangebot oder eine Knappheit an Zertifikaten auszugleichen (Mauer et al., 2020). Eine proaktive Anpassung der Zertifikatsmenge basierend auf Marktanalysen und klimapolitischen Zielen ist hierbei entscheidend, um die Lenkungswirkung des Preissignals aufrechtzuerhalten und gleichzeitig extreme Preisschwankungen zu vermeiden, die Investitionen hemmen könnten. Die Gestaltung dieser Mechanismen muss dabei flexibel genug sein, um auf unvorhergesehene wirtschaftliche Entwicklungen oder technologische Durchbrüche reagieren zu können.

Die Ausweitung des Geltungsbereichs von Emissionshandelssystemen auf weitere Sektoren, die derzeit nicht oder nur unzureichend erfasst sind, wie beispielsweise den Gebäude- und Verkehrssektor, kann die Effizienz des Gesamtsystems erheblich steigern. Eine solche Erweiterung würde nicht nur zusätzliche Emissionsminderungspotenziale erschließen, sondern auch die Gefahr von Verlagerungseffekten zwischen Sektoren reduzieren. Bei der Integration neuer Sektoren ist jedoch eine sorgfältige Analyse der spezifischen Gegebenheiten und die Entwicklung angepasster Allokations- und Monitoring-Regeln erforderlich, um eine reibungslose Implementierung und Akzeptanz zu gewährleisten. Gleichzeitig ist die Harmonisierung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen über Ländergrenzen hinweg ein vielversprechender Weg, um die Effizienz zu steigern, das Carbon Leakage-Problem zu mindern und die globale Reichweite des Kohlenstoffpreises zu erhöhen (Gao, 2024). Eine schrittweise Verknüpfung (Staggered Linkage) könnte dabei helfen, unterschiedliche Ambitionsniveaus

und Regulierungsrahmen zu überbrücken und einen globalen Kohlenstoffmarkt zu etablieren, der die kostengünstigsten Reduktionspotenziale weltweit erschließt.

Die Stärkung der Auktionsanteile bei der Zuteilung von Zertifikaten ist ein weiterer wichtiger Hebel zur Verbesserung der Effizienz und zur Generierung von Einnahmen. Eine vollständige Auktionierung würde die Lenkungswirkung des CO<sub>2</sub>-Preises maximieren und die Möglichkeit von Windfall Profits minimieren (Goulder et al., 2009). Die so generierten Einnahmen könnten wie bereits erwähnt, gezielt in Klimaschutzmaßnahmen, Innovationen oder soziale Ausgleichsmaßnahmen reinvestiert werden, um die gesellschaftliche Akzeptanz zu fördern. Dies schafft einen positiven Kreislauf, bei dem die Kosten der Emissionen direkt zur Finanzierung der Transformation beitragen. Darüber hinaus sollte der Emissionshandel nicht isoliert betrachtet werden, sondern als integraler Bestandteil eines umfassenden klimapolitischen Instrumentenmixes (Kirchner et al., 2019). Dies bedeutet die gezielte Kombination mit Förderprogrammen, Forschungs- und Entwicklungsinitiativen sowie ordnungsrechtlichen Maßnahmen, um Synergien zu nutzen und die Transformation zu beschleunigen. Die Integration von Lebenszyklusanalysen (LCA) in die Bewertung von Emissionen könnte zudem dazu beitragen, die gesamte Umweltwirkung von Produkten und Prozessen besser zu erfassen und entsprechende Anreize im Emissionshandel zu setzen (Haque, 2023). Schließlich sind Transparenz und eine gute Governance der CO<sub>2</sub>-Märkte unerlässlich, um das Vertrauen der Marktteilnehmer und der Öffentlichkeit zu stärken und die Wirksamkeit des Systems langfristig zu sichern (Li & Zhao, 2025). Dies beinhaltet klare Regeln, unabhängige Aufsichtsbehörden und regelmäßige Überprüfungen der Systemleistung, um Integrität und Fairness zu gewährleisten.

## **4. Rolle im globalen Klimaschutz**

Der Emissionshandel spielt eine zunehmend wichtige Rolle im globalen Klimaschutz, sowohl als nationales Instrument zur Erreichung von Klimazielen als auch als Mechanismus für internationale Kooperation. Viele Länder nutzen Emissionshandelssysteme, um ihre national

festgelegten Beiträge (NDCs) im Rahmen des Pariser Abkommens zu erfüllen (Ramji, 2018). Die Erfahrungen des EU ETS (Edwin & Josephine, 2023) dienen dabei oft als Blaupause und Inspirationsquelle für andere Regionen und Länder, die eigene Kohlenstoffmärkte entwickeln. Diese Vorbildfunktion und der damit verbundene Wissensaustausch tragen maßgeblich zur Verbreitung und Professionalisierung von CO<sub>2</sub>-Märkten weltweit bei. Die internationale Gemeinschaft profitiert von den gesammelten Erfahrungen, sowohl hinsichtlich erfolgreicher Strategien als auch der identifizierten Fallstricke.

Das Pariser Abkommen selbst bietet mit Artikel 6 einen Rahmen für internationale Kooperationsmechanismen, die den Handel mit Emissionsminderungen zwischen Ländern ermöglichen. Dies eröffnet Potenziale für eine kosteneffiziente Emissionsreduktion auf globaler Ebene, indem Minderungen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind (Gao, 2024). Joint Implementation Projekte, wie sie bereits in den 1990er Jahren zwischen den Niederlanden und Polen erprobt wurden (Janikowski et al., 1994), zeigen das Potenzial solcher grenzüberschreitender Kooperationen auf. Eine erfolgreiche Implementierung von Artikel 6 könnte die Ambition der NDCs erhöhen und die globale Dekarbonisierung beschleunigen. Herausforderungen bestehen jedoch in der Vermeidung von Doppelzählungen, der Gewährleistung der Umweltintegrität und der Schaffung eines fairen und transparenten Regelwerks für den internationalen Handel mit Emissionszertifikaten, um die Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit des Systems zu sichern. Die Komplexität dieser Verhandlungen erfordert ein hohes Maß an Vertrauen und politischem Willen.

Die Globalisierung und unterschiedliche Ambitionsniveaus im Klimaschutz stellen ebenfalls eine Herausforderung dar. Während einige Länder und Regionen (wie die EU) ambitionierte Klimaziele verfolgen und entsprechende Kohlenstoffpreise etablieren, hinken andere hinterher (Oberthür & Ott, 1999). Dies kann zu den bereits diskutierten Carbon Leakage-Effekten führen und die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in Ländern mit hohen CO<sub>2</sub>-Preisen beeinträchtigen (Wettestad, 2023). Die Entwicklung von Grenzausgleichsmechanismen wie dem CBAM der EU ist eine Antwort auf diese Problematik und soll

gleiche Wettbewerbsbedingungen schaffen, indem importierten Produkten ein CO<sub>2</sub>-Preis auferlegt wird, der dem im Inland gezahlten Preis entspricht. Solche Maßnahmen können den Druck auf Drittländer erhöhen, eigene Klimaschutzmaßnahmen zu ergreifen, und somit zu einer globalen Angleichung der Klimaschutzanstrengungen beitragen.

Darüber hinaus kann der Emissionshandel eine wichtige Rolle bei der Dekarbonisierung globaler Lieferketten spielen. Durch die Integration von Lebenszyklusanalysen und die Berücksichtigung von Emissionen entlang der gesamten Wertschöpfungskette könnten Anreize für nachhaltigere Produktions- und Konsummuster geschaffen werden (Haque, 2023). Dies ist besonders relevant angesichts des globalen demografischen Wandels und des damit verbundenen Anstiegs der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen, der ohne effektive Klimaschutzmaßnahmen zu einem erheblichen Anstieg der globalen Kohlenstoffemissionen führen würde (Guest, 2010). Die Anpassung an diese globalen Veränderungen erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch angepasste politische Rahmenbedingungen, die den Emissionshandel als flexibles Instrument nutzen. Letztlich ist die Rolle des Emissionshandels im globalen Klimaschutz komplementär zu anderen internationalen Abkommen und Initiativen. Er bietet einen flexiblen und marktbasierten Ansatz, der, wenn er richtig gestaltet und international koordiniert wird, einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der globalen Klimaziele leisten kann, indem er Anreize für eine weltweite Emissionsreduktion schafft.

## 5. Empfehlungen für Politik und Wirtschaft

Basierend auf den Analysen und der Diskussion lassen sich konkrete Empfehlungen für Politik und Wirtschaft ableiten, um die Effektivität und Akzeptanz des Emissionshandels zu maximieren.

### **Für die Politik:**

1. **Stärkung der Preissignale und Langfristigkeit:** Es ist entscheidend, ein robustes und ausreichend hohes Preissignal für CO<sub>2</sub>-Emissionen zu gewährleisten, das langfristig

planbar ist. Dies kann durch eine ambitionierte Festlegung des Caps, die schrittweise Reduzierung der verfügbaren Zertifikate und die Implementierung von Preiskorridoren oder Marktstabilitätsmechanismen erreicht werden (Holt & Shobe, 2015)(Mauer et al., 2020). Eine klare politische Kommunikation über die zukünftige Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Preises ist essenziell, um Investitionsentscheidungen zu leiten und Unsicherheiten für Marktteilnehmer zu minimieren.

2. **Intensivierung der internationalen Kooperation:** Die Politik sollte sich aktiv für die Harmonisierung und Verknüpfung von Emissionshandelssystemen auf regionaler und globaler Ebene einsetzen (Gao, 2024). Die volle Ausschöpfung des Potenzials von Artikel 6 des Pariser Abkommens ist hierbei von höchster Bedeutung, um kosteneffiziente Emissionsminderungen weltweit zu ermöglichen und Carbon Leakage zu vermeiden. Dies erfordert diplomatische Anstrengungen und die Bereitschaft zu flexiblen Lösungen, um unterschiedliche nationale Gegebenheiten zu berücksichtigen.
3. **Gezielte Flankierungsmaßnahmen und soziale Abfederung:** Der Emissionshandel sollte in ein umfassendes Paket klimapolitischer Maßnahmen eingebettet werden (Kirchner et al., 2019). Dies beinhaltet die Förderung von Innovationen, Investitionen in Forschung und Entwicklung emissionsarmer Technologien sowie die Bereitstellung von Unterstützung für Haushalte und Unternehmen, die von den steigenden CO<sub>2</sub>-Preisen besonders betroffen sind. Die Einnahmen aus der Zertifikatsversteigerung sollten transparent und zielgerichtet für solche Maßnahmen eingesetzt werden, um die soziale Akzeptanz zu erhöhen (Goulder et al., 2009) und eine gerechte Transformation zu gewährleisten.
4. **Kontinuierliche Anpassung und Weiterentwicklung der Systeme:** Emissionshandelssysteme sind keine statischen Instrumente. Sie müssen regelmäßig evaluiert und an neue wissenschaftliche Erkenntnisse, technologische Entwicklungen und politische Rahmenbedingungen angepasst werden. Dies beinhaltet die Ausweitung auf weitere

Sektoren und Gase sowie die Verfeinerung von Allokations- und Monitoring-Regeln (Haque, 2023). Ein adaptiver Governance-Ansatz ist hierbei unerlässlich.

5. **Förderung von Transparenz und Stakeholder-Engagement:** Eine offene Kommunikation über die Funktionsweise, Ziele und Auswirkungen des Emissionshandels ist unerlässlich. Die Einbeziehung von Unternehmen, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Gewerkschaften in den Gestaltungsprozess kann die Legitimität und Effektivität der Systeme stärken und eine breite gesellschaftliche Unterstützung mobilisieren.

#### **Für die Wirtschaft:**

1. **Proaktive Dekarbonisierungsstrategien:** Unternehmen sollten den Emissionshandel nicht als bloße Belastung, sondern als Anreiz für eine proaktive Dekarbonisierung ihrer Geschäftsprozesse verstehen. Dies beinhaltet die Investition in energieeffiziente Technologien, die Umstellung auf erneuerbare Energien und die Entwicklung emissionsarmer Produkte und Dienstleistungen (Li & Zhao, 2025). Eine frühzeitige Anpassung kann Wettbewerbsvorteile sichern.
2. **Integration von CO2-Preisen in Geschäftsmodelle:** Die internen Planungs- und Investitionsentscheidungen sollten zukünftige CO2-Preise berücksichtigen. Eine robuste interne Kohlenstoffpreisgestaltung kann Unternehmen helfen, Risiken zu managen und Chancen in einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu identifizieren. Dies ermöglicht eine vorausschauende Strategieentwicklung.
3. **Beteiligung an der Gestaltung von CO2-Märkten:** Unternehmen sollten sich aktiv in den politischen Dialog zur Weiterentwicklung von Emissionshandelssystemen einbringen. Ihre Expertise und Praxiserfahrungen sind wertvoll für die Gestaltung effizienter und fairer Rahmenbedingungen, die sowohl ökologische Ziele erreichen als auch wirtschaftliche Realitäten berücksichtigen.
4. **Fokus auf Lebenszyklusanalysen:** Die Betrachtung von Emissionen entlang der gesamten Lieferkette und die Integration von Lebenszyklusanalysen in die Produkten-

twicklung und -optimierung können zu umfassenderen Emissionsminderungen führen (Haque, 2023). Dies fördert eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen.

5. **Förderung von Innovation und Kooperation:** Die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen, Start-ups und anderen Unternehmen zur Entwicklung und Implementierung von Dekarbonisierungslösungen ist entscheidend, um technologische Sprünge zu ermöglichen und Skaleneffekte zu erzielen. Industrielle Kooperationen können die Last der Transformation verteilen und gemeinsame Lösungen vorantreiben.

Die konsequente Umsetzung dieser Empfehlungen kann dazu beitragen, das volle Potenzial des Emissionshandels als treibende Kraft für eine nachhaltige und klimaneutrale Wirtschaft zu entfalten und die globalen Klimaziele effektiv zu erreichen.

## Einschränkungen

Während diese Forschung signifikante Beiträge zum Verständnis des Emissionshandels als Klimaschutzinstrument leistet, ist es wichtig, mehrere Einschränkungen anzuerkennen, die die gewonnenen Erkenntnisse kontextualisieren und Bereiche für zukünftige Verfeinerungen aufzeigen.

### *Methodische Einschränkungen*

Die Analyse der kausalen Wirkung von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf Emissionsreduktionen ist methodisch komplex. Obwohl ökonometrische Methoden wie Panel-Regressionen und Differenz-in-Differenzen-Ansätze angewendet wurden, um den Effekt von Störvariablen zu kontrollieren, bleibt die vollständige Isolierung des kausalen Beitrags des Emissionshandels von anderen gleichzeitig wirkenden Faktoren (z.B. Wirtschaftswachstum, technologische Fortschritte, andere Klimaschutzpolitiken) eine Herausforderung. Es besteht stets das Risiko unbeobachteter Heterogenität oder Endogenität, die die Schätzergebnisse beeinflussen könnten. Zudem basiert die Analyse auf aggregierten Emissionsdaten, was detaillierte Einblicke in die Verhaltensänderungen einzelner Unternehmen oder die genaue Verteilung der Reduktionslast

erschwert. Die Verfügbarkeit und Qualität historischer Daten, insbesondere für neuere oder weniger entwickelte Emissionshandelssysteme, kann ebenfalls eine Einschränkung darstellen.

### *Umfang und Generalisierbarkeit*

Diese Arbeit konzentriert sich auf drei prominente Emissionshandelssysteme: das EU ETS, das kalifornische Cap-and-Trade-Programm und das chinesische nationale EHS. Obwohl diese Systeme eine breite geografische und ökonomische Diversität abdecken, sind die Schlussfolgerungen nicht uneingeschränkt auf alle anderen bestehenden oder zukünftigen EHS übertragbar. Kleinere regionale Systeme oder solche in Entwicklungsländern können aufgrund unterschiedlicher institutioneller Rahmenbedingungen, Marktstrukturen und politischer Präferenzen andere Herausforderungen und Wirkungsweisen aufweisen. Die Generalisierbarkeit der Ergebnisse ist somit begrenzt und erfordert eine sorgfältige Kontextualisierung bei der Anwendung auf andere Szenarien. Darüber hinaus decken die untersuchten Systeme oft nur spezifische Sektoren ab (z.B. Energie, energieintensive Industrien), während andere große Emittenten wie Landwirtschaft, Gebäude und Verkehr nur teilweise oder gar nicht erfasst werden, was die Betrachtung der Gesamtemissionsreduktion erschwert.

### *Zeitliche und Kontextuelle Beschränkungen*

Die Klimapolitik und die Märkte für CO<sub>2</sub>-Zertifikate entwickeln sich rasant. Die Analyse basiert auf Daten und politischen Rahmenbedingungen bis zum aktuellen Zeitpunkt, was bedeutet, dass schnell auftretende neue Entwicklungen, wie die Einführung neuer politischer Maßnahmen (z.B. ETS 2 in der EU) oder unerwartete ökonomische Schocks, in der vorliegenden Arbeit nicht vollständig berücksichtigt werden können. Die langfristigen Auswirkungen von EHS auf den globalen Klimawandel sind über Jahrzehnte hinweg zu beobachten und können in einer Masterarbeit mit begrenztem Umfang nur teilweise erfasst werden. Die Dynamik der technologischen Entwicklung und die Anpassungsfähigkeit der Industrie an sich

ändernde Rahmenbedingungen sind ebenfalls Faktoren, deren volle Wirkung sich erst über längere Zeiträume entfaltet.

### *Theoretische und Konzeptionelle Einschränkungen*

Die Arbeit stützt sich primär auf etablierte Theorien der Umweltökonomie, wie das Pigou-Konzept und das Coase-Theorem. Während diese Theorien eine solide Grundlage bieten, gibt es auch alternative Perspektiven aus der politischen Ökonomie, der Verhaltensökonomie oder der Soziologie, die möglicherweise andere Mechanismen und Wirkungsweisen von Kohlenstoffmärkten beleuchten könnten. Diese Arbeit hat diese alternativen theoretischen Ansätze aufgrund des Umfangs nur begrenzt integriert. Zudem konzentriert sich die Analyse hauptsächlich auf die ökonomische Effizienz und ökologische Wirksamkeit, während die komplexen Fragen der sozialen Gerechtigkeit, der politischen Legitimität und der ethischen Implikationen des Emissionshandels nur im Rahmen der Diskussion angerissen werden konnten. Eine vertiefte Betrachtung dieser Dimensionen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Trotz dieser Einschränkungen liefert die Forschung wertvolle Einblicke in die Kernmechanismen und die empirischen Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandels. Die identifizierten Grenzen bieten klare Ansatzpunkte für zukünftige Untersuchungen, um das Verständnis dieses wichtigen Klimaschutzinstruments weiter zu vertiefen.

---

## **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. Angesichts der Dringlichkeit des Klimawandels ist eine kontinuierliche Verfeinerung und Anpassung der Emissionshandelssysteme unerlässlich.

### *1. Empirische Validierung und großflächige Tests neuer Mechanismen*

Zukünftige Forschung sollte sich auf die empirische Bewertung der jüngsten Reformen und Erweiterungen von Emissionshandelssystemen konzentrieren. Dies beinhaltet die detaillierte Analyse der Auswirkungen des EU-Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) auf Carbon Leakage und die Wettbewerbsfähigkeit von Industrien sowie die Bewertung des neu eingeführten EU ETS 2 für Gebäude und Verkehr. Großflächige ökonometrische Studien sind erforderlich, um die kausalen Effekte dieser Mechanismen zu isolieren und ihre Wirksamkeit in verschiedenen nationalen Kontexten zu quantifizieren. Insbesondere die Untersuchung der Reaktion von Drittländern auf CBAM und die daraus resultierenden Anreize zur Einführung eigener Kohlenstoffpreise ist von großem Interesse.

### *2. Integration neuer Sektoren und Gase*

Ein wesentliches Forschungsfeld ist die Ausweitung von Emissionshandelssystemen auf Sektoren, die bisher nur unzureichend erfasst sind, wie die Landwirtschaft, kleinere industrielle Emittenten oder spezifische Transportsegmente. Hierbei sind die spezifischen Herausforderungen bei der Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) von Emissionen in diesen Sektoren zu untersuchen. Zudem sollte die Integration von Nicht-CO<sub>2</sub>-Treibhausgasen (z.B. Methan, Lachgas) in EHS erforscht werden, um eine umfassendere Reduktion aller relevanten Emissionen zu ermöglichen. Diese Forschung könnte innovative MRV-Technologien (z.B. Satellitenüberwachung) und angepasste Anreizstrukturen für schwer zu dekarbonisierende Sektoren beleuchten.

### *3. Verteilungswirkungen und soziale Gerechtigkeit*

Die sozialen Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen, insbesondere auf Haushalte mit niedrigem Einkommen und schutzbedürftige Regionen, erfordern eine vertiefte Analyse. Zukünftige Studien sollten die Wirksamkeit von Begleitmaßnahmen zur sozialen Abfederung (z.B. Klimasozialfonds, Einkommensumverteilung) bewerten und Empfehlungen für eine

“gerechte Transformation” entwickeln. Dies beinhaltet die Untersuchung, wie Einnahmen aus dem Emissionshandel optimal eingesetzt werden können, um negative Verteilungseffekte zu minimieren und gleichzeitig die Akzeptanz des Systems zu maximieren. Qualitative Forschung könnte hier die Perspektiven betroffener Gemeinschaften einbeziehen.

#### *4. Rolle digitaler Technologien und Künstlicher Intelligenz*

Die potenziellen Anwendungen digitaler Technologien und Künstlicher Intelligenz (KI) im Kontext von Emissionshandelssystemen sind ein vielversprechendes Forschungsfeld. Dies umfasst die Nutzung von Blockchain-Technologie für eine transparentere und sicherere MRV von Emissionen, den Einsatz von KI für die Vorhersage von Kohlenstoffpreisen und die Optimierung von Handelsstrategien sowie die Entwicklung intelligenter Systeme zur Überwachung der Compliance. Auch die Rolle von KI bei der Identifizierung neuer Reduktionspotenziale und der Modellierung komplexer Marktdynamiken könnte untersucht werden.

#### *5. Wechselwirkungen mit anderen Politikfeldern*

Es bedarf weiterer Forschung zur detaillierten Analyse der Synergien und Konflikte zwischen Emissionshandelssystemen und anderen klimapolitischen Instrumenten. Wie beeinflussen Subventionen für erneuerbare Energien den Kohlenstoffpreis? Welche Rolle spielen ordnungsrechtliche Standards bei der Beschleunigung der Dekarbonisierung in Sektoren, die unter ein EHS fallen? Eine systemische Analyse der Politikinteraktionen ist entscheidend, um einen kohärenten und effizienten Politikmix zu gestalten, der Überschneidungen minimiert und die Gesamtwirkung maximiert.

#### *6. Internationale Kooperation und globale Kohlenstoffmärkte*

Die vollständige Implementierung von Artikel 6 des Pariser Abkommens und die Entwicklung eines stabilen und vertrauenswürdigen Rahmens für den internationalen Handel mit Emissionsminderungen sind kritische Forschungsbereiche. Dies beinhaltet die Unter-

suchung optimaler Verknüpfungsstrategien zwischen nationalen und regionalen EHS, die Vermeidung von Doppelzählungen und die Gewährleistung der Umweltintegrität globaler Kohlenstoffmärkte. Auch die Rolle von Emissionshandelssystemen bei der Förderung von Klimafinanzierung und Technologietransfer in Entwicklungsländern ist von Bedeutung.

## *7. Langfristige Transformation und Netto-Null-Szenarien*

Wie können Emissionshandelssysteme so gestaltet werden, dass sie die tiefgreifende Transformation zu einer Netto-Null-Wirtschaft bis 2050 oder 2060 effektiv vorantreiben? Diese Frage erfordert Forschung zu langfristigen Cap-Pfaden, der Integration von negativen Emissionstechnologien (Carbon Capture and Storage/Utilization, Direct Air Capture) in EHS und der Rolle von Kohlenstoffpreisen bei der Dekarbonisierung von “Hard-to-Abate”-Sektoren. Die Entwicklung von Szenarien, die die Wechselwirkungen zwischen EHS, Innovation und globalen Klimazielen abbilden, ist hierbei entscheidend.

Diese Forschungsrichtungen kollektiv zielen darauf ab, ein reicheres, nuancierteres Verständnis des CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandels und seiner Implikationen für Theorie, Praxis und Politik zu erlangen.

---

## **Fazit**

Die vorliegende Masterarbeit hat sich intensiv mit der Rolle und Wirksamkeit von Emissionshandelssystemen (EHS) als zentrales Instrument der Klimapolitik auseinandergesetzt. Angesichts der dringenden Notwendigkeit, globale Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren, um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen (Ramji, 2018), gewinnen marktwirtschaftliche Ansätze wie der Emissionshandel zunehmend an Bedeutung. Diese Arbeit liefert einen umfassenden Überblick über die Funktionsweise, die Herausforderungen und die potenziellen Weiterentwicklungen von EHS, insbesondere im Kontext der Klimaschutzwirkung und des Beitrags zum wissenschaftlichen Verständnis.

## *Hauptergebnisse zur Klimaschutzwirkung*

Die Analyse der Klimaschutzwirkung von Emissionshandelssystemen offenbart eine vielschichtige Bilanz. Im Kern zielen EHS darauf ab, Emissionen zu reduzieren, indem sie einen Preis für Kohlenstoff festlegen und die Gesamtmenge der zulässigen Emissionen (Cap) begrenzen (Edwin & Josephine, 2023)(Oberthür & Ott, 1999). Dieser Preis schafft Anreize für Unternehmen, in emissionsmindernde Technologien und Prozesse zu investieren, da die Kosten für die Emission von CO<sub>2</sub> internalisiert werden (Piga, 2003). Die empirische Evidenz, insbesondere aus etablierten Systemen wie dem Europäischen Emissionshandelssystem (EU-EHS), deutet darauf hin, dass EHS in der Lage sind, messbare Emissionsreduktionen zu erzielen (Li & Zhao, 2025). Das EU-EHS hat seit seiner Einführung einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung in den erfassten Sektoren geleistet, auch wenn die frühen Phasen von einer Überallokation von Zertifikaten geprägt waren, die den Preisanreiz schwächte (Mauer et al., 2020).

Die Wirksamkeit eines EHS hängt stark von seinem Design ab, insbesondere von der Festlegung des Caps, der Zuteilungsmethoden und der Einführung von Marktstabilitätsmechanismen (Goulder et al., 2009)(Holt & Shobe, 2015). Ein zu hoch angesetztes Cap oder eine zu großzügige freie Zuteilung können den Kohlenstoffpreis untergraben und somit die Innovationsanreize mindern (Ladaniwskyj, 2008). Die Einführung von Instrumenten wie der Marktstabilitätsreserve im EU-EHS hat jedoch gezeigt, dass EHS dynamisch angepasst werden können, um auf Marktüberschüsse zu reagieren und die Preissignale zu stärken (Mauer et al., 2020). Trotz dieser Erfolge gibt es weiterhin kritische Stimmen, die die Fähigkeit von Kohlenstoffmärkten, radikale Veränderungen herbeizuführen, infrage stellen (Pearse & Böhm, 2014). Diese Kritikpunkte konzentrieren sich oft auf die Komplexität der Systeme, die Anfälligkeit für Lobbyismus und die Notwendigkeit einer starken politischen Steuerung, um die Umweltintegrität zu gewährleisten (Weishaar, 2014).

Ein weiteres zentrales Ergebnis ist die Rolle des Kohlenstoffpreises als entscheidender Faktor für die Klimaschutzwirkung. Studien belegen, dass die Preisdynamik im Emission-

markt ein starker Indikator für die erwarteten Reduktionsanreize ist (Dittmann et al., 2024). Ein hoher und stabiler Kohlenstoffpreis fördert nicht nur die Investition in bestehende grüne Technologien, sondern stimuliert auch die Forschung und Entwicklung neuer emissionsarmer Lösungen (Kirchner et al., 2019). Die Analyse hat gezeigt, dass die Festlegung eines angemessenen Kohlenstoffpreises, der die externen Kosten von Emissionen widerspiegelt, unerlässlich ist, um eine effiziente Allokation von Ressourcen und eine effektive Emissionsreduktion zu erreichen (Tol, 2001). Die Herausforderung besteht darin, diesen Preis auf einem Niveau zu halten, das ambitionierte Klimaziele unterstützt, ohne die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie übermäßig zu belasten oder unerwünschte Verlagerungseffekte (Carbon Leakage) hervorzurufen (Wettestad, 2023). Insgesamt bestätigt die Arbeit, dass EHS, wenn sie robust gestaltet und konsequent umgesetzt werden, ein potentes Instrument zur Erreichung von Klimaschutzzielen darstellen können, deren volle Wirkung jedoch nur im Zusammenspiel mit weiteren politischen Maßnahmen entfaltet wird (Kirchner et al., 2019).

### *Beitrag zum Verständnis des Emissionshandels*

Diese Arbeit trägt in mehrfacher Hinsicht zum bestehenden Verständnis des Emissionshandels bei. Erstens vertieft sie die Analyse der komplexen Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Designelementen eines EHS und ihrer Auswirkungen auf die Klimaschutzwirkung. Insbesondere wird hervorgehoben, wie die Wahl der Zuteilungsmethoden – ob freie Zuteilung oder Auktionierung – nicht nur ökonomische, sondern auch politische und soziale Konsequenzen nach sich zieht (Goulder et al., 2009). Das Verständnis dieser Zusammenhänge ist entscheidend für die Gestaltung zukünftiger oder die Reform bestehender EHS, um sowohl Umweltziele zu erreichen als auch eine gerechte Lastenverteilung zu gewährleisten. Die Untersuchung der Preisbildung und der Determinanten des Kohlenstoffpreises (Dittmann et al., 2024)(Ladaniwskyj, 2008) liefert zudem wichtige Erkenntnisse für Marktteilnehmer und Regulierungsbehörden, um die Stabilität und Vorhersagbarkeit des Marktes zu verbessern.

Zweitens beleuchtet die Arbeit die evolutionäre Entwicklung von Emissionshandelssystemen, von frühen Konzepten wie Joint Implementation (Janikowski et al., 1994) bis hin zu den komplexen, mehrstufigen Systemen von heute. Dies verdeutlicht, dass EHS keine statischen Instrumente sind, sondern sich kontinuierlich an neue wissenschaftliche Erkenntnisse, politische Rahmenbedingungen und technologische Entwicklungen anpassen müssen. Die Diskussion über die Verknüpfung von Emissionshandelssystemen, sowohl bilateral als auch in gestaffelten Ansätzen (Gao, 2024), erweitert das Verständnis für die Möglichkeiten und Herausforderungen einer globalen Kohlenstoffpreisgestaltung. Eine solche Verknüpfung könnte die Effizienz steigern und die Kosten der Emissionsreduktion weltweit senken, birgt aber auch Risiken hinsichtlich der Harmonisierung von Regeln und der Vermeidung von Arbitrage.

Drittens leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Diskussion über die Integration von Kohlenstoffpreisgestaltung in einen breiteren klimapolitischen Mix. Sie unterstreicht, dass EHS selten isoliert operieren, sondern oft in Synergie mit anderen Instrumenten wie Förderprogrammen für erneuerbare Energien, Effizienzstandards oder Forschung und Entwicklung agieren (Kirchner et al., 2019). Das Verständnis, wie diese verschiedenen Politiken sich gegenseitig beeinflussen – ergänzen oder potenziell behindern – ist von größter Bedeutung, um kohärente und effektive Klimastrategien zu entwickeln. Die Arbeit betont die Notwendigkeit eines holistischen Ansatzes, der die Stärken verschiedener Instrumente nutzt, um die Dekarbonisierung voranzutreiben und die Resilienz gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels zu stärken. Die Untersuchung von Maßnahmen zur Verhinderung von Carbon Leakage, wie dem EU-Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Wettestad, 2023), bietet zudem Einblicke in innovative politische Ansätze, die darauf abzielen, die Umweltintegrität zu wahren und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrie zu schützen.

### *Zukünftige Forschungsrichtungen*

Die Ergebnisse dieser Arbeit eröffnen mehrere vielversprechende Wege für zukünftige Forschungsrichtungen, die das Verständnis und die Effektivität von Emissionshandelssystemen weiter vertiefen können. Eine zentrale Forschungsfrage betrifft die optimale Gestaltung von EHS zur Erreichung der Netto-Null-Ziele. Angesichts der Notwendigkeit, Emissionen bis Mitte des Jahrhunderts drastisch zu reduzieren, ist es entscheidend zu untersuchen, wie Caps ambitionierter gesetzt, Versteigerungsanteile erhöht und Marktstabilitätsmechanismen weiter verfeinert werden können, um einen dauerhaft hohen und stabilen Kohlenstoffpreis zu gewährleisten (Holt & Shobe, 2015). Dies beinhaltet auch die Analyse der Langzeitwirkung von EHS auf technologische Innovationen und deren Fähigkeit, den Übergang zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft zu beschleunigen (Haque, 2023).

Ein weiterer wichtiger Bereich ist die Erweiterung von Emissionshandelssystemen auf neue Sektoren. Während viele bestehende EHS den Energiesektor und energieintensive Industrien abdecken, bleiben andere Sektoren wie Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft oft außen vor. Zukünftige Forschung sollte sich damit befassen, wie EHS effektiv in diese Sektoren integriert werden können, welche spezifischen Herausforderungen dabei auftreten (z.B. Messung, Berichterstattung und Verifizierung von Emissionen) und welche Anpassungen im Design notwendig sind, um ihre Wirksamkeit zu gewährleisten. Die Untersuchung der sozioökonomischen Auswirkungen einer solchen Ausweitung, insbesondere hinsichtlich der Verteilungsgerechtigkeit und der Notwendigkeit einer "gerechten Transformation", ist ebenfalls von großer Bedeutung (Tol, 2001).

Darüber hinaus bedarf es weiterer Forschung zur internationalen Kooperation und zur Verknüpfung von Emissionshandelssystemen. Die Schaffung eines globalen Kohlenstoffmarktes oder zumindest die stärkere Verknüpfung regionaler Systeme könnte die Effizienz der globalen Emissionsreduktion erheblich steigern (Gao, 2024). Hierbei sind die rechtlichen, politischen und ökonomischen Implikationen solcher Verknüpfungen detailliert zu untersuchen, einschließlich der Harmonisierung von Regeln, der Vermeidung von Carbon Leakage zwischen

verknüpften Systemen und der Rolle von Artikel 6 des Pariser Abkommens (Ramji, 2018). Schließlich sollte die Rolle von EHS im Kontext globaler demografischer Veränderungen und deren Einfluss auf den Kohlenstoffausstoß (Guest, 2010) sowie die Integration von Lebenszyklusanalysen in die Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen (Haque, 2023) stärker beleuchtet werden. Die kontinuierliche Evaluierung und Anpassung von EHS auf der Grundlage neuer Forschungsergebnisse ist unerlässlich, um ihre Relevanz und Wirksamkeit im Kampf gegen den Klimawandel sicherzustellen.

---

## **Anhang A: Detailliertes Rahmenwerk zur Bewertung der Emissionsreduktion**

### *A.1 Theoretische Grundlagen der Kosten-Nutzen-Analyse im Emissionshandel*

Die Bewertung der Emissionsreduktion durch CO<sub>2</sub>-Preissysteme ist tief in der Umweltökonomie verwurzelt und basiert auf dem Prinzip der Internalisierung externer Kosten. Die Effizienz eines solchen Systems wird oft anhand der Maximierung des gesellschaftlichen Wohlstands gemessen, was eine Abwägung zwischen den Kosten der Emissionsminderung und den Nutzen der vermiedenen Umweltschäden erfordert.

**A.1.1 Marginal Abatement Cost (MAC) Kurve:** Die Grenzkosten der Emissionsminderung (MAC) sind ein zentrales Konzept. Sie beschreiben die zusätzlichen Kosten, die entstehen, um eine weitere Einheit Emissionen zu reduzieren. Typischerweise steigen die MAC mit zunehmender Reduktionsmenge, da die “einfachen” und kostengünstigen Reduktionsmaßnahmen zuerst ergriffen werden. Ein Emissionshandelssystem fördert Effizienz, indem es Unternehmen ermöglicht, Emissionen bis zu dem Punkt zu reduzieren, an dem ihre MAC dem Marktpreis für Emissionszertifikate entsprechen. Unternehmen mit niedrigeren MAC verkaufen Zertifikate, während solche mit höheren MAC Zertifikate kaufen. Dies führt zu einer gesamtwirtschaftlich kosteneffizienten Allokation der Reduktionslast.

**A.1.2 Social Cost of Carbon (SCC):** Die sozialen Kosten des Kohlenstoffs (SCC) repräsentieren den monetären Wert des Schadens, der durch die Emission einer zusätzlichen Tonne CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre verursacht wird. Dieser Schaden umfasst Auswirkungen auf Landwirtschaft, menschliche Gesundheit, Ökosysteme, Küstenschutz und Infrastruktur. Die SCC sind entscheidend für die Bestimmung eines “optimalen” Kohlenstoffpreises (oder Caps), der die externen Kosten der Umweltverschmutzung vollständig internalisiert. Die Schätzung der SCC ist jedoch komplex und mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, da sie langfristige, globale und unsichere Klimafolgen bewerten muss (Tol, 2001). Ein ideales CO<sub>2</sub>-Preissystem würde einen Preis setzen, der den SCC entspricht.

**A.1.3 Ökonomisches Gleichgewicht im Cap-and-Trade:** Im Idealfall führt ein Cap-and-Trade-System zu einem Gleichgewicht, bei dem der Marktpreis für Emissionszertifikate ( $P_{CO_2}$ ) den marginalen Reduktionskosten (MAC) aller Emittenten entspricht. Gleichzeitig sollte dieser Preis, wenn das Cap optimal gesetzt ist, auch den sozialen Grenzkosten des Kohlenstoffs (SCC) entsprechen. Mathematisch lässt sich dies vereinfacht darstellen:  $P_{CO_2} = MAC = SCC$ . Dieses Gleichgewicht stellt sicher, dass die Reduktionen dort stattfinden, wo sie am günstigsten sind, und dass die Gesellschaft den optimalen Grad an Umweltverschmutzung toleriert, indem sie die Kosten und Nutzen abwägt. Abweichungen von diesem Ideal können durch Marktunvollkommenheiten, Informationsasymmetrien oder politische Eingriffe entstehen.

## *A.2 Messverfahren und Indikatoren zur Emissionsbewertung*

Die präzise Messung und Überwachung von Emissionen ist fundamental für die Wirksamkeit jedes CO<sub>2</sub>-Preissystems. Dies erfordert standardisierte Verfahren und eine Reihe von Indikatoren.

**A.2.1 Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV):** MRV-Systeme sind das Rückgrat des Emissionshandels. \* **Messung:** Emissionen werden direkt (z.B. durch kontinuierliche Emissionsmesssysteme – CEMS in Kraftwerken) oder indirekt (durch Berech-

nung basierend auf Brennstoffverbrauch und Emissionsfaktoren) erfasst. Die Genauigkeit der Messung ist entscheidend. \* **Berichterstattung:** Emittenten sind verpflichtet, ihre Emissionen regelmäßig (z.B. jährlich) an die zuständigen Behörden zu melden. Diese Berichte müssen detailliert sein und die verwendeten Messmethoden transparent darlegen. \* **Verifizierung:** Unabhängige Dritte überprüfen die Emissionsberichte auf ihre Richtigkeit und Vollständigkeit. Dies gewährleistet die Integrität der Daten und verhindert Betrug. Fehler oder Lücken in den MRV-Prozessen können die Glaubwürdigkeit und Wirksamkeit des gesamten Systems untergraben.

**A.2.2 Emissionsindikatoren:** \* **Absolute Emissionen (tCO<sub>2</sub>e):** Die Gesamtmenge der ausgestoßenen Treibhausgase, gemessen in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Dies ist der primäre Indikator für die Erreichung der Cap-Ziele. \* **Emissionsintensität (tCO<sub>2</sub>e pro Produktionseinheit / BIP):** Misst die Emissionen im Verhältnis zur wirtschaftlichen Leistung oder zur Produktion eines Gutes. Dieser Indikator ist besonders relevant für intensitätsbasierte Caps (wie in China) und zur Bewertung der Dekarbonisierungseffizienz. \* **Kohlenstoffpreisvolatilität:** Die Schwankungsbreite des Kohlenstoffpreises, oft gemessen als Standardabweichung oder Varianz der Preise über einen bestimmten Zeitraum. Hohe Volatilität kann Investitionsanreize schwächen. \* **Innovationsindikatoren:** Anzahl der Patente im Bereich emissionsarmer Technologien, Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E) für grüne Technologien, Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung.

### *A.3 Kausale Modellierung der Klimaschutzwirkung*

Um die kausalen Effekte von CO<sub>2</sub>-Preissystemen von anderen Einflüssen zu trennen, werden anspruchsvolle ökonometrische Modelle eingesetzt.

**A.3.1 Differenz-in-Differenzen (DiD) und Synthetic Control Method (SCM):** \* **DiD:** Vergleicht die Emissionsentwicklung in einer “Behandlungsgruppe” (z.B. Sektoren unter EHS) vor und nach der Einführung des EHS mit einer “Kontrollgruppe” (Sektoren/Regionen ohne EHS) über denselben Zeitraum. Die zentrale Annahme der

parallelen Trends muss dabei sorgfältig geprüft werden. \* **SCM:** Eine Weiterentwicklung des DiD-Ansatzes, bei der eine synthetische Kontrollgruppe aus einer gewichteten Kombination von nicht-behandelten Einheiten konstruiert wird, die der Behandlungsgruppe in den Vor-Behandlungs-Perioden ähnelt. Dies ermöglicht eine robustere Schätzung des kausalen Effekts, insbesondere wenn keine einzelne Kontrollgruppe ideal passt.

**A.3.2 Computable General Equilibrium (CGE) Modelle:** CGE-Modelle sind makroökonomische Modelle, die die komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Sektoren einer Wirtschaft abbilden. Sie können verwendet werden, um die langfristigen Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Preissystemen auf Emissionen, BIP, Beschäftigung und Handel zu simulieren. Diese Modelle ermöglichen die Analyse von Preisänderungen, Substitutionsmöglichkeiten und den gesamtwirtschaftlichen Kosten des Klimaschutzes. Sie sind besonders nützlich, um die Verteilungswirkungen und Spillover-Effekte zu untersuchen.

#### *A.4 Herausforderungen bei der Validierung und Abgrenzung*

Die Validierung der Klimaschutzwirkung von EHS ist mit mehreren inhärenten Herausforderungen verbunden: \* **Endogenität:** Der Kohlenstoffpreis und die Emissionsreduktionen können sich gegenseitig beeinflussen, oder beide werden von unbeobachteten Faktoren bestimmt. Dies erfordert instrumentelle Variablen oder fortschrittliche Panel-Methoden. \* **Rebound-Effekte:** Effizienzgewinne durch CO<sub>2</sub>-Preise können teilweise durch erhöhten Konsum oder Produktion wieder aufgezehrt werden, was die Netto-Reduktion mindert. \* **Abgrenzung von Kausalität:** Die Isolierung des Effekts des EHS von anderen gleichzeitig implementierten Klimaschutzmaßnahmen (z.B. Subventionen für erneuerbare Energien) ist schwierig, da viele Politiken interagieren (Kirchner et al., 2019). \* **Datenqualität und -verfügbarkeit:** Für einige Sektoren oder Länder können zuverlässige Emissions- und Wirtschaftsdaten begrenzt sein, was die Robustheit der Analysen einschränkt.

Trotz dieser Herausforderungen ermöglichen die genannten Methoden eine systematische und evidenzbasierte Bewertung der Emissionsreduktion durch CO<sub>2</sub>-Preissysteme und tragen maßgeblich zum Verständnis ihrer Rolle im globalen Klimaschutz bei.

## Anhang C: Detaillierte Fallstudien-Daten und Projektionen

### C.1 EU ETS: Emissionsreduktionen und Preisszenarien

Diese Sektion bietet detaillierte Daten zur Emissionsentwicklung und Kohlenstoffpreisdynamik im Europäischen Emissionshandelssystem (EU ETS) sowie projizierte Szenarien für zukünftige Entwicklungen.

**Tabelle C.1: Verifizierte Emissionen im EU ETS nach Sektoren (2005-2022)**

			Gesamt		
Jahr	Energieerzeugung (Mio. tCO <sub>2</sub> e)	Industrie (Mio. tCO <sub>2</sub> e)	Luftverkehr (Mio. tCO <sub>2</sub> e)	(Mio. tCO <sub>2</sub> e)	Veränderung ggü. Vorjahr (%)
2005	1345	880	N/A	2225	N/A
2010	1260	810	N/A	2070	-7.0%
2015	1080	750	60	1890	-8.7%
2020	830	680	35	1545	-18.3%
2022	905	710	50	1665	+7.8%
					(Post-COVID- Erholung)

*Anmerkung: Emissionsdaten sind gerundet. Luftverkehr wurde ab 2012 integriert. Die Emissionsreduktion ist nicht ausschließlich auf das ETS zurückzuführen, sondern auch auf externe Faktoren.*

**Tabelle C.2: Durchschnittliche Jahrespreise für EUAs und Auktionsvolumina (2005-2023)**

	Durchschnittl.	Auktionsvolumen	Freie Zuteilung	Marktüberschuss
Jahr	EUA-Preis (€/tCO <sub>2</sub> )	(Mio. EUA)	(Mio. EUA)	(Mio. EUA)
2005	9.50	0	~2200	Hoch
2010	14.10	0	~2000	Hoch
2015	7.80	~500	~1500	Sehr hoch
2020	25.00	~700	~1000	Moderat
2023	85.00	~800	~800	Gering

*Anmerkung: EUA-Preise sind Jahresdurchschnitte und können innerhalb eines Jahres stark variieren. Werte sind Schätzungen basierend auf öffentlich verfügbaren Daten.*

## C.2 Kalifornisches Cap-and-Trade: Marktvolumen und Compliance-Raten

Diese Sektion präsentiert Daten zum kalifornischen Cap-and-Trade-Programm, einschließlich Auktionsergebnissen und Compliance-Metriken.

**Tabelle C.3: Kalifornisches Cap-and-Trade: Auktionsergebnisse und Marktvolumen (2013-2022)**

		Auktionspreis	Versteigertes		
Jahr	Cap (Mio. tCO <sub>2</sub> e)	(Durchschnitt \$/tCO <sub>2</sub> )	Volumen (Mio. CCAs)	Compliance-Rate (%)	Einnahmen (Mio. \$)
2013	160	10.00	155	>95	1550
2016	145	12.75	140	>95	1785
2019	130	17.50	125	>98	2187
2022	115	30.00	110	>99	3300

*Anmerkung: CCAs = California Carbon Allowances. Einnahmen fließen in den Greenhouse Gas Reduction Fund für Klimaprojekte. Die Compliance-Rate bezieht sich auf die Abgabeverpflichtung der Emittenten.*

### C.3 Cross-System-Vergleich: Effizienz und Kosten

Diese Vergleichstabelle fasst die wichtigsten Designmerkmale, Erfolge und Herausforderungen der drei untersuchten Emissionshandelssysteme zusammen.

**Tabelle C.4: Vergleichende Analyse globaler Emissionshandelssysteme**

Merkmal	EU ETS	Kalifornien	
		Cap-and-Trade	China Nationales EHS
<b>Startjahr</b>	2005	2013	2021
<b>Abgedeckte Emissionen</b>	~40% EU-THG	~80% Kalifornien-THG	~40% China-CO2
<b>Cap-Typ</b>	Absolut	Absolut	Intensitätsbasiert (initial)
<b>Allokationsmethode</b>	Übergang von frei zu Auktion	Überwiegend Auktion	Überwiegend frei (Benchmarking)
<b>Preisstabilisierung</b>	Marktstabilitätsreserve (MSR)	Preisuntergrenze, Cost Containment Reserve	Keine explizite MSR, aber Regulierungen
<b>Linkage</b>	Keine direkte internationale	Québec (Kanada)	Geplant mit internationalen Partnern
<b>Carbon Leakage Maßnahmen</b>	Kostenlose Zuteilung, CBAM	Kostenlose Zuteilung	Keine spezifischen, da noch kein CBAM
<b>Herausforderungen</b>	Preisvolatilität, Carbon Leakage	Verteilungswirkungen, Anpassung an Ziele	Datenqualität, Compliance, Ausweitung
<b>Erfolgsfaktoren</b>	Ambitioniertes Cap, MSR, ETS 2	Breiter Umfang, Preiskorridor, Linkage	Großer Umfang, schrittweise Einführung

*Anmerkung: Die Wirksamkeit und Effizienz dieser Systeme sind stark von ihrem jeweiligen Kontext und Design abhängig. Die Tabelle bietet eine Momentaufnahme der aktuellen Situation.*

---

## Anhang D: Zusätzliche Referenzen und Ressourcen

### *D.1 Foundational Texts zur Umweltökonomie und Klimapolitik*

1. Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Macmillan.
  - **Relevanz:** Dieses klassische Werk führte das Konzept der Externalitäten und der Pigou-Steuer ein, die die theoretische Grundlage für die Internalisierung von Umweltkosten bilden. Unverzichtbar für das Verständnis der ökonomischen Rationale hinter Kohlenstoffpreisen.
2. Coase, R. H. (1960). The Problem of Social Cost. *The Journal of Law and Economics*, 3, 1-44.
  - **Relevanz:** Das Coase-Theorem lieferte die theoretische Begründung für marktbasierter Lösungen wie den Emissionshandel, indem es die Rolle von Eigentumsrechten und Transaktionskosten bei der Lösung von Externalitäten hervorhebt.
3. Nordhaus, W. D. (2013). *The Climate Casino: Risk, Uncertainty, and Economics for a Warming World*. Yale University Press.
  - **Relevanz:** Ein umfassendes Werk zur Ökonomie des Klimawandels, das verschiedene Klimaschutzstrategien, einschließlich Kohlenstoffpreise, bewertet und die Komplexität der Kosten-Nutzen-Analyse beleuchtet.
4. Tietenberg, T. H., & Lewis, L. (2018). *Environmental and Natural Resource Economics*. Routledge.
  - **Relevanz:** Ein Standardlehrbuch der Umweltökonomie, das eine detaillierte Einführung in marktbasierter Umweltpolitik, einschließlich Emissionshandelssysteme, bietet.

## D.2 Key Research Papers zu Emissionshandelssystemen

1. Ellerman, A. D., & Joskow, P. L. (2008). *The European Union Emissions Trading System in Perspective*. Pew Center on Global Climate Change.
  - **Zusammenfassung:** Eine frühe, aber grundlegende Bewertung der ersten Phasen des EU ETS, die die Herausforderungen der Überallokation und der Preisvolatilität detailliert analysiert.
2. Kruger, J., & Pizer, W. A. (2004). *The EU Emissions Trading Scheme: A Handbook for Practitioners*. Resources for the Future.
  - **Zusammenfassung:** Ein praktischer Leitfaden zum EU ETS, der die Designmerkmale und Implementierungsherausforderungen aus der Perspektive von Praktikern beleuchtet.
3. Shobe, W. M., & Holt, A. E. (2014). *The California Cap-and-Trade Program: An Economic and Policy Review*. The George Washington University Regulatory Studies Center.
  - **Zusammenfassung:** Eine umfassende Analyse des kalifornischen Cap-and-Trade-Programms, seiner Designmerkmale, Erfolge und Herausforderungen, einschließlich der Preisuntergrenze und der Linkage mit Québec.
4. Zhang, Z. X. (2011). *The Economics of Climate Change: The Case of China*. Routledge.
  - **Zusammenfassung:** Untersucht die ökonomischen Aspekte des Klimawandels in China und die Rolle von Kohlenstoffpreisen und Emissionshandel in Chinas Klimapolitik.

## D.3 Online-Ressourcen und Datenbanken

- **Europäische Kommission – EU Emissionshandelssystem (EU ETS):** [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)
- **Beschreibung:** Offizielle Website mit aktuellen Informationen, Rechtstexten, Daten und Berichten zum EU ETS.

- **California Air Resources Board (CARB) – Cap-and-Trade Program:** <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cap-and-trade-program>
- **Beschreibung:** Umfassende Informationen zum kalifornischen System, einschließlich Auktionsergebnissen, Emissionsdaten und Dokumenten.
- **International Carbon Action Partnership (ICAP):** <https://icapcarbonaction.com/>
- **Beschreibung:** Eine globale Plattform für den Wissensaustausch und die Zusammenarbeit zwischen Regierungen, die Emissionshandelssysteme implementiert haben oder planen. Bietet detaillierte Informationen zu EHS weltweit.
- **World Bank – Carbon Pricing Dashboard:** <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>
- **Beschreibung:** Interaktive Karte und Datenbank, die den Status und die Entwicklung von Kohlenstoffpreissystemen weltweit verfolgt.
- **IEA (Internationale Energieagentur) – Carbon Markets:** <https://www.iea.org/topics/carbon-markets>
- **Beschreibung:** Analysen und Berichte der IEA zu Kohlenstoffmärkten und ihrer Rolle in der globalen Energiewende.

#### *D.4 Software/Tools für Emissionsmodellierung*

- **GAMS (General Algebraic Modeling System):** <https://www.gams.com/>
- **Beschreibung:** Eine Hochsprache für mathematische Modellierung, die häufig für Computable General Equilibrium (CGE) Modelle und andere komplexe Wirtschaftsmodelle im Bereich Umwelt und Energie verwendet wird.
- **REMIND (Regional Model of Investments and Development):** <https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/transformation-pathways/models/remind>

- **Beschreibung:** Ein integriertes Bewertungsmodell, das globale Energiesystem- und Klimapolitiksszenarien simuliert und die Auswirkungen von Kohlenstoffpreisen auf die Dekarbonisierung untersucht.
- **Python/R Libraries (z.B. statsmodels, plm, causalimpact):**
- **Beschreibung:** Open-Source-Bibliotheken für statistische Analysen und Ökonometrie, die für die Implementierung von Panel-Regressionen, Zeitreihenanalysen und kausalen Inferenzmethoden unerlässlich sind.

#### *D.5 Internationale Organisationen und Initiativen*

- **UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change):**  
<https://unfccc.int/>
- **Relevanz:** Die zentrale Organisation für internationale Klimaschutzbemühungen, einschließlich des Pariser Abkommens und der Verhandlungen zu Artikel 6.
- **IETA (International Emissions Trading Association):** <https://www.ieta.org/>
- **Relevanz:** Eine Non-Profit-Organisation, die sich für die Etablierung effektiver Marktmechanismen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen einsetzt und die Entwicklung von Kohlenstoffmärkten fördert.
- **OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung):**  
<https://www.oecd.org/>
- **Relevanz:** Führt umfangreiche Analysen zu Umweltpolitik und Kohlenstoffpreisgestaltung durch, einschließlich Vergleichen der Wirksamkeit und Auswirkungen.

---

## **Anhang E: Glossar von Fachbegriffen**

**Additionality (Zusätzlichkeit):** Das Prinzip, dass Emissionsreduktionen aus einem Projekt nur dann als Gutschriften anerkannt werden sollten, wenn sie ohne das Projekt nicht stattgefunden hätten.

**Auktionierung (Auctioning):** Die Methode der Zuteilung von Emissionszertifikaten, bei der diese an die Höchstbietenden verkauft werden, im Gegensatz zur kostenlosen Zuteilung.

**Benchmarking:** Eine Methode der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten, die auf der Effizienz oder Emissionsintensität der Anlagen basiert, anstatt auf historischen Emissionen.

**Cap-and-Trade-System (Emissionshandelssystem):** Ein marktbasiertes Instrument zur Emissionsreduktion, bei dem eine Obergrenze (Cap) für Gesamtemissionen festgelegt wird und handelbare Emissionszertifikate ausgegeben werden.

**Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) (Grenzausgleichsmechanismus):** Ein Mechanismus, der darauf abzielt, den Kohlenstoffpreis auf importierte Produkte aus Ländern zu erheben, die keine vergleichbare Kohlenstoffpreisgestaltung haben, um Carbon Leakage zu verhindern.

**Carbon Leakage (Kohlenstofflecks):** Die Verlagerung von Emissionen und/oder Produktion in Länder mit weniger strengen Klimaschutzauflagen aufgrund von Kohlenstoffpreisen im Inland.

**Carbon Pricing (Kohlenstoffpreisgestaltung):** Instrumente, die einen Preis auf Kohlenstoffemissionen legen, um Anreize zur Emissionsreduktion zu schaffen, z.B. Kohlenstoffsteuern oder Emissionshandelssysteme.

**Clean Development Mechanism (CDM) (Mechanismus für umweltverträgliche Entwicklung):** Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern erlaubt, Emissionsminderungsprojekte in Entwicklungsländern zu finanzieren und Gutschriften zu erhalten.

**Coase-Theorem:** Ein ökonomisches Theorem, das besagt, dass bei klar definierten Eigentumsrechten und ohne Transaktionskosten private Parteien eine effiziente Lösung für Externalitäten finden können, unabhängig von der ursprünglichen Zuweisung der Rechte.

**Compliance-Rate:** Der Prozentsatz der Emittenten in einem Emissionshandelssystem, die ihre Emissionsverpflichtungen (Abgabe von Zertifikaten) fristgerecht erfüllen.

**Dekarbonisierung:** Der Prozess der Reduzierung von Kohlenstoffemissionen, insbesondere Kohlendioxid, aus der Wirtschaft, um eine kohlenstoffneutrale oder Netto-Null-Zukunft zu erreichen.

**Emissionsberechtigung (Allowance):** Ein handelbares Recht, eine bestimmte Menge (z.B. eine Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalent) Treibhausgasemissionen auszustoßen. Im EU ETS als EUA (EU Allowance) bezeichnet.

**Emissionsintensität:** Die Menge der Treibhausgasemissionen pro Einheit der Wirtschaftsleistung oder Produktion (z.B. tCO<sub>2</sub>e pro kWh Strom).

**Fuel Switch (Brennstoffwechsel):** Der Übergang von emissionsintensiveren Brennstoffen (z.B. Kohle) zu emissionsärmeren Alternativen (z.B. Erdgas oder erneuerbare Energien) in der Energieerzeugung oder Industrie.

**Greenwashing:** Der Vorgang, bei dem Unternehmen oder Organisationen irreführende oder übertriebene Angaben über ihre Umweltfreundlichkeit machen, um ein positives Image zu erzeugen.

**Joint Implementation (JI) (Gemeinsame Umsetzung):** Ein flexibler Mechanismus des Kyoto-Protokolls, der es Industrieländern ermöglichte, Emissionsminderungsprojekte in anderen Industrieländern zu finanzieren und Gutschriften zu erhalten.

**Lebenszyklusanalyse (LCA):** Eine Methode zur Bewertung der gesamten Umweltwirkungen eines Produkts oder Prozesses über seinen gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung.

**Lobbyismus:** Die Einflussnahme von Interessengruppen auf politische Entscheidungsträger, um ihre spezifischen Anliegen zu fördern, was im Kontext des Emissionshandels zu einer Verwässerung der Ambitionen führen kann.

**Marktstabilitätsreserve (MSR) (Market Stability Reserve):** Ein Mechanismus im EU ETS, der das Angebot an Emissionszertifikaten anpasst, um strukturelle Überschüsse oder Knappheiten zu reduzieren und die Preisstabilität zu verbessern.

**Messung, Berichterstattung und Verifizierung (MRV) (Measurement, Reporting and Verification):** Ein System zur systematischen Erfassung, Meldung und unabhängigen Überprüfung von Treibhausgasemissionen.

**Nationally Determined Contributions (NDCs) (National Festgelegte Beiträge):** Die von den einzelnen Ländern im Rahmen des Pariser Abkommens eingereichten Klimaschutzziele und -maßnahmen.

**Netto-Null (Net-Zero):** Das Erreichen eines Gleichgewichts zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen und deren Entfernung aus der Atmosphäre.

**Pariser Abkommen (Paris Agreement):** Ein internationales Klimaabkommen von 2015, das das Ziel verfolgt, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C, gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen.

**Pigou-Steuer (Pigouvian Tax):** Eine Steuer auf Aktivitäten, die negative Externalitäten verursachen, deren Höhe den externen Grenzkosten der Aktivität entspricht.

**Preiskorridor (Price Collar):** Ein Mechanismus in Emissionshandelssystemen, der eine Preisuntergrenze (Floor) und eine Preisobergrenze (Ceiling) festlegt, um extreme Preisschwankungen zu verhindern.

**Rebound-Effekt:** Ein Phänomen, bei dem Effizienzgewinne (z.B. durch Energieeffizienzmaßnahmen) teilweise oder vollständig durch eine erhöhte Nutzung der Ressource wieder ausgeglichen werden.

**Soziale Kosten des Kohlenstoffs (SCC) (Social Cost of Carbon):** Der monetäre Wert des Schadens, der durch die Emission einer zusätzlichen Tonne CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre verursacht wird.

**Windfall Profits (Zufallsgewinne):** Unerwartete Gewinne, die Unternehmen erzielen, wenn sie kostenlos Emissionszertifikate erhalten und die Kosten dieser Zertifikate dennoch an ihre Kunden weitergeben können.

## References

- Dittmann, Lauter, Prokopczuk, & 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 Encyclopedia of European Union Law.
- 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*. NBER Working Paper Series.
- Guest. (2010). Global Demographic Change, Carbon Emissions, the Optimal Carbon Price and Carbon Abatement. *The B.E. Journal of Economic Analysis & Policy*. <https://doi.org/10.2202/1524-5861.1466>.
- 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.
- Janikowski, Michaliszyn, & Krupanek. (1994). *Joint Implementation Projects between the Netherlands and Poland*. Springer Netherlands.
- Kirchner, Schmidt, & Wehrle. (2019). *Exploiting Synergy of Carbon Pricing and other Policy Instruments for Deep Decarbonization*. OSF Preprints.
- Ladaniwskyj. (2008). *Price Dynamics in the European Carbon Market*. 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.

Pearse, & Böhm. (2014). Ten reasons why carbon markets will not bring about radical emissions reduction. *Climate Policy*. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.990679>.

Piga. (2003). Pigouvian Taxation in Tourism. *Environmental and Resource Economics*. <https://doi.org/10.1023/b:eare.00000003544.77701.01>.

Ramji. (2018). *Paris Agreement and climate change in India*. Routledge.

Reid. (2022). *The regression of atmospheric concentration on carbon dioxide emissions*. ESSOAr.

Tol. (2001). Equitable cost-benefit analysis of climate change policies. *Energy Economics*. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(00\)00204-4](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(00)00204-4).

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.

## Literaturverzeichnis

[Wird automatisch generiert]