

**Externalitäten im deutschen Solarsektor -
Zur Effizienz von Subventionen vor dem Hintergrund des
EU-Emissionshandelssystems**

Bachelorarbeit

Erstprüfer: Prof. Michael Krause, Ph.D.

Zweitprüferin: Theresa Markefke

Vorgelegt in der Bachelorprüfung im Studiengang
Volkswirtschaftslehre sozialwissenschaftlicher Richtung
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Universität zu Köln

Köln, Mai 2023

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Kontextualisierung und Überblick über relevante Rahmenbedingungen.....	3
2.1 Folgen des Klimawandels und institutioneller Rahmen.....	3
2.2 Regulativer Status quo: Ein Überblick über das Europäische Emissionshandelssystem.....	5
2.3 Zur Bedeutung der Photovoltaik-Technologie für den Klimaschutz.....	6
3 Theoretische Einordnung und Problemstellung.....	7
3.1 Der Markt für Solarmodule.....	8
3.2 Privates Entscheidungskalkül.....	8
3.2.1 Ökonomische Einflussfaktoren.....	8
3.2.2 Verhaltensbezogene Faktoren.....	9
3.3 Marktversagen.....	10
3.3.1 Theorie Externalitäten.....	10
3.3.2 Anwendung Theorie.....	11
4 Instrumentendiskussion.....	19
4.1 Internalisiert das EU ETS die vorliegenden Externalitäten vollständig?.....	20
4.1.1 Zertifikatehandel in der Theorie.....	21
4.1.2 Anwendung auf das EU ETS.....	23
4.2 Divergenz europäischer und deutscher Emissionsreduktionsziele: Grundlage zur Rechtfertigung zusätzlicher Subventionen?.....	30
4.2.1 Subventionen zusätzlich zum EU ETS – Der Wasserbetteffekt.....	32
4.2.2 Zusätzliche Emissionsreduktionen durch die Stilllegung von Zertifikaten.....	33
4.3 Limitationen der Instrumentendiskussion.....	36
5 Fazit.....	38
6 Literaturverzeichnis.....	41
7 Erklärung.....	54

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gleichgewicht bei positiven Externalitäten (Eigene Darstellung nach Gruber (2010, 127f.))	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Merit-Order (Buttler et al., 2022)	14
Abbildung 3a und 3b: Externalitäten im Strommarkt bei geringem und hohem Solarstromangebot (Eigene Darstellung in Anlehnung an Ladwig (2018, S. 36))	15
Abbildung 4: Externalitäten im Strommarkt bei Nachfrageelastizität $-1 < \varepsilon < 0$ (Eigene Darstellung in Anlehnung an Sakaguchi und Fujii (2021) und Tveten et al. (2013))	17
Abbildung 5: Kosteneffizienz im Zertifikatehandel (Eigene Darstellung nach Tietenberg (2006, 31))	22
Abbildung 6a und 6b: Merit-Order bei geringem Zertifikatspreis und geringem und hohem Solarstromangebot (Eigene Darstellung in Anlehnung an Sijm et al. (2008, S. 44) und eigene Darstellung)	25
Abbildung 7: Merit-Order bei hohem Zertifikatspreis (Eigene Darstellung basierend auf Sijm et al. (2008, 44))	27

Abkürzungsverzeichnis

BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EU	Europäische Union
EU ETS	EU Emissions Trading System
EQ	Emissionsquelle
FuE	Forschung und Entwicklung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MSM	Marktstabilisierungsmechanismus
MSR	Market Stability Reserve
NDC	Nationally Determined Contribution
PV	Photovoltaik
UBA	Umweltbundesamt
UNEP	United Nations Environment Programme

1 Einleitung

So wie die Warnungen vor den Folgen des Klimawandels eindringlicher werden, wird auch der Ruf nach der Energiewende in Deutschland lauter. Auch wenn Deutschland die Energiewende anstrebt, bleibt die Umsetzung eine große Herausforderung. Die stetig verschärften Sektorziele der Bundesregierung sind ein Beispiel dafür: Bis 2030 sollen 80 % der Stromversorgung aus erneuerbaren Energiequellen stammen (Die Bundesregierung, 2023). Im vergangenen Jahr trugen erneuerbare Energien jedoch nur 49,6 % zur Stromversorgung bei (Fraunhofer ISE, 2023). 10,9 % des erzeugten Stroms wurde 2022 durch Photovoltaik (PV) produziert (Statista, 2022a). Damit ist PV nach Windenergie die zweitwichtigste erneuerbare Energiequelle in Deutschland (Statista, 2022b). Das hohe Emissionseinsparpotenzial der PV-Technologie (IPCC, 2022c) und ihre wichtige Rolle für den Klimaschutz begründen den Fokus der Arbeit auf den Solarsektor. Während die Notwendigkeit eines verstärkten PV-Zubaus größtenteils unbestritten ist, sind die ergriffenen Förderinstrumente Gegenstand politischer und akademischer Debatten. Insbesondere drei Streitpunkte sind hervorzuheben; ob das bereits implementierte Europäische Emissionshandelssystem (EU ETS) den PV-Ausbau ausreichend anreizt, ob zusätzliche Instrumente zur Förderung notwendig sind und ob diese mit dem EU ETS kompatibel sind. So wird insbesondere kritisiert, zusätzliche Subventionen bewirkten nicht weniger, sondern nur eine Verschiebung der Emissionen (Perino, 2018). Diese Arbeit nähert sich der skizzierten Debatte aus einer ökonomischen Perspektive und untersucht dazu eine zweigeteilte Forschungsfrage: Besteht Marktversagen durch Externalitäten im deutschen Solarsektor? Wenn ja, wie kann das Marktversagen effizient behoben werden? Mit anderen Worten: Braucht es einen Staatseingriff und wenn ja, sind zusätzlich zum EU ETS Subventionen erforderlich?

Im Sinne der Beantwortung der Forschungsfrage gliedert sich die Arbeit wie folgt: Zuerst definiert das zweite Kapitel den Bezugsrahmen für die darauffolgenden Kapitel. Dazu werden die Folgen des Klimawandels für Mensch und Natur, der deutsche institutionelle Rahmen sowie das EU ETS erläutert. Außerdem wird die Rolle der PV-Technologie für den Klimaschutz herausgestellt.

Kapitel 3 widmet sich der Frage, ob Externalitäten im deutschen Solarsektor vorliegen. Zu Beginn des Kapitels wird der betrachtete Markt definiert – im Rahmen dieser Arbeit wird die Nachfrage nach PV-Modulen zur Stromerzeugung untersucht und das Angebot

als gegeben angenommen. Danach wird das private Entscheidungskalkül betrachtet, um im dritten Schritt potenzielle unberücksichtigte Effekte auf Dritte zu identifizieren. Liegen Externalitäten im Solarsektor vor, ist die installierte Menge ineffizient. Wie das dritte Kapitel aufzeigen wird, verursachen der beim Betrieb der Solaranlage produzierte Solarstrom und damit auch die PV-Module durch die Vermeidung von CO₂-Emissionen positive Externalitäten. Der Umfang der CO₂-Minderung und damit der Externalitäten ist abhängig von der Emissionsintensität der durch Solarstrom substituierten Erzeugungsform. Wird Kohle statt Gas aus dem Strommarkt gedrängt, sind die Externalitäten höher. Eine komparativ-statische Analyse der Merit-Order identifiziert den Strommix und die Nachfrageelastizität für Strom als zentrale Einflussfaktoren dafür, welche Erzeugungsform durch eine zusätzliche Einheit Solarstrom substituiert wird und wie hoch die Externalitäten sind.

Kapitel 4 analysiert, wie die Externalitäten effizient behoben werden können. Ein Kernpunkt wird dabei besonders berücksichtigt: der multilaterale Bezugsrahmen des EU ETS. Die Auswirkungen des deutschen Solarsektors auf die europäischen CO₂-Emissionen werden nicht allein durch Politiken der deutschen Bundesregierung beeinflusst, sondern maßgeblich durch das EU ETS. Daraus ergeben sich die folgenden Fragen: Kann das EU ETS in Einklang mit den deutschen Klimazielen gebracht werden, sind dafür zusätzliche Subventionen notwendig und rufen diese Interaktionen mit dem ETS hervor? Die Arbeit betrachtet Subventionen deshalb nicht isoliert, sondern vor dem Hintergrund des EU ETS. Zu Beginn des vierten Kapitels wird zuerst mittels ökonomischer Theorie analysiert, ob das EU ETS ein effizientes Instrument zur Internalisierung der Externalitäten ist. Im nächsten Schritt wird die Wirkung des Zertifikatehandels auf die marginalen Stromerzeugungskosten von Kohle und Gas (Merit-Order) betrachtet. Die ökonomische Analyse kommt zu dem Ergebnis, dass das EU ETS die vorliegenden Externalitäten effizient internalisiert und verbleibende Informationsprobleme nicht durch zusätzliche Subventionen behoben werden können. Um unilateral zusätzliche Emissionsreduktionen zur Einhaltung der strengeren deutschen Klimaziele zu erzielen, sind Subventionen aufgrund des Wasserbetteffekts ebenfalls nicht zielführend. Der Wasserbetteffekt bezeichnet das Phänomen, dass trotz zusätzlicher Maßnahmen insgesamt nicht weniger emittiert wird (Perino, 2018). Stattdessen wird aufgezeigt, dass nationale Zertifikatsstilllegungen zusätzliche Emissionsminderungen ohne verzerrende Effekte herbeiführen können und somit theoretisch das effiziente Mittel sind.

2 Kontextualisierung und Überblick über relevante Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden zuerst die Folgen des Klimawandels und der daraus erwachsende, für Deutschland gültige institutionelle Rahmen dargestellt. Dann wird auf das EU ETS eingegangen, das für diese Arbeit zentral ist. Zuletzt wird die Rolle der PV-Technologie für den Klimaschutz hervorgehoben. Damit wird die in Kapitel 3 und 4 erfolgende ökonomische Analyse kontextualisiert und der Rahmen definiert, in dem diese stattfinden wird.

2.1 Folgen des Klimawandels und institutioneller Rahmen

Aufgrund des menschengemachten Klimawandels sind vielseitige und schwerwiegende Folgen für Mensch und Natur zu erwarten. Schon jetzt ist die globale Durchschnittstemperatur durch die Emission von Treibhausgasen um 1,1 Grad gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter gestiegen (IPCC, 2022a). Die Folgen sind bereits spürbar: Sie erstrecken sich von Risiken für die Biodiversität und Artenvielfalt über gesundheitliche Risiken, wie vermehrte Infektionskrankheiten und Mangelernährung bis hin zu Wasserknappheit und erschwerter Nahrungsmittelproduktion (IPCC, 2022b). Hinzu kommen bereits jetzt vermehrt auftretende Wetterextreme: Dürre- und Hitzeperioden sowie heftige Niederschläge nehmen zu. In der Folge ist eine erhöhte Zahl von Flut- und Sturmschäden in Küstenregionen aber auch im Inland zu verzeichnen (IPCC, 2022b). Bevölkerungsgruppen, die am wenigsten zum Klimawandel beigetragen haben und beitragen, sind überproportional von den Folgen des Klimawandels betroffen. Über die kurzfristigen Folgen hinaus wird die Anzahl der Menschen, die durch den Klimawandel bedroht sind, in Zukunft noch weiter progressiv ansteigen (ebd.). Insbesondere in der langen Frist (ab 2040) werden manche Küstenregionen und Inseln durch den Anstieg des Meeresspiegels unbewohnbar und zwischen 20 % und 40 % der Bevölkerung könnten dem Risiko sogenannter Jahrhundertfluten ausgesetzt sein (ebd.). Die langfristigen Folgen sind stark abhängig von den jetzt getroffenen Abmilderungs- und Anpassungsmaßnahmen des Klimawandels (ebd.). Eine Begrenzung der Erderwärmung erfordert CO₂-Neutralität und eine starke Reduktion anderer Treibhausgase (IPCC, 2021).

Die Staatengemeinschaft strebt eine Abmilderung des Klimawandels an, um die schwerwiegendsten Folgen abzuschwächen (UBA, 2021). Der institutionelle Rahmen für

die Anstrengungen zur Abmilderung und die angestrebten Ziele sind in verschiedenen Abkommen und Gesetzen festgelegt. Es folgt ein Überblick über den für Deutschland gültigen institutionellen Rahmen.

Erstens gehört Deutschland zu den 191 von 197 Staaten, die das Übereinkommen von Paris ratifiziert haben (Stand: August 2021) (UBA, 2021). Das Übereinkommen von Paris wurde 2015 im Rahmen der 21. Vertragsstaatenkonferenz (COP21) verabschiedet und trat 2016 in Kraft. Es legt völkerrechtlich verbindlich das Ziel fest, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter zu begrenzen (ebd.). In Artikel 2 des Abkommens ist außerdem das Ziel festgelegt, die Treibhausgasemissionen¹ zu senken (BMZ, o. D.). Alle fünf Jahre legen die Staaten aktualisierte Pläne über ihre nationalen Klimaschutzbemühungen vor: die Nationally Determined Contributions (NDCs). Ob die NDCs eingehalten werden, wird regelmäßig überprüft, bei Verstößen sind jedoch keine Sanktionsmechanismen vorgesehen (UBA, 2021). Dem Emissions Gap Report (UNEP, 2020) ist zu entnehmen, dass die NDCs unzureichend sind, um das Übereinkommen von Paris einzuhalten. Um das 2 Grad Ziel zu erreichen, müssten die jährlichen globalen Emissionen bis 2030 um 15 GtCO_{2e} stärker sinken, als in den NDCs festgelegt. Für das 1,5 Grad Ziel wären dazu sogar zusätzliche Reduktionen um 32 GtCO_{2e} notwendig (ebd.).

Um die im Pariser Klimaabkommen definierten Ziele zu erreichen, hat die Europäische Union (EU) 2019 den European Green Deal vorgestellt (BMZ, o. D.). Mit dem European Green Deal verfolgt die EU das Ziel, bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Dieses Ziel sowie eine angestrebte Treibhausgasreduktion um 55 % bis 2030 gegenüber 1990 wurde 2021 durch das Europäische Klimaschutzgesetz gesetzlich verankert (Europäische Kommission, 2020). Um die festgeschriebenen Ziele zu erreichen, sind vielfältige Maßnahmen und Initiativen entlang des Finanzsektors, der Industrie, Landwirtschaft und im Energie- und Verkehrssektor vorgesehen (Europäische Kommission, 2021). Außerdem werden bereits geltende Maßnahmen auf ihre Vereinbarkeit mit dem Klimaschutzgesetz überprüft. In der Folge kam es u. a. zu einer

¹ Zu den relevantesten Treibhausgasen zählen Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), fluorierte Treibhausgase (F-Gase) und Stickstofftrifluorid (NF₃) (UBA, 2022). Zwischen 2010 und 2019 trugen CO₂-Emissionen am stärksten zur globalen Erderwärmung bei (IPCC, 2021). Aus diesem Grund liegt der Fokus in dieser Arbeit auf CO₂-Emissionen.

Verschärfung des Europäischen Emissionshandelssystems (Europäische Kommission, 2020) (vgl. Abschnitt 2.2).

Darüber hinaus hat sich Deutschland eigene nationale Ziele gesetzt. Als Reaktion auf den Beschluss des Bundesverfassungsgerichts vom 24. März 2021 wurden die Regelungen des Klimaschutzgesetzes von 2019 verschärft. Die Gesetzesnovelle aus dem Jahr 2021 schreibt das Erreichen von Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2045 und eine Emissionsreduktion bis 2030 um 65 % gegenüber dem Jahr 1990 gesetzlich fest (Die Bundesregierung, 7. November, 2022). Damit übersteigt das deutsche Klimaschutzgesetz die Ambitionen des auf europäischer Ebene festgelegten Rahmens. Bis 2030 sollen die Emissionen um 10 Prozentpunkte stärker zurückgehen und die Treibhausgasneutralität soll fünf Jahre früher erreicht werden.

Sowohl das Übereinkommen von Paris als auch das europäische und deutsche Klimaschutzgesetz definieren den institutionellen Rahmen für Deutschland. Der institutionelle Rahmen gibt die einzuhaltende Stringenz geplanter und bereits ergriffener Klimaschutzmaßnahmen vor. Da sich die Staaten die Ziele zur Erreichung des Übereinkommens von Paris selbst setzen (UBA, 2021) und die deutschen nationalen Ziele die Ambition der europäischen Ziele übersteigen, werden in dieser Arbeit in erster Linie die deutschen Klimaschutzziele zugrunde gelegt.

2.2 Regulativer Status quo: Ein Überblick über das Europäische Emissionshandelssystem

Um den institutionellen Rahmen einzuhalten, unternehmen die Staaten vielseitige Anstrengungen. Insbesondere ein Instrument zur Emissionsreduktion ist dabei hervorzuheben. Das auf europäischer Ebene bereits implementierte Europäische Emissionshandelssystem ist unmittelbar relevant für den deutschen Solarsektor und damit für diese Arbeit. Es folgen in diesem Abschnitt allgemeine Erläuterungen, um den regulativen Rahmen zu klären. Auf die ökonomische Funktionsweise des Instruments wird im vierten Kapitel näher eingegangen.

Das EU ETS ist ein Instrument zur Minderung der europäischen Treibhausgasemissionen. Schätzungen zufolge wurden durch das EU ETS regulierte Unternehmen dazu veranlasst, ihre Emissionen um 14 % (während Handelsperiode I) und um 16 % (während Handelsperiode II) im Vergleich zu nicht regulierten Unternehmen zu senken (Colmer et al., 2020). Neben den 27 Mitgliedsstaaten der EU nehmen Island, Liechtenstein und

Norwegen am europäischen Zertifikatehandel teil (European Commission, o. D.). Aktuell befindet sich das Emissionshandelssystem in der vierten Handelsperiode (2021-2030). Eine wichtige Änderung, die mit der vierten Handelsperiode 2021 in Kraft trat, ist die Erhöhung des *linear reduction factor*. Das bedeutet, dass die Gesamtanzahl an Emissionsrechten jährlich um 2,2 % statt um 1,74 % sinkt (ebd.). Zudem wurde die bereits in der dritten Handelsperiode eingeführte Market Stability Reserve (MSR) gestärkt. Die MSR kann als Sammelbecken für überschüssige Zertifikate verstanden werden und dient der Stabilisierung des Zertifikatsangebots (ebd.). Insgesamt deckt das EU ETS rund 40 % der europäischen Treibhausgasemissionen ab, sodass nicht nur für CO₂-Emissionen, sondern auch für Lachgase und perfluorierte Kohlenwasserstoffe in den teilnehmenden Sektoren Zertifikate vorgewiesen werden müssen (ebd.). Zu den teilnehmenden Sektoren gehört neben den energieintensiven Industriesektoren und dem innereuropäischen Luftverkehr auch die Stromerzeugung (ebd.). Somit sind die im deutschen Stromsektor entstehenden Emissionen vom EU ETS abgedeckt, wodurch auch der deutsche Solarsektor vom EU ETS unmittelbar betroffen ist. Aufgrund der Teilnahme des Stromsektors am Zertifikatehandel werden Subventionen in dieser Arbeit vor dem Hintergrund des EU ETS betrachtet.

2.3 Zur Bedeutung der Photovoltaik-Technologie für den Klimaschutz

Nachdem die besondere Rolle des EU ETS für diese Arbeit hervorgehoben wurde, steht nun die Rolle des Solarsektors für den Klimaschutz im Fokus. Die Bedeutung der Energiewende für den Klimaschutz ergibt sich aus zwei Gründen. Erstens haben erneuerbare Energien eine deutlich geringere CO₂-Intensität als fossile Energieträger. Der International Renewable Energy Agency (IRENA, 2019, S. 23) zufolge können erneuerbare Energien, Energieeffizienz und erhöhte Elektrifizierung zu einer Emissionsreduktion von 90 % im Energiesektor führen. Zweitens ist die Energiewende für die Dekarbonisierung weiterer Sektoren, beispielsweise des Verkehrssektors, von Bedeutung (Scorza et al., 2018). Das genannte Einsparpotenzial liegt insbesondere in erneuerbaren Formen der Stromerzeugung. Der PV-Technologie wird dabei im IPCC Bericht (IPCC, 2022c) ein Einsparpotenzial von weltweit mehr als 4 GtCO₂e bis 2030 zugesprochen. Damit ist sie die Technologie mit insgesamt höchstem Einsparpotenzial im Energiesektor (ebd.). Es ist zu beachten, dass diese Angaben mit diversen Unsicherheiten verbunden und abhängig von der substituierten Referenztechnologie sind.

Außerdem bezieht sich das angegebene Reduktionspotenzial auf die global möglichen Einsparungen, obwohl es regionale Variationen geben kann (ebd.). Dennoch ist davon auszugehen, dass der PV-Technologie eine besondere Rolle für den Klimaschutz zukommt.

Der Fokus der Arbeit soll auf privaten, netzgekoppelten Photovoltaikmodulen liegen. Die Module wiederum bestehen aus Solarzellen (Platzer, 2012). Diese wandeln Solarenergie in Strom um (Quaschnig, 2021a, S. 202).² Das Stromnetz funktioniert dabei als Speicher; übersteigt die produzierte Menge Strom den Eigenbedarf, wird sie zum Preis in Höhe der Einspeisevergütung ins Netz eingespeist. Unterschreitet sie den Eigenbedarf, wird die fehlende Leistung aus dem Stromnetz gedeckt (Quaschnig, 2021a, S. 150).

Zusammengefasst konnten im Rahmen des zweiten Kapitels die Folgen des Klimawandels und der daraus erwachsende institutionelle Rahmen erklärt werden. Außerdem wurde das bereits implementierte relevante Politikinstrument, das EU ETS, und die Rolle der Photovoltaik-Technologie für den Klimaschutz erläutert. Diese Einordnung schafft die Voraussetzungen für das Verständnis der Arbeit und der nun folgenden ökonomischen Analyse.

3 Theoretische Einordnung und Problemstellung

Das dritte Kapitel widmet sich der Definition des betrachteten Marktes (Abschnitt 3.1), der privaten Nachfrage nach PV-Modulen (Abschnitt 3.2) und schließlich der Beantwortung des ersten Teils der Forschungsfrage: Besteht Marktversagen durch Externalitäten im deutschen Solarsektor? (Abschnitt 3.3). Die Marktversagensanalyse erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird die ökonomische Theorie der Externalitäten erläutert. Sodann wird hergeleitet, ob die Vermeidung von CO₂-Emissionen den gesellschaftlichen Nutzen erhöht und wenn ja, unter welchen Voraussetzungen Solarstrom CO₂-Emissionen vermeidet. So wird überprüft, ob die notwendige Bedingung für einen Staatseingriff gegeben ist. Ein staatlicher Eingriff ist unter ökonomischen Gesichtspunkten nur bei Vorliegen von Marktversagen zu erwägen (Roth, 2021, S. 159). Marktversagen liegt vor, wenn „individuell rationales Verhalten zu kollektiv irrationalerem Verhalten führt“ (ebd.).

² Solarthermie, die Sonnenenergie in Wärme umwandelt (Quaschnig, 2021a, S. 174), wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

3.1 Der Markt für Solarmodule

Es wird der Markt betrachtet, auf dem Unternehmen PV-Module produzieren und anbieten und entweder Privathaushalte, Gewerbetreibende oder öffentliche Einrichtungen diese nachfragen (Lübben & Jedamzik, 2019). Vereinfachend soll sich auf die Nachfrage von Privathaushalten beschränkt werden und das Angebot wird als gegeben angenommen. Bevor die private Nachfrageentscheidung näher betrachtet wird, sind zwei Besonderheiten hervorzuheben. Erstens ist der Markt für Solarmodule nicht isoliert betrachtbar. Da mit der Inbetriebnahme der Solarmodule Strom produziert wird, besteht eine direkte Verbindung zum Strommarkt. Zweitens werden Nachfrager*innen gleichzeitig zu Produzent*innen und Konsument*innen: sogenannten Prosumern (Couture et al., 2014). PV-Prosumer fragen nicht nur Strom nach, sondern produzieren diesen auch selbst (ebd.). Der im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Prosumertyp kann weiterhin über das Stromnetz Strom nachfragen. Gleichzeitig kann mit der eigenen PV-Anlage Strom für den Eigenbedarf produziert und überschüssiger Strom ins Stromnetz eingespeist werden (Bley, 2007, 118ff.).

3.2 Privates Entscheidungskalkül

Ein Haushalt wählt das Güterbündel, das gegeben seines Budgets den Nutzen gemäß den Präferenzen maximiert (Roth, 2021, S. 31). Nachfolgend wird untersucht, welche Einflussfaktoren die Entscheidung eines repräsentativen Haushalts für die Investition in Solarmodule bestimmen. Die Einflussfaktoren werden in ökonomische und verhaltensbezogene Faktoren unterteilt (Couture et al., 2014).

3.2.1 Ökonomische Einflussfaktoren

Die ökonomischen Einflussfaktoren für die Nachfrage von PV-Modulen können in Kosten und Nutzen eingeteilt werden. Dabei sind auf der Kostenseite insbesondere die Energiegestehungskosten, die Kosten für die Produktion einer Energieeinheit, eine wichtige Kennzahl. Diese werden durch die Gesamtkosten, die sich aus der Summe der Investitions- und Betriebskosten ergeben, die Betriebsdauer und die Menge produzierter Energieeinheiten bestimmt (Quaschnig, 2021b, S. 420f.). Die Kosten werden dementsprechend durch mengenbezogene Risiken beeinflusst (z. B. meteorologische Faktoren). Der Kostenseite steht der Nutzen der Solaranlage gegenüber. Erstens ermöglicht der Eigenverbrauch des produzierten Stroms Einsparungen in Höhe des Strompreises (Couture et al., 2014). Zweitens kann über den Eigenverbrauch

hinausgehender Strom in Höhe der Einspeisevergütung verkauft werden. Zentrale Einflussfaktoren sind folglich der Strompreis und die Eigenverbrauchsrate sowie die Einspeisevergütung (Quaschnig, 2021b, S. 281). Da die zukünftigen Strompreise und Einspeisevergütungen mit Unsicherheiten verbunden sind, bestehen preisbezogene Risiken, die den Nutzen beeinflussen. Der Haushaltstheorie zufolge wird ein Gut nachgefragt, wenn der marginale Nutzen aus dem Konsum des Guts seinen Preis übersteigt. Das Individuum maximiert seinen Nutzen durch die Nachfragemenge, für die sich marginale Kosten und Nutzen ausgleichen (Roth, 2021, 6f.). Übertragen auf die Nachfrage nach PV-Modulen kann demnach geschlossen werden, dass die Investitionsentscheidung positiv ausfällt, wenn die erwarteten Erlöse die erwarteten Kosten übersteigen.

3.2.2 Verhaltensbezogene Faktoren

Nach den ökonomischen Einflussfaktoren wird kurz auf die Hypothese eingegangen, dass eine Solaranlage nicht nur mit monetären Kosten und Nutzen einhergeht, sondern auch nicht-monetären Nutzen stiften kann. Vorstellbar wäre beispielsweise, dass auch ökologische Präferenzen in die Nutzenfunktion einfließen (Bley, 2007, S. 103). So untersuchen Jacksohn et al. (2019), ob die Adaption der PV-Technologie durch umweltbewusste Präferenzen gefördert wird. Die Autor*innen kommen zu dem Ergebnis, dass die Entscheidung hauptsächlich von ökonomischen Faktoren, den Kosten und Einnahmen der PV-Anlage, beeinflusst wird und umweltbezogene Präferenzen eine stark untergeordnete Rolle spielen (ebd.). Trotz global divergierender Intensitäten des Klimawandels ist davon auszugehen, dass auch das Individuum selbst vom Klimawandel betroffen sein wird. Hier wird der enge Zusammenhang zwischen Externalitäten und der Öffentlichen-Gut-Problematik deutlich (Roth, 2021, S. 171). Denn CO₂-Emissionen und ihre Auswirkungen haben einen hohen Öffentlichkeitsgrad. Das Klima und der Klimaschutz sind ein öffentliches Gut (Raufer et al., 2022). Folglich ist der Nutzen aus Klimaschutz nicht ausschließbar. Vom Klimaschutz profitieren alle Menschen unabhängig von ihrem individuellen finanziellen Beitrag (Hasson et al., 2010). Für die Installationsentscheidung der Solaranlage folgt daraus, dass aufgrund der Nicht-Ausschließbarkeit vom Nutzen durch Klimaschutz ein Anreiz zum Free-Riding besteht. Der Nutzen eines Individuums ist maximal, wenn zwar Klimaschutz betrieben wird, aber der eigene Finanzierungsbeitrag möglichst gering ist (ebd.). Dementsprechend wird der gesellschaftliche Nutzen der Solaranlage durch das Individuum nicht oder nur

unzureichend im privaten Entscheidungskalkül berücksichtigt. Zusammenfassend kann es sein, dass Individuen zwar Klimaschutz wichtig finden, sich aber nicht notwendigerweise selbst dafür einsetzen wollen.

3.3 Marktversagen

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Nachfrageentscheidung des Individuums ließ etwaige Nutzeninterdependenzen mit anderen Individuen außen vor. Im nächsten Schritt wird vom privaten Entscheidungskalkül abstrahiert und untersucht, ob das Individuum bei seiner Nachfrageentscheidung Effekte auf Dritte verursacht. Dazu wird zuerst die ökonomische Theorie der Externalitäten dargestellt. Dann wird geprüft, ob und wenn ja, unter welchen Bedingungen Externalitäten im Solarsektor vorliegen.

3.3.1 Theorie Externalitäten

Externalitäten treten auf, wenn entweder die Produktion oder der Konsum eines Gutes positive oder negative Effekte für am Marktprozess unbeteiligte Dritte hervorruft (Brümmerhoff & Büttner, 2015, S. 59).³ Positive (negative) Externalitäten liegen vor, wenn die Tätigkeit eines Wirtschaftssubjekts nutzensteigernd (nutzenmindernd) auf Dritte wirkt (Feess & Seeliger, 2021, S. 41). Die Ursache für das Auftreten von Externalitäten liegt in nicht vollständig festgelegten oder durchsetzbaren Eigentumsrechten (Roth, 2021, S. 172). Werden Externalitäten im privaten Entscheidungskalkül nicht berücksichtigt, wird damit ein Teil der gesellschaftlichen Kosten oder Nutzen nicht in die Entscheidung des Wirtschaftssubjekts mit einbezogen (Feess & Seeliger, 2021, S. 43). Die realisierte Allokation ist nicht pareto-effizient (Roth, 2021, S. 177). Der Zustand der Verschwendungsfreiheit ist demnach systematisch nicht gegeben und es liegt Marktversagen vor (Roth, 2021, S. 159).

Abbildung 1 veranschaulicht dies für positive Externalitäten. Das Individuum wählt die Menge (q^*) eines beliebigen Guts, für die der private Grenznutzen (Nachfrage) gleich den privaten Grenzkosten (Angebot) ist. Die Menge q^* zum Preis p^* ist die Marktgleichgewichtsmenge. Das Gut ruft jedoch einen positiven externen Effekt auf unbeteiligte Dritte hervor. In der Folge liegen die sozialen Grenzkosten unterhalb der privaten Grenzkosten. Der externe Effekt wird hier als konstant angenommen, d. h. er ist für jede Menge des Guts gleich stark. Um die gesellschaftlich optimale Menge des Guts

³ Gegenstand dieser Arbeit sind nicht-pekuniäre, technologische Externalitäten. Sie entstehen nicht durch den Preismechanismus, sondern weil die Tätigkeit eines Wirtschaftssubjekts die Nutzen- oder Produktionsfunktion Dritter direkt beeinflusst (Brümmerhoff & Büttner, 2015, S. 59).

zu bestimmen, wird der positive externe Effekt von den privaten Grenzkosten abgezogen. Dadurch ergeben sich die sozialen Grenzkosten. Der Schnittpunkt der sozialen

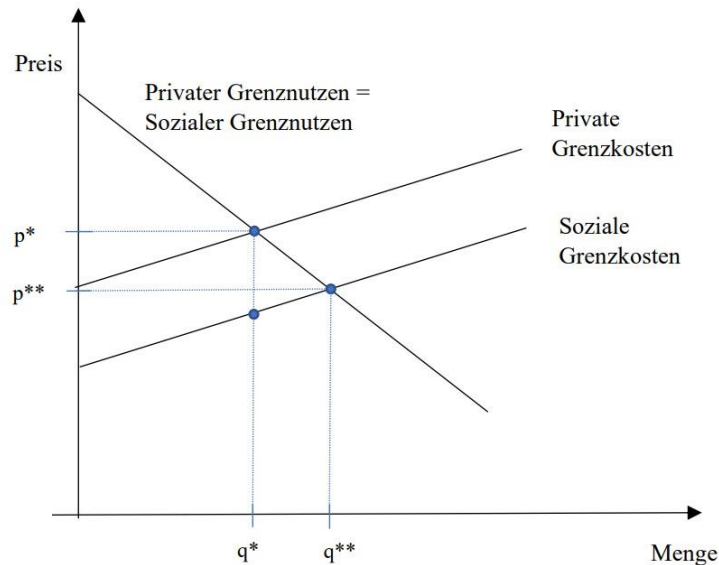


Abbildung 1: Gleichgewicht bei positiven Externalitäten (Eigene Darstellung nach Gruber (2010, 127f.))

Grenzkosten mit dem privaten Grenznutzen bestimmt die gesellschaftlich optimale Menge q^{**} zum Preis p^{**} . Ohne Berücksichtigung des positiven externen Effekts ist die privat gewählte Menge zu niedrig ($q^* < q^{**}$). Entsprechend ist die Menge im privaten Gleichgewicht zu hoch, wenn negative Externalitäten vorliegen (Roth, 2021, S. 172).

3.3.2 Anwendung Theorie

Nachdem die ökonomische Theorie der Externalitäten dargestellt wurde, wird diese nun auf den deutschen Solarsektor übertragen. Es wird die Frage untersucht, ob die solare Stromproduktion und damit Solarmodule einen positiven Effekt auf Dritte hervorrufen. Ist dies der Fall, liegt Marktversagen durch positive Externalitäten vor und die gleichgewichtige Menge an installierten Solarmodulen liegt unter der gesellschaftlich optimalen Menge. Die Menge ist ineffizient. Dabei können die Externalitäten des Guts Solarstrom nicht mit der Externalität eines PV-Moduls gleichgesetzt werden. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich die Externalitäten eines PV-Moduls aus den aggregierten Externalitäten des über die Betriebsdauer produzierten Solarstroms ergeben. Letztere werden nachfolgend untersucht.

Zuerst muss überprüft werden, ob PV-Module positive Effekte auf Dritte hervorrufen. Die vielseitigen und schwerwiegenden erwartbaren Folgen des Klimawandels legen nahe, dass eine Abmilderung der Folgen einen positiven Effekt auf die Betroffenen hat. Eine

Abmilderung kann durch Emissionsreduktionen erreicht werden (vgl. Abschnitt 2.1). Verursachen PV-Module Emissionsreduktionen, tragen sie zur Abmilderung der Folgen des Klimawandels bei und haben somit einen positiven Effekt auf Dritte: Es liegen positive Externalitäten vor. Die private Menge Solarmodule wäre demnach ineffizient gering und eine Steigerung des Zubaus würde den gesellschaftlichen Nutzen steigern.

Es ist jedoch zu beachten, dass CO₂-Minderungen potenziell nur bis zu einer bestimmten Reduktionsmenge den gesellschaftlichen Nutzen steigern. Theoretisch sind Emissionsminderungen bis zum optimalen Emissionsniveau im Schnittpunkt der Grenzvermeidungskosten und des Grenznutzens der Vermeidung nutzensteigernd (Raufer et al., 2022). Bei der Bestimmung des Optimums ergeben sich jedoch vielseitige Probleme. Es kann zwar eine eindeutige Aussage über die Höhe der Emissionen getroffen werden, nicht aber über ihre Kosten und den Nutzen der Vermeidung (Krewitt, 2007).⁴ Anstelle des optimalen Emissionsniveaus werden deshalb die deutschen Klimaziele gewählt. Sie geben stellvertretend die Menge an, bis zu der Emissionsreduktionen den gesellschaftlichen Nutzen steigern. Da die Emissionsminderungsziele bisher noch nicht erreicht wurden (BMWK, 2022), ist davon auszugehen, dass CO₂-Minderungen weiterhin den gesellschaftlichen Nutzen erhöhen.⁵ Damit verursachen auch PV-Module weiterhin positive Externalitäten, wenn sie zur CO₂-Vermeidung beitragen. Nachfolgend wird untersucht, unter welchen Annahmen und Bedingungen die Stromproduktion durch Solarmodule Emissionsminderungen hervorruft.

Vor dieser Untersuchung soll an dieser Stelle verdeutlicht werden, dass zwei Perspektiven auf das Vorliegen von Externalitäten im Solarsektor möglich sind. Entweder kann davon ausgegangen werden, dass alle Stromerzeugungsformen durch die Emission von CO₂ und damit einhergehenden gesellschaftlichen Kosten negative Externalitäten verursachen (Hohmeyer, 2021). Die Höhe der negativen Externalitäten variiert dann sehr stark mit der

⁴ Ein Grund für die Schwierigkeit liegt in der Auswahl der Diskontrate, d. h. der Gewichtung erst zukünftig auftretender Schäden (Krewitt, 2007). Außerdem beeinflusst eine subjektive Komponente die Höhe der Nutzensteigerung: Die Höhe der individuell wahrgenommenen Kosten beispielsweise einer Tonne CO₂ kann stark variieren (Borenstein, 2012). Zum Beispiel divergiert die Intensität der CO₂-induzierten Klimaschäden regional sehr stark (IPCC, 2022b). So sind Menschen vom Anstieg des Meeresspiegels unterschiedlich stark betroffen (ebd.). Deshalb ist davon auszugehen, dass eine CO₂-Minderung tendenziell für eine in Küstennähe lebende Person mit höheren Nutzensteigerungen verbunden ist als für eine in Deutschland weit entfernt der Küste lebende Person. Zudem ist anzunehmen, dass der nutzensteigernde Effekt mit der Zeit zunimmt, da zukünftige Emissionen einen stärkeren inkrementellen Schaden verursachen (López Prol & Steininger, 2018). CO₂-Minderungen können folglich einen nutzensteigernden Effekt haben, aber die Höhe dieses Effekts ist unklar und kann variieren.

⁵ Auf die Implikationen der Abweichung der Klimaziele vom optimalen Emissionsniveau wird in Kapitel 4 näher eingegangen.

jeweiligen CO₂-Intensität der Erzeugungsform. Eine zweite Sichtweise definiert positive Externalitäten im Solarsektor in Höhe der vermiedenen Emissionen (López Prol & Steininger, 2018). Für die folgende Analyse wird die zweite Sichtweise gewählt.

Die Voraussetzung für das Vorliegen positiver Externalitäten lautet, dass der solar produzierte Strom CO₂-intensiveren Strom substituieren muss (López Prol & Steininger, 2018). Aus dieser Interdependenz der positiven Externalitäten von der Vermeidung negativer Externalitäten anderer Erzeugungsformen wird deutlich, dass nicht die durchschnittlich produzierte Menge an Solarstrom ausschlaggebend ist. Für die Höhe der positiven Externalitäten ist relevant, welche Eigenschaften die Einheit Strom hat, die durch eine marginale Einheit PV-Strom substituiert wird. Wie emissionsintensiv ist die Produktion der substituierten Stromeinheit im Vergleich zu der Einheit Solarstrom?

Gemessen an der öffentlichen Nettostromerzeugung in Deutschland 2022 sind Windkraft mit 123,4 produzierten TWh, gefolgt von Braunkohle (106,9 TWh), Solarenergie (57,6 TWh), Steinkohle (55,5 TWh) und Gas (47,1 TWh) die fünf quantitativ wichtigsten Erzeugungsformen (Fraunhofer ISE, 2023). Die durchschnittliche Treibhausgasintensität der genannten Energieträger beziffert die World Nuclear Association (2011) wie folgt: Braunkohle emittiert durchschnittlich 1054t CO₂e/GWh, Steinkohle 888t CO₂e/GWh, Gas 499t CO₂e/GWh, Photovoltaik (Solar) 85t CO₂e/GWh und Windkraft 26t CO₂e/GWh. Dabei sind die Emissionsintensitäten nicht ausschließlich von der gewählten Erzeugungsform abhängig, sondern können auch zwischen Energieerzeugungsanlagen variieren (World Nuclear Association, 2011). Deshalb kann es innerhalb der Erzeugungsformen zu Abweichungen von der angegebenen durchschnittlichen Emissionsintensität kommen. Die durchschnittlichen Angaben geben jedoch einen guten Überblick und dienen als Grundlage für die weitere Analyse. Die unterschiedlichen Emissionsintensitäten zeigen, dass der Umfang der positiven Externalität erheblich mit der substituierten Erzeugungsform variiert. Die Einspareffekte einer Einheit Solarstrom auf die Emissionen sind höher, wenn eine Einheit Solarstrom eine Einheit Kohlestrom substituiert, als wenn Strom aus Gas substituiert wird (Gugler et al., 2021). Damit variiert auch die Höhe der positiven Externalität. Nachfolgend soll deshalb untersucht werden, wodurch bestimmt wird, welche Erzeugungsform eine marginale Einheit Solarstrom verdrängt.

Ausgangspunkt für diese Untersuchung ist das im deutschen Strommarkt geltende Merit-Order-Prinzip (Del Río et al., 2013). Das Merit-Order-Prinzip bestimmt, welcher Strom von allen verfügbaren Erzeugungsanlagen ins Stromnetz eingespeist wird (Haucap et al., 2022). Stromerzeuger bieten den produzierten Strom an der Strommarktbörse zu den kurzfristigen marginalen Kosten an, sodass sich die Angebotskurve aus den aufsteigend sortierten marginalen Kosten ergibt (Cludius et al., 2014).

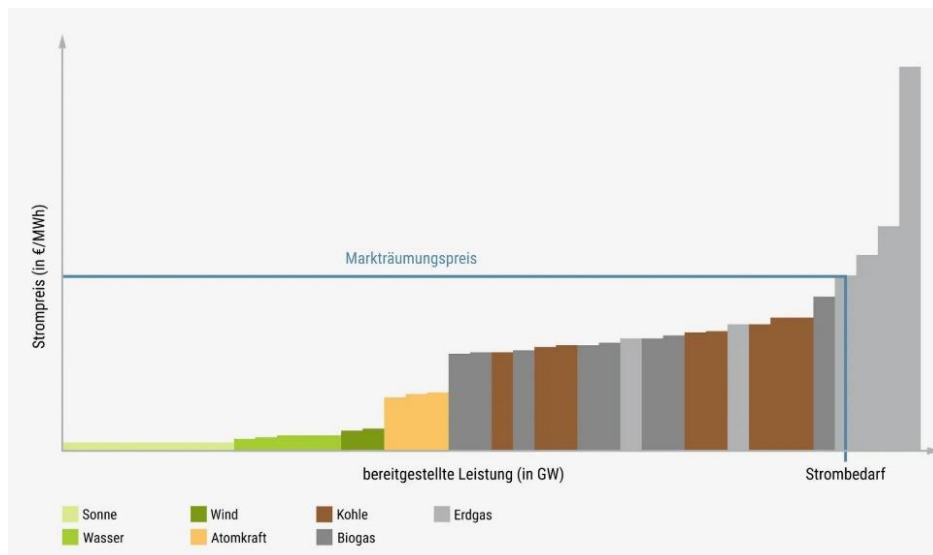


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Merit-Order (Buttler et al., 2022)

Der Börsenstrompreis wird durch die letzte einspeisende Einheit (marginale Erzeugungstechnologie) bestimmt, die zur Deckung der Stromnachfrage zum jeweiligen Zeitpunkt benötigt wird (Cludius et al., 2014). Aus Abbildung 2 lässt sich ablesen, wie sich der Strompreis aus dem Schnittpunkt von Nachfrage (Strombedarf) und Angebot (aggregierte bereitgestellte Leistung) ergibt. Ebenso kann Abbildung 2 die Anordnung der marginalen Kosten je Erzeugungstechnologie entnommen werden. Aufgrund der sehr geringen marginalen Kosten von Solarstrom wird dieser immer zuerst zur Nachfragedeckung verwendet. Eine zusätzliche Einheit Solarstrom verdrängt dann bei konstanter Nachfrage zuerst die Erzeugungsform mit den höchsten Grenzkosten (Haucap et al., 2022).

Nachdem die allgemeine Funktionsweise des Strommarkts erläutert worden ist, verdeutlicht Abbildung 3, welche Faktoren den Umfang des emissionsmindernden Effekts einer zusätzlichen Einheit Solarstrom beeinflussen. Die Wirkung eines veränderten Strommix und verschiedener Nachfrageelastizitäten auf die CO₂-Einsparung durch Solarstrom wird untersucht.

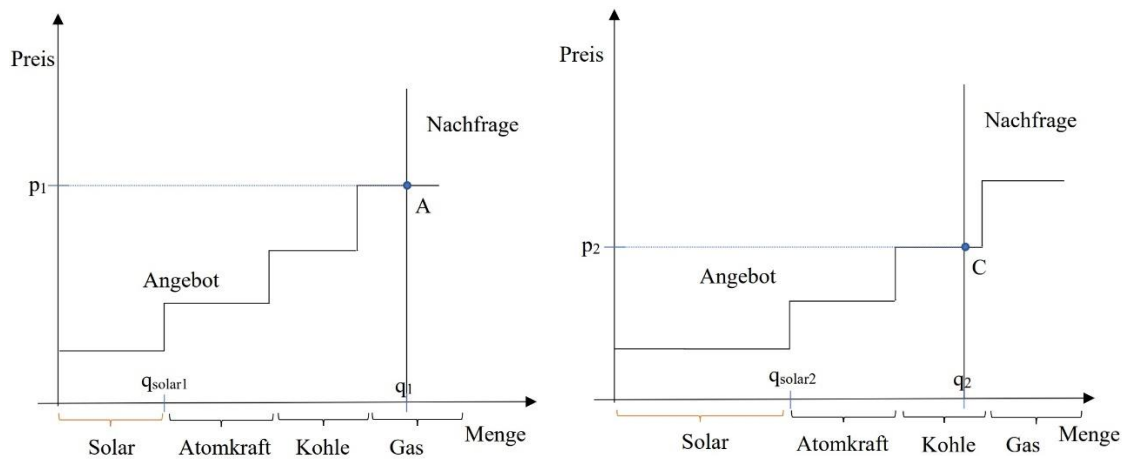


Abbildung 3a und 3b: Externalitäten im Strommarkt bei geringem und hohem Solarstromangebot (Eigene Darstellung in Anlehnung an Ladwig (2018, S. 36))

Beide Graphen bilden jeweils einen Zeitpunkt ab (Ladwig, 2018, S. 35). Vereinfachend sind nur die Erzeugungsformen Solar, Atomkraft, Kohle und Gas entsprechend ihrer marginalen Kosten dargestellt. Sie bilden das Angebot. Die Nachfrage ist in diesem Szenario vollkommen unelastisch, weshalb die Nachfragekurve vertikal ist (Sievering, 2022, S. 73). In Abbildung 3a entspricht das Angebot an Solarstrom q_{solar1} und wird in Abbildung 3b ceteris paribus auf q_{solar2} erhöht. Diese Variation des Strommix hat zwei Effekte. Erstens ändert sich mit ansteigender Menge Solarstrom die von einer marginalen Einheit Solarstrom verdrängte Erzeugungstechnologie. So verdrängt eine marginale Einheit Solarstrom bei insgesamt geringem Solarangebot zunächst durch Gaskraftwerke produzierten Strom, weil diese die höchsten Grenzkosten haben. Erst mit einem insgesamt höheren Angebot von Solarstrom verschiebt sich die Angebotskurve so, dass eine zusätzliche Einheit Solarstrom die nach Gas nächstgünstige Erzeugungsform Kohle verdrängt. Auch die insgesamt zur Deckung der Nachfrage benötigte Menge Kohle sinkt in Punkt C im Vergleich zu Punkt A. Ob eine zusätzliche Einheit Solarstrom Kohlestrom oder Strom aus Gas substituiert, ist folglich abhängig von der Höhe des vorherrschenden Angebots an Solarstrom. Aufgrund der höheren Emissionsintensität von Kohle steigt die Höhe der Externalitäten einer marginalen Einheit Solarstrom sprunghaft an, wenn sich die marginale Erzeugungstechnologie von Gas zu Kohle ändert (Fischer & Preonas, 2010).⁶

⁶ Dieser Effekt kann nicht nur auftreten, wenn sich das Solarstromangebot ändert. Die Stromnachfrage in Deutschland variiert saisonal und innerhalb eines Tages sehr stark (Tveten et al., 2013). In Momenten geringer Stromnachfrage würde die Nachfrage in der Graphik 3a nach links verschoben. Bei unverändertem Angebot wird dann Kohle statt Gas verdrängt (Abrell et al., 2019), wodurch sich die Externalitäten einer

Neben der Implikation für die Höhe der Externalitäten wirkt sich die Änderung der marginalen Erzeugungstechnologie zweitens auf den Börsenstrompreis aus. Der Marktträumungspreis sinkt bei unveränderter Nachfrage mit zunehmendem Solarstromangebot von p_1 auf p_2 , weil die geringeren marginalen Kosten von Kohle den Strompreis bestimmen (Merit-Order-Effekt) (Sensfuß et al., 2008). Eine Verschiebung der Angebotskurve bei unelastischer Nachfrage bewirkt folglich eine Preissenkung. Aufgrund der vollkommen unelastischen Nachfrage ruft die Preissenkung keine Reaktion auf die Nachfrage hervor (Hamenstädt, 2008) und die gehandelte Strommenge bleibt konstant ($q_1 = q_2$). Eine zusätzliche Einheit Solarstrom substituiert dann 1:1 eine Einheit einer anderen Erzeugungsform.

Die soeben abgeleiteten Implikationen für die Intensität der Externalitäten ergaben sich unter der Annahme einer vollkommen unelastischen Stromnachfrage. Um diese Annahme einordnen zu können, wird kurz auf ihre Plausibilität und die vorliegende Empirie eingegangen. Hirth et al. (2022) weisen darauf hin, dass die meisten Stromkonsument*innen in Deutschland einen Stromtarif mit fixen Preisen pro Stromeinheit vereinbart haben. So führt die Unkenntnis der Konsument*innen über den Echtzeit-Börsenstrompreis dazu, dass sie nicht darauf reagieren können und auch keinen Anreiz dazu haben (Cramton et al., 2013). Die Annahme einer stark unelastischen Stromnachfrage ist demnach in der kurzen Frist plausibel. Dennoch kommen verschiedene empirische Studien zu dem Ergebnis, dass die Stromnachfrage in Deutschland zwar preisunelastisch, die Elastizität aber ungleich Null ist. Beispielsweise beziffern Hirth et al. (2022) die kurzfristige Preiselastizität der Stromnachfrage (ϵ_p) für Deutschland mit $\epsilon_p = -0,05$. Die Nachfrage ist unelastisch ($-0,05 > -1$), aber ungleich Null (Sievering, 2022, S. 73).^{7,8}

zusätzlichen Einheit Solarstrom erhöhen. Der positive externe Effekt einer Einheit Solarstrom ist folglich höher, wenn eine geringere Stromnachfrage herrscht.

⁷ Grund dafür könnten große energieintensive Unternehmen sein, die Strom zu den Echtzeitpreisen nachfragen (Hamenstädt, 2008). Auch einige private Haushalte fragen bereits Strom zu Echtzeitpreisen nach (Hirth et al., 2022).

⁸ Burke und Abayasekara (2018) kommen für die USA zu dem Ergebnis, dass die langfristige Nachfrageelastizität privater Haushalte deutlich höher ist als die kurzfristige ($\epsilon = -0,95$). Nicht nur in der kurzen Frist, sondern auch in der langen Frist kann es folglich zu einer Abweichung der Annahme einer vollkommen unelastischen Stromnachfrage kommen. Die mittlere bis lange Frist wird an dieser Stelle vernachlässigt.

Aufgrund der empirisch vorgefundenen Abweichung von der strengen Annahme einer vollkommen unelastischen Nachfrage, werden nachfolgend die Implikationen für die Externalitäten untersucht. Dies geschieht anhand von Abbildung 4. Zur Verdeutlichung

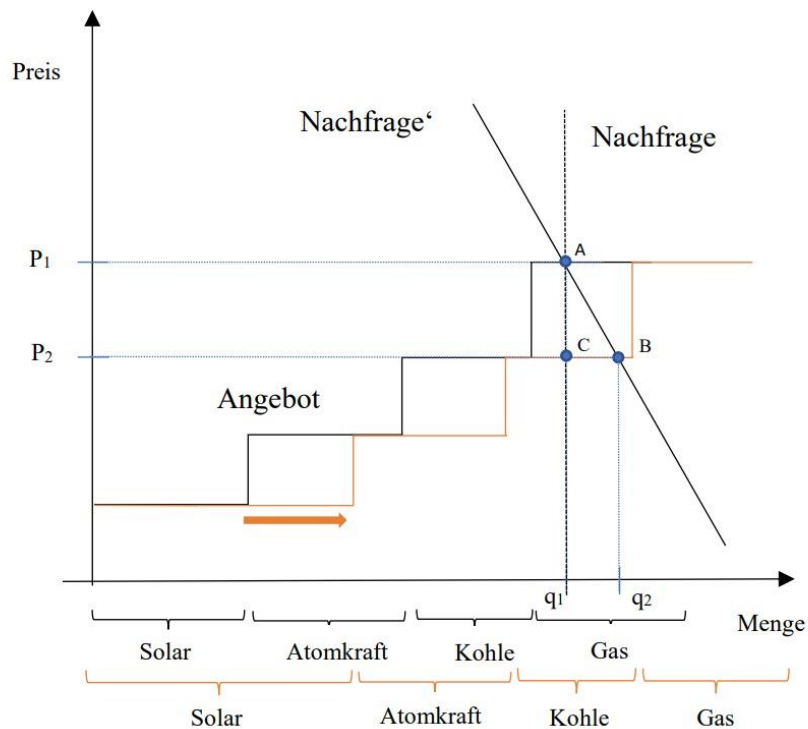


Abbildung 4: Externalitäten im Strommarkt bei Nachfrageelastizität $-1 < \varepsilon < 0$ (Eigene Darstellung in Anlehnung an Sakaguchi und Fujii (2021) und Tveten et al. (2013))

wurde sowohl die vollkommen unelastische Nachfrage aus Abbildung 3 im Graphen abgebildet als auch eine weniger steile und damit elastischere Nachfragekurve (Sievering, 2022, S. 73). Außerdem sind wieder zwei Angebotskurven für zwei unterschiedliche Angebotsmengen an Solarstrom abgebildet. Die Schnittpunkte A und C stellen die Gleichgewichte aus dem vorherigen Szenario aus Abbildung 3a und 3b dar. Im Punkt A ist Gas die marginale Erzeugungstechnologie, durch das erhöhte Solarstromangebot ist im Punkt C Kohle die marginale Erzeugungstechnologie. In Abbildung 4 kommt nun ein weiterer Schnittpunkt hinzu. Der Punkt B ist der Schnittpunkt der verschobenen Angebotskurve mit der elastischeren Nachfragekurve. Infolge der Preissenkung von p_1 auf p_2 sinkt der Stromsparanreiz und die Stromnachfrage erhöht sich (Fischer & Preonas, 2010) von q_1 auf q_2 .

In der Folge sinken auch die Externalitäten (Fischer & Preonas, 2010), wie in Punkt B deutlich wird. In Punkt B bleibt Kohle zwar wie in Punkt C die marginale Erzeugungstechnologie. Aber zur Deckung der erhöhten Stromnachfrage wird insgesamt mehr Kohle benötigt als für Punkt C. Des Weiteren wurde ein Teil der Kohle (der

Abschnitt der orangefarbenen Angebotskurve auf der Stufe der Technologie Kohle rechts von Punkt C) nicht mehr benötigt, um die Nachfrage zu decken. Diese in Szenario C nicht mehr benötigten Einheiten Kohlestrom werden nun in Szenario B zur Kompensation der erhöhten Nachfrage wieder benötigt. Eine zusätzliche Einheit Solarstrom verdrängt somit nicht mehr im Verhältnis von 1:1 die Erzeugungstechnologie Kohle. Durch die hohe Emissionsintensität von Kohle wird der positive externe Effekt einer zusätzlichen Einheit Solarstrom abgeschwächt (Fischer & Preonas, 2010).

Zusammengefasst konnte gezeigt werden, dass im Solarsektor positive Externalitäten durch die Vermeidung von CO₂-Emissionen vorliegen. Der Umfang der Externalitäten einer Einheit Solarstrom ist abhängig des vorherrschenden Strommix (Borenstein, 2012) und der Nachfrageelastizität von Strom. Damit variiert auch der gesellschaftliche Nutzen eines PV-Moduls mit den genannten Faktoren. Die notwendige Bedingung für einen Staatseingriff kann als gegeben erachtet werden, da Marktversagen durch Externalitäten vorliegt.

Bevor es im folgenden Kapitel um die Internalisierung der hergeleiteten positiven Externalität der CO₂-Vermeidung geht, wird verdeutlicht, warum sich das vierte Kapitel ausschließlich auf die Internalisierung der CO₂-Externalität beschränkt. Denn neben den positiven Externalitäten der PV-Module durch die Vermeidung von CO₂-Emissionen im Elektrizitätssektor können weitere Externalitäten durch PV-Module entstehen.⁹ Weil eine Erhöhung des solaren Stromangebots mit der Substitution alternativer Erzeugungsformen einhergeht, besteht eine Vergleichssituation zwischen verschiedenen Erzeugungsformen und damit auch zwischen den jeweils verursachten Externalitäten.¹⁰ Für die Abwägung der Externalitäten müsste eine „mehrdimensionalen Zielfunktion“ (Hohmeyer, 1989, S. 27) gebildet und maximiert werden und damit der gesellschaftliche Nutzen kardinal gemessen werden (ebd.). Alle entstehenden Externalitäten müssten in der Zielfunktion berücksichtigt,¹¹ in eine gleiche Einheit umgerechnet und gewichtet werden, um eine kardinale Nutzenordnung zu ermöglichen (ebd.). An dieser Stelle besteht ein zentrales

⁹ Ein Beispiel sind positive Innovationsexternalitäten. Sie entstehen, wenn aufgrund von Spillover-Effekten Firmen von Innovationen anderer profitieren können. Damit erhalten die Urheber*innen der Innovation nicht den vollständigen Gewinn der Innovation und ein ineffizient geringes Ausmaß an Forschung und Entwicklung (FuE) wird umgesetzt (Held et al., 2019).

¹⁰ Positive Externalitäten deutscher Kohleabbaugebiete sind denkbar, wenn es in den Abbaugebieten mangelnde berufliche Alternativen für die vom Strukturwandel Betroffenen und in der Folge eine hohe Belastung des Sozialsystems gibt.

¹¹ Dabei gilt es alle Produktionsschritte aller Erzeugungstechnologien sowie der benötigten Vorprodukte einzubeziehen.

Problem. Wenn der Nutzenverlust eines Individuums gegen den Nutzensgewinn eines anderen Individuums abgewogen wird, werden interpersonelle Nutzenvergleiche angestellt. Sie verletzen den methodologischen Individualismus und damit das der Ökonomik zugrunde liegende Werturteil (Roth, 2021, S. 1ff.). So wird deutlich, dass objektiv nur eine Externalität betrachtet werden kann. Dieses Ergebnis wird in Abschnitt 4.3 im Rahmen der Reflexion der Limitationen der Instrumentendiskussion aufgegriffen.

4 Instrumentendiskussion

Nachdem im 3. Kapitel das Vorliegen von positiven Externalitäten durch CO₂-Minderung hergeleitet wurde, steht im Zentrum dieses Kapitels die Frage nach der effizienten Behebung des Marktversagens. Welcher Staatseingriff führt zur Internalisierung der Externalitäten und damit zur Implementation der optimalen Menge? Im Rahmen der Marktversagensanalyse erfolgte bereits die Prüfung der notwendigen Bedingung für einen Staatseingriff. Unter ökonomischen Gesichtspunkten ist ein Staatseingriff allerdings erst zu rechtfertigen, wenn auch die hinreichende Bedingung für einen Staatseingriff erfüllt ist. Dafür muss der Staatseingriff zu pareto-superioren Ergebnissen im Vergleich zur Marktsituation führen (Roth, 2021, S. 160). Eine Allokation ist pareto-superior, wenn mindestens ein Individuum bessergestellt und kein anderes schlechtergestellt wird (Roth, 2021, S. 23). In Bezug auf die hinreichende Bedingung ergeben sich zwei Schwierigkeiten. Erstens ist die Überprüfung kaum möglich. Dazu müsste für alle jetzt und in Zukunft vom Staatseingriff Betroffenen ermittelt werden, ob der Staatseingriff sie besser-, gleich- oder schlechterstellt (Roth, 2021, 25f.). Zweitens ist zu erwarten, dass mindestens ein Individuum durch den Staatseingriff schlechtergestellt wird und damit keine Pareto-Superiorität gegeben ist.¹² Die erwähnte, kaum vermeidbare Verletzung des Pareto-Kriteriums durch einen Staatseingriff kann nur durch eine konstitutionenökonomische Argumentation überwunden werden. Mithilfe des Schleiers der Unsicherheit nach Buchanan und Tullock kann auf post-konstitutioneller Ebene die Pareto-Superiorität eines Staatseingriffes hergeleitet werden (Roth, 2009, S. 69). Eine

¹² Eine Pigou-Steuer ist beispielsweise ein Mittel zur Internalisierung negativer Externalitäten (Roth, 2021, 181f.). Sie kann folglich von Externalitäten betroffene Dritte besserstellen. Dennoch werden die Individuen, die die Steuer tragen, schlechter gestellt. Damit wird das Pareto-Kriterium verletzt. Ohne interpersonelle Nutzenvergleiche vorzunehmen, die den methodologischen Individualismus verletzen, kann die Situation ohne Staatseingriff nicht mit der Situation nach Staatseingriff verglichen und beurteilt werden (Roth, 2021, S. 23).

konstitutionenökonomische Argumentation wäre sehr umfangreich und führt deshalb in dieser Arbeit zu weit.

Anstatt die Erfüllung der hinreichenden Bedingung zu überprüfen, wird stattdessen nachfolgend die Erfüllung des ökonomischen Minimalprinzips überprüft. Ein vorgegebenes Ziel soll effizient, d. h. unter geringstmöglichem Ressourcenaufwand, erreicht werden. Theoretisch ist das Ziel die gesellschaftlich optimale Menge an CO₂-Emissionen. Im Rahmen der Marktversagensanalyse konnte nur die Nutzensteigerung durch CO₂-Minderungen hergeleitet werden, jedoch keine konkrete Zielmenge. Eine Zielmenge muss jedoch gegeben sein, damit mögliche Instrumente nach dem Kriterium der Effizienz ökonomisch beurteilt werden können. Deshalb ist eine exogene Zielsetzung notwendig. Als solche werden die im Abschnitt 2.1 genannten Klimaziele der deutschen Bundesregierung gewählt.

Das vierte Kapitel ist wie folgt gegliedert: In der ökonomischen Theorie sind Subventionen ein naheliegendes Instrument zur Internalisierung von positiven Externalitäten (Roth, 2021, S. 181). Aufgrund des EU ETS, das negative CO₂-Externalitäten internalisieren soll (Rave et al., 2013), sind nationale Subventionen international eingebettet.¹³ Im Zentrum des vierten Kapitels steht deshalb die Frage, ob zusätzlich zum Zertifikatehandel Subventionen notwendig und effizient sind. Dazu werden zwei potenzielle Begründungsansätze überprüft. Denkbar wäre erstens, dass zusätzliche Subventionen mögliche Ineffizienzen im Zertifikatehandel beheben können. Als zweite Begründungsmöglichkeit wird geprüft, ob zusätzliche Subventionen geeignet sind, um zusätzliche nationale Emissionsreduktionen zu erwirken. Über die im EU ETS gesetzten Reduktionsziele hinausgehende Emissionsminderungen sind notwendig, um die ambitionierteren Reduktionsziele Deutschlands zu erreichen.

4.1 Internalisiert das EU ETS die vorliegenden Externalitäten vollständig?

Die Prüfung, ob das EU ETS die im dritten Kapitel hergeleiteten Externalitäten der CO₂-Vermeidung internalisiert, erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird anhand der ökonomischen Theorie des Zertifikatehandels überprüft, ob der Zertifikatehandel theoretisch ein effizientes Instrument der Emissionsreduktion ist. Zweitens werden die

¹³ International eingebettet sind Subventionen in Sektoren, die am EU ETS teilnehmen. Da dies für den Solarsektor zutrifft, sind Interaktionen von Subventionen im Solarsektor mit dem EU ETS möglich und müssen folglich berücksichtigt werden.

Folgen einer Abweichung der Emissionsobergrenze des EU ETS von der optimalen Emissionsmenge für das Internalisierungspotenzial untersucht. Dazu wird zuerst die allgemeine Wirkung des EU ETS auf das Entscheidungskalkül der Stromproduzent*innen betrachtet. Drittens wird analysiert, wie das EU ETS die Merit-Order und den Strompreis beeinflusst. Zum Schluss werden die Erkenntnisse im Hinblick auf das Internalisierungspotenzial des EU ETS sowie die Notwendigkeit und Effizienz zusätzlicher Subventionen diskutiert.

4.1.1 Zertifikatehandel in der Theorie

Der Zertifikatehandel ist der Kategorie der Mengeninstrumente zuzuordnen (Feess & Seeliger, 2021, S. 107) und geht zurück auf das Werk „Pollution, Property and Prices“ von Dales (1968). Eine feste Menge, das optimale Verschmutzungsniveau, soll kosteneffizient erreicht werden (Rave, 2013). Das optimale Schadensniveau, in dieser Arbeit das optimale Emissionsniveau, liegt im Schnittpunkt des marginalen sozialen Nutzens der Vermeidung und den marginalen Vermeidungskosten (Raufer et al., 2022). In Höhe der optimalen Menge wird eine Emissionsobergrenze (Cap) festgelegt (Raufer et al., 2022). Da im sozialen Nutzen die Externalitäten inbegriffen sind (vgl. Kapitel 3.3.1), führt die Festlegung des Caps in Höhe der optimalen Emissionsmenge zur perfekten Internalisierung der Externalitäten (Raufer et al., 2022). Die bis zum Erreichen der Obergrenze verbleibende Menge an Emissionen wird in handelbare Emissionsrechte aufgeteilt, die von den Emittenten gekauft und verkauft werden können (Raufer et al., 2022). Typischerweise sind die Emissionsminderungen für verschiedene Emittenten mit unterschiedlich hohen Kosten verbunden (Tietenberg, 2006, S. 27). Unternehmen mit kostengünstigen Möglichkeiten zur Emissionsreduktion können überschüssige Zertifikate verkaufen und Unternehmen mit hohen Vermeidungskosten können Emissionsrechte zukaufen (Raufer et al., 2022; Tietenberg, 2006, S. 27; Tschochohei & Zöckler, 2008, S. 23). So werden die Emissionsminderungen an der Stelle umgesetzt, wo dies am kostengünstigsten möglich ist (Harrison & Radov, 2002). Anhand der Abbildung 5 wird dies deutlich. Sowohl die Abbildung als auch die Erläuterungen dazu folgen Tietenberg (2006, 31f.). Vereinfachend wird angenommen, dass es nur zwei Emissionsquellen gibt, die zusammen 30 Einheiten emittieren. Emissionsquelle₁ (EQ₁) und Emissionsquelle₂ (EQ₂) emittieren jeweils 15 Einheiten. Es wird angenommen, dass die Emission von insgesamt 15 Einheiten optimal ist, weshalb EQ₁ und EQ₂ zusammen ihre Emissionen um 15 Einheiten reduzieren müssen. Diese Emissionsreduktion kann

durch verschiedene Aufteilungen zwischen den Emissionsquellen erreicht werden. Alle möglichen Kombinationen sind an der Abszissenachse abgebildet. Am Ursprung der marginalen Grenzvermeidungskosten von EQ₁ würde diese 0 Einheiten reduzieren und EQ₂ 15 Einheiten. Am Ursprung der Grenzvermeidungskosten von Emissionsquelle₂ wäre der Vermeidungsbeitrag umgekehrt; die Emissionsquelle₁ würde alle 15 Einheiten reduzieren.

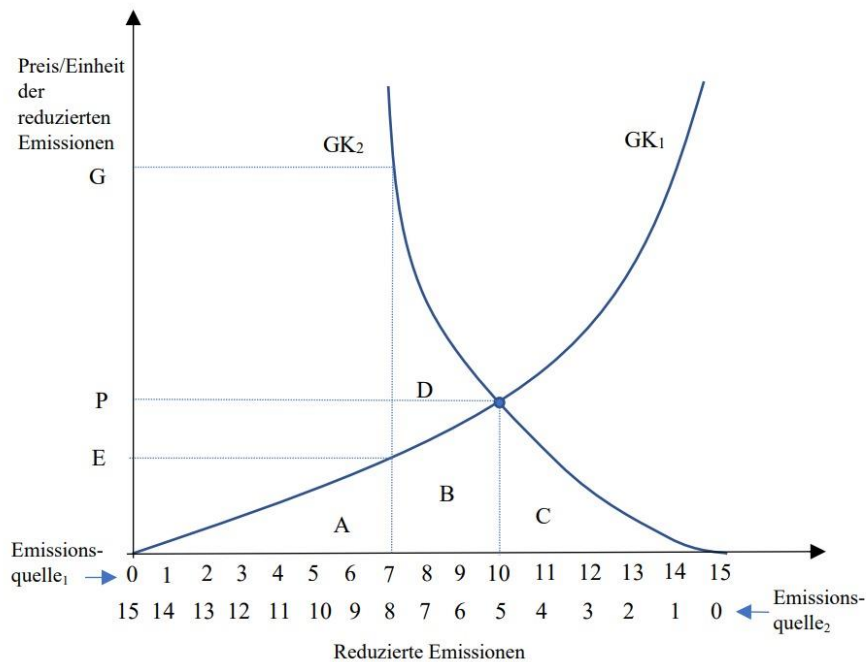


Abbildung 5: Kosteneffizienz im Zertifikatehandel (Eigene Darstellung nach Tietenberg (2006, 31))

Beide Unternehmen haben steigende Grenzvermeidungskosten; die Vermeidung einer weiteren Einheit Emissionen ist immer teurer als die Vermeidung der vorherigen Einheit. Daraus folgt, dass zwar viele verschiedene Aufteilungen der Reduktion von 15 Einheiten möglich sind, diese aber mit unterschiedlich hohen Gesamtkosten verbunden sind. Die Reduktion der 15 Einheiten erfolgt zu den geringstmöglichen Gesamtkosten, wenn die Emissionsquelle₁ 10 Einheiten reduziert und EQ₂ 5 Einheiten. Die Summe der Flächen A, B und C spiegelt dann die Gesamtkosten wider; EQ₁ muss A und B zahlen, EQ₂ hat Kosten in Höhe der Fläche C. Alle anderen Kombinationen wären mit höheren Gesamtkosten verbunden. So würde beispielsweise die Aufteilung 7 Einheiten durch EQ₁ und 8 Einheiten durch EQ₂ für die erste Quelle Kosten in Höhe der Fläche A verursachen. Die zweite Quelle müsste B+C+D bezahlen. Die Gesamtkosten sind um die Fläche D höher. EQ₁ zahlt zudem für die letzte reduzierte Einheit den Preis E und EQ₂ den viel höheren Preis G. Für die zweite Quelle wäre es nun günstiger, für einen Preis unter G ein Emissionsrecht zu kaufen, anstatt zum Preis G selbst eine Einheit Emissionen zu

reduzieren. Die erste Quelle wiederum kann sich besserstellen, wenn sie statt 7 Einheiten 8 Einheiten reduziert und dafür Emissionsrechte zu einem Preis höher als die marginalen Vermeidungskosten der 8. Einheit verkaufen kann. Dieser Anreiz zum Handel von Zertifikaten besteht so lange, bis sich die Grenzvermeidungskosten beider Emissionsquellen im Preis P angleichen. Der Preis P ist dann auch der gleichgewichtige Zertifikatspreis, da P dem Wert der letzten vermiedenen Einheit beider Emissionsquellen entspricht. Der Angleich der Grenzvermeidungskosten in Höhe des Zertifikatspreises wird auch als *equimarginality rule* bezeichnet (Del Río, 2008).

Damit die vorgegebene Emissionreduktion auch kostenminimal erfolgt, müssen einige Annahmen erfüllt sein. Erstens muss die lokale Verteilung der Emissionen irrelevant sein, sonst wären zusätzliche Instrumente notwendig (Braathen 2011). Aufgrund der Globalität der Externalitäten durch CO₂-Emissionen (Feess & Seeliger, 2021, S. 53) ist diese Annahme erfüllt. Außerdem muss im Emissionsrechtemarkt vollkommener Wettbewerb herrschen (Harrison & Radov, 2002). Liegt im Zertifikatsmarkt unvollständiger Wettbewerb vor, ist die gehandelte Zertifikatsmenge zu gering und der Zertifikatspreis spiegelt nicht mehr die wahren Grenzvermeidungskosten wider (Feess & Seeliger, 2021, 119f.). Zertifikatsanbieter*innen bieten weniger Zertifikate als bei vollständigem Wettbewerb an, um durch das künstlich geringe Angebot den Zertifikatspreis zu erhöhen. Aufgrund des unvollständigen Wettbewerbs ist dies möglich, ohne zu befürchten, dass zu einem geringeren Preis Zertifikate angeboten werden (ebd.). Außerdem müssten die Transaktionskosten gering sein (Sijm et al., 2008, S. 24). Hohe Transaktionskosten würden die Kostenreduktionen infolge des Zertifikatehandels schmälern (Harrison & Radov, 2002).

Es lässt sich festhalten, dass der Zertifikatehandel ein effektives Instrument der Emissionsminderung ist, weil aufgrund der verbindlichen Obergrenze das Emissionsziel erreicht wird (Feess & Seeliger, 2021, S. 110). Der Zertifikatehandel ist effizient, weil dies zu den geringsten Kosten geschieht (Tschochohei & Zöckler, 2008, S. 23).

4.1.2 Anwendung auf das EU ETS

Bei der Implementation des Zertifikatehandels durch den EU ETS kommt es jedoch zwangsläufig zu einer Abweichung der oben genannten Idealbedingungen. Die Ermittlung der optimalen Emissionsmenge wäre zum einen mit sehr hohen Transaktionskosten verbunden, da sich die hohe Zahl Beteiligter in Verhandlungen über die zu emittierende Menge einigen müsste (Roth, 2021, S. 185). Zum anderen wären,

selbst wenn diese aufwändigen Verhandlungen gelängen, erst zukünftig von Externalitäten Betroffene nicht an den Verhandlungen beteiligt (ebd.). So ist der marginale soziale Nutzen der Emissionsreduktion nicht ermittelbar und die optimale Emissionsmenge folglich ebenfalls nicht. Anstelle des optimalen Emissionsniveaus werden Emissionsreduktionsziele und damit die Emissionsobergrenze im EU ETS politisch festgelegt (Rave, 2013). Diese exogen festgelegte Emissionsobergrenze entspricht sehr wahrscheinlich nicht dem optimalen Emissionsniveau. Nachfolgend soll untersucht werden, wie sich die Abweichung des tatsächlichen Caps des EU ETS von der optimalen Emissionsmenge auf das Internalisierungspotenzial der Externalitäten auswirkt.

Als erstes wird die Wirkung des EU ETS auf das Entscheidungskalkül der Stromproduzent*innen betrachtet. Aus der zuvor beschriebenen Funktionsweise des Zertifikatehandels folgt für die Stromproduzent*innen, dass sie die ihnen zugewiesenen Zertifikate einsetzen, um die verursachten Emissionen abzudecken (Sijm et al., 2008, S. 23). Verursachen sie mehr oder weniger Emissionen als ihnen Zertifikate zugewiesen wurden, müssen sie entweder weitere Zertifikate hinzukaufen oder können nicht benötigte Emissionsrechte verkaufen (ebd.). Aufgrund der Möglichkeit, Zertifikate zu verkaufen, entstehen Opportunitätskosten in Höhe des Zertifikatspreises für jede emittierte Einheit („cost of not selling an allowance“ (Sijm et al., 2008, S. 23). Dabei gibt es zwei Arten der Zuweisung von Zertifikaten. Eine Möglichkeit ist die kostenlose Zuweisung von Zertifikaten (Grandfathering). Diese erfolgt entweder basierend auf den historischen Emissionen des Unternehmens (Feess & Seeliger, 2021, S. 108) oder angelehnt an eine sektorspezifische Emissions-Benchmark (Europäische Kommission, 2011). Eine zweite Möglichkeit ist die Auktion aller Zertifikate (Feess & Seeliger, 2021, S. 108). Das EU ETS sieht seit 2013 für den Stromsektor vor, dass alle Zertifikate über Auktionen gekauft werden müssen (Europäische Kommission, 2011). Die oben genannten Opportunitätskosten entstehen unabhängig davon, ob die Zertifikate ersteigert werden müssen oder kostenlos zugewiesen werden (Sijm et al., 2008, S. 23).¹⁴ Da die Stromproduzent*innen ihren Gewinn maximieren, beziehen sie die Opportunitätskosten in die variablen Kosten und damit in den Strompreis ein (ebd.). Diese Internalisierung ins

¹⁴ Die Art der Zuweisung beeinflusst lediglich die ökonomischen Renten der Marktteilnehmer entweder zugunsten des Staats oder zugunsten der Emittenten (Sijm et al., 2008, S. 24). Verteilungswirkungen sind jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit und werden deshalb nicht näher betrachtet.

Entscheidungskalkül ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass ein Anreiz zur kostengünstigsten Emissionsreduktion besteht (ebd.).

Nachdem die allgemeine Wirkung auf das Entscheidungskalkül erläutert worden ist und hergeleitet wurde, dass die Stromproduzent*innen das EU ETS in ihr Kalkül mit einbeziehen, kann nun die Internalisierung der Externalitäten untersucht werden. In Kapitel 3 wurde festgestellt, dass der Umfang der positiven Externalitäten einer marginalen Einheit Solarstrom abhängig von der verdrängten Erzeugungstechnologie ist. Deshalb ist für das Internalisierungspotenzial des EU ETS relevant, wie es die Merit-Order und damit die marginale Erzeugungstechnologie beeinflusst. Denn wenn sich die Merit-Order verändert, ändert sich auch der Strompreis und damit der marginale Gewinn einer zusätzlichen Einheit Solarstrom (Sijm et al., 2008, S. 26). Dieser Anstieg der marginalen Gewinne und die Wirkung des EU ETS auf die Merit-Order werden nachfolgend mithilfe dreier verschiedener Szenarien komparativ-statisch analysiert. Die Szenarien sowie die Erläuterungen und die dazugehörigen Abbildungen (6a, 6b und 7) basieren auf den theoretischen Ausführungen von Sijm et al. (2008, 23-28, 42-45) zu den Auswirkungen des EU ETS auf den Strompreis. Die Änderungen des Strompreises werden dann auf das Internalisierungspotenzial der Externalitäten übertragen.

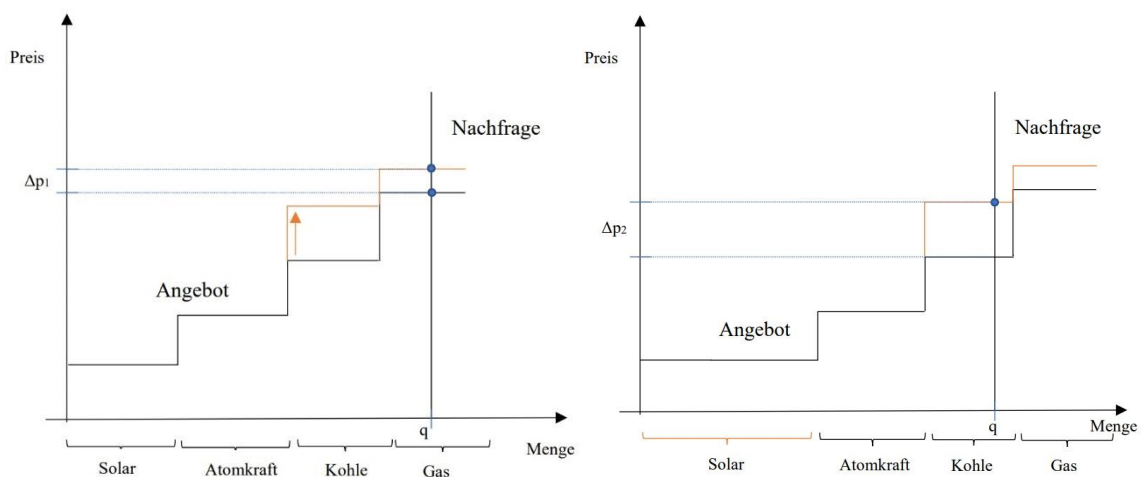


Abbildung 6a und 6b: Merit-Order bei geringem Zertifikatspreis und geringem und hohem Solarstromangebot (Eigene Darstellung in Anlehnung an Sijm et al. (2008, S. 44) und eigene Darstellung)

In Abbildung 6a und 6b wird zunächst die Wirkung des EU ETS auf den Strommarkt betrachtet, wenn der Zertifikatspreis gering ist. Infolge des Zertifikatspreises steigen die marginalen Kosten der Erzeugungstechnologien Kohle und Gas an, da die Produzent*innen die CO₂-Kosten in ihr Kalkül miteinbeziehen. Teile der Angebotskurve

verschieben sich durch den Anstieg der marginalen Kosten nach oben. Die Stärke des Anstiegs ist abhängig von den CO₂-Intensitäten der Erzeugungsformen. Damit steigen die marginalen Kosten von Kohle stärker an als die von Gas. Dennoch bleiben die marginalen Kosten von Kohle in diesem Szenario insgesamt geringer als die von Gas. Die Merit-Order verändert sich nicht, da Gas weiterhin die teuerste Erzeugungstechnologie ist. Der Anstieg der marginalen Kosten von Solarstrom infolge des Zertifikatehandels ist aufgrund der sehr geringen Emissionsintensität marginal und wird deshalb vernachlässigt. Gleiches gilt für den Atomstrom.¹⁵

Zwar ändern sich die marginalen Kosten der Erzeugungstechnologie Solar nicht. Jedoch verändert sich der relative Kostenvorteil gegenüber Kohle und Gas verglichen mit der Situation vor Einführung des Zertifikatehandels. Analog zu der inhaltlich gleichwertigen Betrachtung positiver oder negativer Externalitäten durch CO₂-Verminderung oder CO₂-Emission sind auch hier zwei gleichwertige Betrachtungsweisen möglich: Entweder wird die Erzeugung einer marginalen Einheit Solarstrom infolge des Zertifikatehandels im Vergleich zur Erzeugung einer Einheit Kohle oder Gas relativ günstiger. Oder Kohle und Gas werden relativ noch teurer (UBA, 2023).

Zentral ist, dass der Anstieg der marginalen Kosten von Kohle und Gas zu einem Anstieg des Strompreises führen. Die Stärke des Strompreisanstiegs ist abhängig von der marginalen Erzeugungstechnologie. In Abbildung 6a ist Gas die marginale Erzeugungstechnologie. Der Strompreis steigt in diesem Szenario um die gestiegenen marginalen Kosten von Gas an (Δp_1). Durch den erhöhten Strompreis steigen auch die zusätzlichen Gewinne einer zusätzlichen Einheit Solarstrom um Δp_1 .¹⁶ In Abbildung 6b erhöht sich c. p. (wie in Abbildung 4 in Abschnitt 3.3.2) die insgesamt zu einem Zeitpunkt verfügbare Menge Solarstrom, wodurch sich die marginale Erzeugungstechnologie von Gas zu Kohle ändert. In Abschnitt 3.3.2 wurde hergeleitet, dass die positiven Externalitäten einer zusätzlichen Einheit Solarstrom höher sind, wenn Kohle substituiert wird, als wenn Gas ersetzt wird. Wie in Abbildung 6b zu erkennen ist, spiegelt das EU ETS die unterschiedlich starke Emissionsminderung wider: Der Strompreisanstieg und damit der zusätzliche Gewinn einer zusätzlichen Einheit Solarstrom (Δp_2) ist höher, wenn Kohle die marginale Erzeugungstechnologie ist. Damit internalisiert das EU ETS die zu

¹⁵ Es wird angenommen, dass es innerhalb der verschiedenen Erzeugungstechnologien keine Variation der Emissionsintensitäten gibt.

¹⁶ Wie bereits erläutert, bleiben die marginalen Kosten von Solarstrom unverändert, weshalb der Gewinn um exakt Δp_1 ansteigt.

einem bestimmten Zeitpunkt entstehenden positiven Externalitäten proportional. Denn die Profitabilität einer zusätzlichen Einheit Solarstrom steigt proportional zu den mit dieser Einheit erzeugten CO₂-Minderungen.

Dabei ist zu beachten, dass der Wechsel der marginalen Erzeugungstechnologie durch eine exogene Änderung des Strommix hervorgerufen wurde und nicht durch das EU ETS induziert wurde. Abbildung 7 soll verdeutlichen, dass ein hoher Zertifikatspreis unter den Gegebenheiten aus Abbildung 6a, d. h. ohne exogene Änderung beispielsweise des Strommix oder des Nachfrageniveaus, eine Änderung der marginalen Erzeugungstechnologie bewirken kann. Wie in Abbildung 6a und 6b, steigen auch in Abbildung 7 die marginalen Kosten von Kohle und Gas aufgrund des Zertifikatehandels an. Die marginalen Kosten von Kohle steigen aber aufgrund des hohen Zertifikatspreises wegen ihrer Emissionsintensität so stark an, dass sie die marginalen Kosten von Gas übersteigen, obwohl die marginalen Kosten von Gas ohne den Zertifikatehandel höher sind. Die Merit-Order ändert sich. Nicht mehr Gas, sondern Kohle ist die marginale Erzeugungstechnologie. Die unterschiedlich hohen CO₂-Kosten sind außerdem durch die Flächen A und B gekennzeichnet. Die Gesamtkosten der Technologie Kohle sind deutlich höher als die Gesamtkosten der Technologie Gas ($B \gg A$).

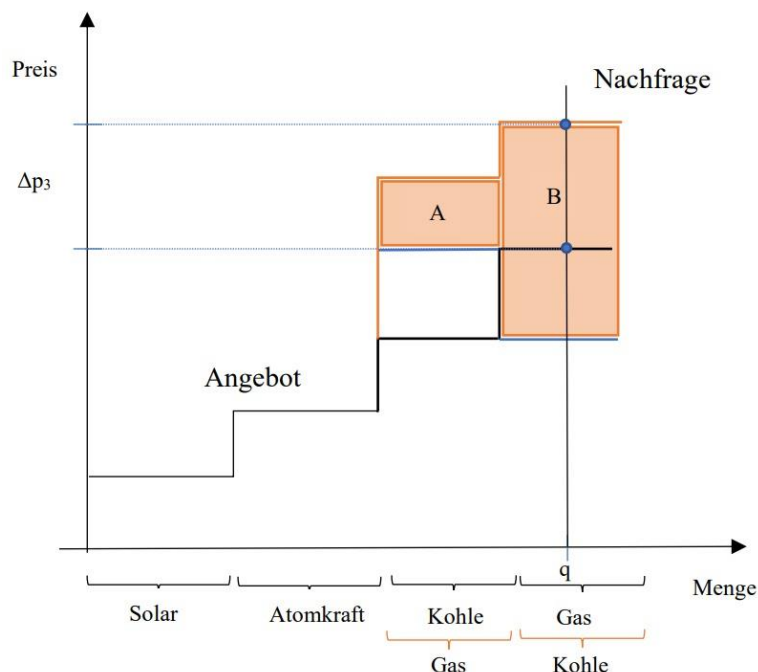


Abbildung 7: Merit-Order bei hohem Zertifikatspreis (Eigene Darstellung basierend auf Sijm et al. (2008, 44))

Weil die Grenzkosten der preisbestimmenden marginalen Erzeugungstechnologie Kohle stärker steigen, steigt auch der Strompreis stärker an (Δp_3). Damit ist auch der zusätzliche

Gewinn einer weiteren Einheit Solarstrom höher als in den Szenarien 1 und 2. Denn auch in Szenario 2 war Kohle die marginale Erzeugungstechnologie, aber nur aufgrund des erhöhten Solarstromangebots. In diesem Szenario ist Kohle die marginale Erzeugungstechnologie, obwohl Gas zur Nachfragedeckung benötigt wird und der Strommix unverändert bleibt. Die Emissionsminderungen sind höher, als wenn die Merit-Order unverändert bliebe (Gugler et al., 2021). Damit werden in Szenario 3 die höchstmöglichen CO₂-Einsparungen einer zusätzlichen Einheit Solarstrom verursacht, die auch durch den höchsten Anstieg des zusätzlichen Gewinns widergespiegelt werden. Der hohe Strompreisanstieg und damit der hohe zusätzliche Profit einer weiteren Einheit Solarstrom spiegeln die entstehenden Emissionsminderungen proportional wider.

Mithilfe der drei Szenarien konnte hergeleitet werden, dass das ETS die zu einem Zeitpunkt entstehenden positiven Externalitäten internalisiert, indem es die zusätzliche Profitabilität von Solarstrom proportional zu den damit erzeugten CO₂-Minderungen steigert. In einem letzten Analyseschritt soll dieser Effekt nun noch auf das private Entscheidungskalkül für PV-Anlagen übertragen werden. Berücksichtigt der private Haushalt nun den positiven externen Effekt der PV-Anlage bei seiner Nachfrageentscheidung?

Dabei wurden in Abschnitt 3.2.1 insbesondere zwei nutzenstiftende Variablen einer PV-Anlage identifiziert: die Einsparungen in Höhe des Strompreises und die Erlöse in Höhe der Einspeisevergütung. Durch das ETS steigen der Strompreis und damit die zusätzlichen Gewinne einer zusätzlichen Einheit Solarstrom. Für den Haushalt können die zusätzlichen Gewinne treffender als zusätzliche Ersparnisse bezeichnet werden. Denn in Höhe des selbst produzierten und selbst verbrauchten Solarstroms muss kein Strom mehr zum Strompreis nachgefragt werden (Roth, 2023). Folglich entsteht durch die Strompreiserhöhung ein zusätzlicher Anreiz eine PV-Anlage nachzufragen, weil durch das ETS der soziale Nutzen der PV-Anlage im Strompreis proportional internalisiert und vergütet wird.

Allerdings wirkt dieser Anreiz nur für den eigenverbrauchten Strom. Für Strom, der über den Eigenverbrauch hinaus produziert wird, erhält der Haushalt eine Einspeisevergütung. Es wird angenommen, dass die Einspeisevergütung unterhalb des Strompreises liegt. Wenn ein Energieversorgungsunternehmen seinen Technologiemitmix ändert und den Anteil emissionsintensiver Technologien senkt und den emissionsärmeren Technologien erhöht, kann es erlösbringend Zertifikate verkaufen (Rave, 2013). Private Haushalte

nehmen im Gegensatz dazu nicht am Zertifikatehandel teil (UBA, 2023). Wenn ein privater Haushalt zur Veränderung des Technologiemit beiträgt, indem er eine Einheit Solarstrom einspeist und eine Einheit emissionsintensiver erzeugten Strom substituiert, kann der Haushalt als Gegenleistung dafür keine Zertifikate verkaufen und somit keine zusätzlichen Erlöse generieren. Lediglich das Energieversorgungsunternehmen muss dafür weniger Zertifikate nachfragen (Roth, 2023). Liegt die Einspeisevergütung unterhalb des Strompreises und nimmt der Haushalt nicht am Zertifikatehandel teil, ist anzunehmen, dass der soziale Nutzen des über den Eigenverbrauch hinausgehenden Solarstroms nicht vollständig internalisiert wird. In der Folge ist es möglich, dass private PV-Anlagen unterdimensioniert sind. Es ist anzunehmen, dass sie in der Tendenz eher auf eine maximale Eigenverbrauchsrate ausgelegt werden, da für den eigenverbrauchten Strom die entstehenden Externalitäten vergütet werden.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass das ETS eine Änderung des Strompreises verursacht, die proportional zu den im jeweiligen Szenario verursachten Externalitäten ist. Es ist festzustellen, dass das EU ETS statisch effizient ist, weil durch das ETS die kostengünstigsten Technologien zur Emissionsreduktion eingesetzt werden, um das vorgegebene Minderungsziel zu erreichen (Rave, 2013). Darüber hinaus entfaltet sich eine dynamische Wirkung, weil das ETS den Technologiewechsel von emissionsintensiven Erzeugungstechnologien zu emissionsärmeren Technologien incentiviert (Sijm et al., 2008, S. 24). Es kann von zwei verbleibenden Defiziten ausgegangen werden. Erstens ist die Anreizwirkung zum Technologiewechsel für private Haushalte zwar gegeben, jedoch mit einer Einschränkung: Es ist anzunehmen, dass nur für eigenverbrauchten Strom der soziale Nutzen internalisiert wird und damit potenziell geringere Anlagengrößen nachgefragt werden als gesellschaftlich optimal. Zweitens internalisiert das ETS die vorliegenden Externalitäten zwar proportional, aber nicht perfekt. Grund dafür ist die Abweichung der Emissionsobergrenze von der optimalen Emissionsmenge.

In Anbetracht dieser Tatsache könnte eine zusätzliche Subventionierung potenziell gerechtfertigt sein, wenn sie entweder die Internalisierung von Externalitäten für private Haushalte vervollständigt oder das Informationsproblem in Bezug auf die optimale Emissionsmenge löst. Im Einklang mit der Tinbergen-Regel (Tinbergen, 1952) ist zu vermuten, dass das erste Problem eher über Verbesserungen des Zertifikatehandels lösbar wäre. Der Tinbergen-Regel zufolge kann die Behebung eines Marktversagens am besten

durch *ein* Instrument erreicht werden (Tinbergen, 1952).¹⁷ Denkbar wäre folglich theoretisch die Teilnahme der privaten Haushalte am Zertifikatehandel. Auch das zweite Problem der unvollständigen Information ist nicht durch Subventionen lösbar. Damit eine Subvention Externalitäten perfekt internalisiert, muss auch die optimale Menge bekannt sein (Raufer et al., 2022). Deshalb liegt kein Grund zur zusätzlichen Implementation von Subventionen vor.

4.2 Divergenz europäischer und deutscher

Emissionsreduktionsziele: Grundlage zur Rechtfertigung zusätzlicher Subventionen?

Nach der Überprüfung der effizienten Korrektur des Marktversagens ist weiterhin offen, ob das EU ETS geeignet ist, die deutschen Klimaziele zu erreichen. Wie in Kapitel 2 bereits angeführt, besteht eine Divergenz zwischen dem europäischen und deutschen Emissionsreduktionsziel bis 2030. Das ambitioniertere deutsche Ziel sieht eine um 10 Prozentpunkte stärkere Emissionsreduktion um insgesamt 65 % bis 2030 vor.

Der Beantwortung der Frage steht jedoch die schwierige Vergleichbarkeit der europäischen und deutschen Ziele entgegen. Zur Bekämpfung des Klimawandels müssen die Emissionen global reduziert werden. Es geht folglich um eine insgesamte CO₂-Minderung. Die geografische oder sektorspezifische Verteilung der Emissionen ist irrelevant (Feess & Seeliger, 2021, S. 53). Das EU ETS deckt jedoch nur rund 40 % der europäischen Treibhausgasemissionen ab (Europäische Kommission, 2022). Damit müssen die ETS-Sektoren nur einen Teil der gesamten Emissionsreduktionen liefern, der andere Anteil muss durch Nicht-ETS-Sektoren erfolgen (Sijm, 2005). Durch die unvollständige Abdeckung des EU ETS erfolgt auch kein Ausgleich der Grenzvermeidungskosten über alle Sektoren hinweg (Cludius et al., 2019). Somit müssen für EU-ETS-Sektoren und Nicht-EU-ETS-Sektoren separat Ziele definiert werden. In der Folge ist es schwierig zu beurteilen, ob das europäische Ziel für die EU-ETS-Sektoren streng genug ist, um das sektorunspezifische deutsche Reduktionsziel zu erreichen.¹⁸ Das

¹⁷ Die Tinbergen-Regel wird in dieser Arbeit zwar angewandt, ist aber in der Literatur nicht gänzlich unumstritten. In ihrer Fallstudie kommen Jensen und Skytte (2003, S. 71) beispielsweise zu dem Ergebnis, dass bei zwei zu erreichenden Zielen auch *ein* Instrument optimal sein kann.

¹⁸ Unabhängig davon, welches Ziel das EU ETS erreichen soll, ist offen, ob die aktuelle institutionelle Ausgestaltung des EU ETS das angestrebte Ziel erreichen kann. So kommt beispielsweise Wildgrube (2022) zu dem Schluss, dass die Erhöhung des *linear reduction factors* und die angepasste Market Stability Reserve unzureichend sein könnten, ihre angestrebten Ziele zu erreichen. Ob die aktuelle institutionelle

deutsche Ziel ist zwar numerisch höher. Es ist aber grundsätzlich denkbar, dass aufgrund in Deutschland vorherrschender struktureller Gegebenheiten eine Emissionsreduktion in Nicht-EU-ETS-Sektoren kostengünstiger erfolgen kann als in EU ETS Sektoren. Dann würden verstärkte Reduktionen in den Nicht-EU-ETS Sektoren dazu führen, dass das deutsche Ziel erreicht werden kann, obwohl die Ziele im EU ETS weniger ambitioniert sind. Angesichts des hohen Emissionseinsparpotenzials im Energiesektor (IPCC, 2022c) und der doch insgesamt beachtlichen Abdeckung von Emissionen bleibt der beschriebene Fall eher unwahrscheinlich. So wird nachfolgend angenommen, dass die angestrebten Reduktionen im EU ETS nicht ambitioniert genug sind, die deutschen Ziele zu erreichen. Daraus ergibt sich die Frage, wie Deutschland zusätzliche Emissionsreduktionen erwirken kann, um die ambitionierteren Klimaziele zu erfüllen. Sind Subventionen für PV-Module ein notwendiges und geeignetes Mittel zur zusätzlichen Emissionsminderung? Die Beantwortung der Fragen erfolgt in zwei Schritten: Zuerst wird kurz die allgemeine Wirkung von Subventionen betrachtet und danach der Effekt zusätzlich zum bereits implementierten ETS eingeführter Subventionen.

Nicht nur das Konzept der Externalitäten basiert auf Pigou (1912), sondern auch die Internalisierung ebendieser mittels Subventionen. Während eine Pigou-Steuer die privaten Grenzkosten auf die sozialen Grenzkosten erhöht und damit die Implementation der sozial optimalen Menge bewirkt (Roth, 2021, S. 181–185), senkt eine Pigou-Subvention den Preis (Brümmerhoff & Büttner, 2015, S. 69). Dadurch erhöht sich die Menge auf das soziale Optimum, sodass die positiven Externalitäten unter Annahme vollständiger Information internalisiert werden (Roth, 2021, S. 181–185). Unabhängig davon, ob ein Zertifikatehandel bereits implementiert ist, senken Subventionen die marginalen Kosten der solaren Elektrizitätsproduktion (Böhringer & Rosendahl, 2010). Sie steigern damit die zusätzlichen Gewinne der Solarmodule (ebd.), wodurch das Angebot (mittel- bis langfristig) steigt. Aufgrund technologischer Merkmale ist das Solarstromangebot kurzfristig exogen (Borenstein, 2012). Infolge der Subventionen und des erhöhten Solarstromangebots sinken die CO₂-Emissionen dann (in der mittleren Frist) zunächst.

Ausgestaltung des EU ETS geeignet ist, die europäischen Klimaziele zu erreichen, ist jedoch nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit. Unabhängig der Effektivität des EU ETS wird deutlich, dass es darauf ausgelegt ist, die weniger ambitionierten europäischen Reduktionsziele zu erreichen.

4.2.1 Subventionen zusätzlich zum EU ETS – Der Wasserbetteffekt

Die im ETS für alle ETS-Sektoren verbindlich festgelegte Emissionsobergrenze führt dazu, dass zusätzliche emissionsmindernde Maßnahmen eine Verlagerung der Emissionen bewirken: entweder geografisch auf andere Emittenten in Europa oder zeitlich (Agora Energiewende & Öko-Institut, 2018). Dieses Phänomen wird als Wasserbetteffekt bezeichnet. Dahinter verbirgt sich folgender Mechanismus: Alle Emittenten sind über die verbindliche Emissionsobergrenze miteinander verbunden (Sijm, 2005). Die Subvention von PV-Modulen führen zu einem erhöhten Solarstromangebot und damit zu geringeren Emissionen. In der Folge sinkt die Zertifikatsnachfrage (Braathen, 2011).¹⁹ Dadurch sinkt der Zertifikatspreis (Fischer & Preonas, 2010) und andere Firmen im EU ETS können mehr emittieren, bis die zusätzlich freigewordenen Zertifikate erschöpft sind (Braathen, 2011).²⁰ Die Zertifikatspreise spiegeln nicht mehr die Grenzvermeidungskosten wider (Fischer & Preonas, 2010). Damit wird die durch den Cap definierte Emissionsreduktion nicht mehr kostenminimal erreicht (Goulder & Stavins, 2010). Denn entweder werden PV-Module durch die Subvention gefördert, obwohl sie durch das EU ETS ohnehin verstärkt nachgefragt würden (Sijm, 2005). Oder die Solartechnologie trägt zur Erreichung des Caps bei, ist aber ohne die Subvention nicht Teil des kostengünstigsten Technologiemicx zur Erreichung des Caps (Del Río et al., 2013). In beiden Fällen steigen die Kosten, obwohl europaweit nicht mehr CO₂ reduziert wird (Sijm, 2005). Wie Sijm (2005) anhand eines numerischen Beispiels zeigt, kann es zwar dazu kommen, dass ein Land durch zusätzliche Instrumente in ETS-Sektoren höhere Emissionsreduktionen erreicht. Das würde bedeuten, dass Subventionen für Solartechnologien helfen können, Deutschlands ambitionierteren Ziele zu erreichen. Jedoch zeigt Sijm (2005) außerdem, dass in anderen ETS-Ländern mehr CO₂ emittiert wird, während das Land mit den zusätzlichen Subventionen zusätzliche Kosten trägt. Perino (2018, S. 262) fasst den Wasserbetteffekt sehr treffend zusammen: „Überlappende Policies bestimmen, wer emittiert, aber nicht wieviel insgesamt emittiert wird“.

Im Einklang mit der Tinbergen-Regel, dass die Behebung eines Marktversagens am besten durch *ein* Instrument erreicht werden kann (Tinbergen, 1952), sind zusätzliche

¹⁹ Am Ende des Abschnitts 4.1.2 wurde hervorgehoben, dass das Energieversorgungsunternehmen aufgrund des produzierten Solarstroms weniger Zertifikate nachfragen muss.

²⁰ Der gesunkene Zertifikatspreis kann aber die Durchsetzung einer strengeren Reduktion der Obergrenze in der Zukunft ermöglichen (Braathen, 2011).

Subventionen in ETS-Sektoren nicht zielführend für zusätzliche Emissionsreduktionen. Das Zwischenfazit lautet, dass zusätzliche Subventionen für Solarmodule zwar grundsätzlich zu zusätzlichen Emissionsreduktionen in Deutschland führen können. Da aber aufgrund der Emissionsobergrenze des EU ETS europaweit nicht weniger emittiert wird und aufgrund der Globalität der Externalität irrelevant ist, wo emittiert wird, können zusätzliche Subventionen nicht als zielführend erachtet werden (Sijm, 2005). Diese Aussage gilt für Subventionen in Sektoren, die vom EU ETS abgedeckt sind.

4.2.2 Zusätzliche Emissionsreduktionen durch die Stilllegung von Zertifikaten

Um dennoch zusätzliche Emissionsreduktionen zu erwirken, wäre es zielführender am EU ETS anzusetzen. Eine Lösung wäre die Absenkung der Obergrenze des EU ETS, um zusätzliche Reduktionen zu erreichen (Knopf et al., 2014). Wäre diese Absenkung der Obergrenze stark genug, könnte das deutsche Reduktionsziel in den ETS-Sektoren theoretisch erreicht werden. Das EU ETS ist jedoch ein multilaterales Instrument, dessen Ausgestaltung und Stringenz nicht allein durch die deutsche Bundesregierung bestimmt wird. Aus politökonomischer Perspektive erscheint eine Absenkung, die exakt den Zielvorstellungen Deutschlands entspricht, sehr unwahrscheinlich. Der Fokus an dieser Stelle soll deshalb auf einem Ansatz liegen, den Deutschland unilateral umsetzen kann.

Nach Braathen (2011) eignet sich dazu die Stilllegung von Emissionszertifikaten. Zertifikate werden stillgelegt, indem sie gekauft, aber verbindlich nicht zur Emissionskompensation eingelöst werden (*buy and hold*) (Doda et al., 2021). Die nachfolgenden Überlegungen basieren auf Doda et al. (2021). Infolge der Stilllegung sinkt die Emissionsmenge, die die Unternehmen im EU ETS ausstoßen dürfen. Weil das Zertifikatsangebot sinkt, müssen die Unternehmen mehr Emissionen reduzieren, um insgesamt die Emissionsobergrenze einzuhalten. Dadurch steigt der Zertifikatspreis. In der Folge sinkt die Zertifikatsnachfrage, da mit steigendem Preis mehr Emissionsvermeidungstechnologien rentabel werden. Damit dieser Mechanismus wirkt, muss eine wichtige Voraussetzung erfüllt sein. Das EU ETS muss Knappheitssignale erzeugen. Das bedeutet, dass die geltende Emissionsobergrenze unter der Emissionsmenge liegen muss, die im kontrafaktischen Szenario, d. h. ohne Emissionshandelssystem, erreicht worden wäre. Nur dann entfalten die Stilllegungen ihre Wirkungen und der Zertifikatspreis steigt (Doda et al., 2021). Aus dem Mechanismus folgt, dass die deutsche Bundesregierung theoretisch Zertifikate aufkaufen und dauerhaft stilllegen und so die verfügbare Zertifikatsmenge begrenzen könnte. Dies würde dem

Effekt einer Absenkung der Obergrenze des EU ETS gleichkommen. Das EU ETS könnte somit in Einklang mit den deutschen Klimazielen gebracht werden.²¹

An dieser Stelle sind noch zwei Anmerkungen hinsichtlich der Umsetzung staatlicher Stilllegungen in der Praxis relevant. Erstens ist es wichtig hervorzuheben, dass die Stilllegung von Zertifikaten der endgültigen Löschung vorzuziehen ist. Grund dafür ist die Interaktion von Zertifikatslösungen mit Marktstabilisierungsmechanismen (MSM) (Doda et al., 2021). Ein Beispiel für einen MSM ist die im EU ETS 2015 eingeführte und 2017 grundlegend adjustierte Market Stability Reserve (MSR) (Perino, 2018). Überschreitet die Menge an Zertifikaten im Umlauf einen bestimmten Schwellenwert, werden Zertifikate in die MSR überführt (Willner & Perino, 2022). Erst ab 2023 wird ein Teil der Zertifikate im MSR gelöscht (Carlén et al., 2019). Aufgrund der MSR kann es dazu kommen, dass freiwillige, unilaterale Lösungen Zertifikate entwerten, die ohnehin in die MSR überführt und später gelöscht worden wären (Doda et al., 2021). Damit führen sie nicht zu einer zusätzlichen Emissionsreduktion. Mit anderen Worten: Zusätzliche Lösungen von Zertifikaten können dazu führen, dass weniger Zertifikate in den MSR überführt und damit potenziell weniger Zertifikate gelöscht werden. Auch kann die Löschung von Zertifikaten zur Folge haben, dass die Menge an Zertifikaten, die im Umlauf ist, eher den unteren Schwellenwert der MSR von 400 Millionen Zertifikaten unterschreitet. Dann werden Zertifikate aus der MSR in den EU ETS zurückgeführt (Perino, 2018). Stillgelegte Zertifikate rufen diese Interaktion nicht hervor (Doda et al., 2021). Die stillgelegten Zertifikate können dann theoretisch zu einem späteren Zeitpunkt endgültig gelöscht werden, wenn die Knappheit im Markt so hoch ist, dass die MSR keine Zertifikate mehr löscht (Doda et al., 2021).²² Dann ist die Obergrenze im EU ETS nicht mehr endogen, sondern wieder exogen (Gerlagh & Heijmans, 2019).

Zweitens sind die allgemein geltenden institutionellen Gegebenheiten des EU ETS bei etwaigen Stilllegungen zu berücksichtigen. Eine im Status quo geltende Möglichkeit zur Stilllegung von Zertifikaten besteht für Mitgliedsstaaten begleitend zu ordnungsrechtlichen nationalen Maßnahmen. Die EU-Gesetzgebung sieht Stilllegungen beispielweise als begleitende Option für Kraftwerksstilllegungen vor (Edenhofer et al.,

²¹ Um besser gesellschaftliche Präferenzen bezüglich der Emissionsmenge zu berücksichtigen, könnte die Möglichkeit zur Stilllegung auch auf Verbände oder Privatpersonen erweitert werden (Ringel, 2021, S. 82). Wie in Roth (2023) ausführlich erläutert, wird dies durch verschiedene Kompensationsanbieter bereits ermöglicht.

²² Aus politökonomischer Perspektive könnte die Löschung bei hoher Knappheit im Markt schwierig durchsetzbar sein.

2018). In dem Fall können die Mitgliedsstaaten freiwillig maximal in Höhe der durchschnittlichen Emissionsmenge der stillgelegten Kapazität Zertifikate stilllegen (European Parliament and the Council, 2018). Legt der Mitgliedsstaat Zertifikate zusätzlich zur Kraftwerkstilllegung still, verhindert er den Wasserbetteffekt (Schomerus & Franßen, 2018).²³ Hervorzuheben ist, dass der Wasserbetteffekt zusätzlicher Maßnahmen zwar durch begleitende Stilllegungen behoben werden kann. Aber da eine reine Stilllegung von Zertifikaten bereits zusätzliche Emissionsminderungen bewirken kann (Braathen, 2011), sind zusätzliche Maßnahmen nicht erforderlich. Darüber hinaus ist diese Form der Stilllegung freiwillig. Es kann aber angenommen werden, dass die deutsche Bundesregierung, wenn sie ihre eigenen Ziele erreichen will, von der Option Gebrauch machen würde. Ansonsten wäre davon auszugehen, dass der EU-Gesetzgeber bei der zukünftigen Festlegung des europäischen Caps diesen stärker herabsetzt, um dem Zertifikateüberschuss entgegenzuwirken (Schomerus & Franßen, 2018). Ob und in welchem Umfang und unter welchen Bedingungen ohne begleitende ordnungsrechtliche Maßnahmen Zertifikate von Mitgliedsstaaten stillgelegt werden können, konnte nicht abschließend ermittelt werden. Die folgenden EU Richtlinien zum EU ETS (Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, 2003; European Parliament and the Council, 2009, 2018) geben keinen Hinweis auf das Bestehen einer derartigen Option zu diesem Zeitpunkt. Zusammengefasst sind Zertifikatsstilllegungen durch die deutsche Bundesregierung theoretisch ein mögliches Instrument, um von deutscher Seite zusätzliche Emissionsreduktionen zu ermöglichen und die ambitionierteren Ziele zu erreichen. Bei der Stilllegung von Zertifikaten sind in der Praxis allerdings eine Vielzahl institutioneller Gegebenheiten zu beachten, deren vollständige Darstellung und Berücksichtigung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Dennoch zeigt die bestehende Option der begleitenden Zertifikatsstilllegung zu nationalen Maßnahmen, dass Stilllegungen möglich sind.

Die Analyseergebnisse aus Abschnitt 4.1 und 4.2 können den zweiten Teil der Forschungsfrage zusammenfassend wie folgt beantworten: Der Zertifikatehandel ist ein

²³ Da die Stromnachfrage sehr wahrscheinlich nicht um die stillgelegte Kapazität sinkt, wird die Nachfrage durch andere Erzeugungstechnologien gedeckt. Der CO₂-Einspareffekt ist abhängig vom Umfang der Nachfragedeckung durch erneuerbare Erzeugungsformen (Schomerus & Franßen, 2018). In Deutschland wird die Erzeugung des stillgelegten Kraftwerks größtenteils aus Steinkohle und Gas gedeckt, weshalb die Netto-CO₂-Einsparung ungefähr einem Verhältnis von 2:1 entspricht (Agora Energiewende & Öko-Institut, 2018).

effizientes Instrument zur Behebung des durch positive Externalitäten der CO₂-Vermeidung entstehenden Marktversagens. Zwei Abweichungen der perfekten Internalisierung konnten hergeleitet werden. Erstens weicht die Obergrenze im EU ETS von der optimalen Emissionsmenge ab, wodurch die Internalisierung proportional zu den Externalitäten ist. Zweitens nehmen Haushalte nicht am EU ETS teil, wodurch anzunehmen ist, dass nur die Externalitäten eigenverbrauchten Stroms durch das ETS internalisiert werden und PV-Anlagen somit tendenziell unterdimensioniert sind. Die Analyse ergab, dass das erste Defizit nicht durch zusätzliche Subventionen behoben werden kann. Das zweite Defizit, die fehlende Teilnahme privater PV-Anlagen am EU ETS, stellt eher ein Defizit in der Implementation des EU ETS als ein grundlegendes Defizit des Zertifikatehandels dar. Im Einklang mit der Tinbergen-Regel (Tinbergen, 1952) wäre eine umfassende Abdeckung des EU ETS effizienter als die Erhöhung der Einspeisevergütung mittels Subventionen. Zudem wurde hergeleitet, dass Zertifikatsstilllegungen zusätzliche Emissionsreduktionen erwirken können. Zwar haben zusätzliche Subventionen einen lokalen Minderungseffekt, jedoch wird dieser durch die verbindliche Obergrenze an anderer Stelle kompensiert. Die Instrumentendiskussion kam zu dem Schluss, dass zusätzliche Subventionen zur zusätzlichen Emissionsminderung nicht zielführend sind.

4.3 Limitationen der Instrumentendiskussion

Bei der Instrumentendiskussion ergeben sich verschiedene Limitationen, die an dieser Stelle kritisch reflektiert werden sollen.

Erstens ist der Bezugsrahmen, in dem die Instrumentendiskussion stattfindet, in verschiedener Hinsicht beschränkt. Wie bereits am Ende des dritten Kapitels diskutiert wurde, beschränkt sich diese Arbeit auf positive Externalitäten durch die CO₂-Vermeidung und lässt dabei weitere Externalitäten und andere Marktversagensargumente unberücksichtigt. Aufgrund der Fokussierung auf eine Externalität wurde in der Instrumentendiskussion nur analysiert, wie die CO₂-Externalität internalisiert werden kann und ob dafür zusätzliche Subventionen notwendig sind. Die Schlussfolgerung, dass zur Internalisierung dieser einen Externalität keine zusätzlichen Subventionen nötig sind, ist damit nur für diesen engen Rahmen gültig. In der Literatur hingegen werden weitere Marktversagensargumente oder weitere exogene Zielsetzungen als Grund für zusätzliche

Subventionen angeführt.²⁴ Die abgeleitete Aussage, zusätzliche Subventionen seien nicht notwendig, ist damit nicht universell gültig, sondern nur, wenn ausschließlich Marktversagen durch positive CO₂-Externalitäten vorliegt. Außerdem erfolgte die Instrumentendiskussion unter allokativen Gesichtspunkten. Bei der Erwägung eines Staatseingriffs ist aber nicht nur die allokativen Perspektive relevant. Laut Musgrave (1959) ist nicht nur die Sicherung einer effizienten Ressourcenverwendung (Allokation) und folglich die Korrektur von Marktversagen Staatsaufgabe, sondern auch die Korrektur der marktlichen Einkommensverteilung (Distribution) (Brümmerhoff & Büttner, 2015, S. 4). Bei der Erfüllung beider Staatsaufgaben kann es zu Zielkonflikten kommen (Werding, 2019, S. 496). Verteilungsfragen werden in der Instrumentendiskussion jedoch nicht mit einbezogen, obwohl sie bei der Erwägung eines Staatseingriffs relevant sein können. Es ergibt sich eine weitere Limitation für die getroffenen Schlussfolgerungen: Abhängig von den distributiven Zielen könnten zusätzliche Subventionen beispielsweise zur Umverteilung der ökonomischen Renten gewünscht sein.

Neben des engen Analyserahmens, in dem die Instrumentendiskussion erfolgte, ergeben sich zweitens Limitationen durch die gewählte Methode. Alle Schlussfolgerungen der Instrumentendiskussion basieren auf der Analyse ökonomischer Theorie.²⁵ Zwar wurde die rein theoretische Herangehensweise teils um institutionelle Details erweitert. So wurde hervorgehoben, dass aufgrund von Interaktionen mit der implementierten MSR Zertifikatsstilllegungen gegenüber Löschungen vorzuziehen sind. Außerdem wurden zwei zentrale Merkmale des Status quo berücksichtigt: dass bereits ein Zertifikatehandel implementiert ist und dass zusätzliche Emissionsreduktionen aufgrund des deutschen institutionellen Rahmens notwendig sind. Dennoch wurden die zentralen Aussagen nicht empirisch überprüft: Erstens, dass zusätzliche Subventionen zur Internalisierung nicht notwendig sind. Zweitens, dass potenziell nur die Externalitäten eigenverbrauchten PV-Stroms durch das ETS internalisiert werden. Drittens, dass zusätzliche Subventionen für

²⁴ Beispielsweise führen Held et al. (2019) oder Matthes (2010) an, dass sich zusätzliche Instrumente bei Vorliegen weiterer Marktversagen wohlfahrtssteigernd auswirken können. Acemoglu et al. (2012) zeigen, dass ein CO₂-Preis allein bei Vorliegen von Innovationsexternalitäten (vgl. Abschnitt 3.3.2) zu steigenden Emissionsreduktionskosten führt. Optimal ist dann eine Kombination von CO₂-Preis und Subventionen für FuE (ebd.). Zu beachten ist, dass zusätzliche Subventionen weiterhin den Wasserbetteffekt auslösen (vgl. Abschnitt 4.2.1).

²⁵ Die nachfolgenden Limitationen ergeben sich auch für das dritte Kapitel. Auch dort wurden die Externalitäten allein mittels ökonomischer Theorie hergeleitet und nur stellenweise durch empirische Befunde gestützt.

weitere Emissionsminderungen nicht zielführend sind. Alle drei Aussagen basieren auf ökonomischer Theorie.

Aufgrund des *Nirvana Fehlschlusses* ergibt sich daraus eine zentrale Limitation. Harold Demsetz (1969, S.2) bezeichnet den Vergleich eines Ideals mit einem „existierenden imperfekten institutionellen Arrangement“ als *Nirvana-Approach*. Aus diesem Vergleich resultiert nach Demsetz das Risiko verschiedener *Nirvana-Fehlschlüsse*: Entweder werden Alternativen nicht umfassend analysiert und potenzielle Nachteile nicht berücksichtigt („the grass is always greener“ (Demsetz, 1969, S. 2)), die Kosten zum Erreichen der Alternative vernachlässigt („free lunch“ (Demsetz, 1969, S. 3)) oder die individuellen Präferenzen werden nicht als gegeben angenommen („the people could be different“ (Demsetz, 1969, S. 7)) (Roth, 2020, Minute 4:58-8:19). Für die Instrumentendiskussion folgt daraus, dass mithilfe der ökonomischen Analyse wesentliche Mechanismen sowie ein wünschenswertes Ideal identifiziert werden konnten. Um den bestmöglichen Weg zu diesem Ideal zu finden, wäre laut Demsetz ein komparativ-institutionalistischer Vergleich tatsächlich erreichbarer Alternativen nötig (Demsetz, 1969, 1f., 19f.). Es konnte folglich zwar hergeleitet werden, dass das ETS insgesamt sowie nationale Stilllegungen theoretisch effizient sind. Dieses Erkenntnis ist aber einerseits auf den zuvor eingegrenzten Gültigkeitsrahmen beschränkt und andererseits kann daraus ohne das Risiko eines *Nirvana-Fehlschlusses* keine konkrete Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Das Risiko eines *Nirvana-Fehlschlusses* betont folglich einerseits die wesentliche Limitation der Arbeit auf die Identifikation eines Idealzustands und hebt gleichzeitig die zwingende Erforderlichkeit der Reflexion der Limitationen hervor.

5 Fazit

Zu Beginn der Arbeit wurde die besondere Rolle der PV-Technologie für den Klimaschutz sowie die Debatte um geeignete Förderinstrumente skizziert. Insbesondere die Frage der Notwendigkeit zusätzlicher Subventionen zum bereits implementierten EU ETS und potenzieller Interaktionen wurde hervorgehoben. In dieser Arbeit wurde eine ökonomische Perspektive auf die Debatte eingenommen und dazu die zweigeteilte Forschungsfrage beantwortet: Besteht Marktversagen durch Externalitäten im deutschen Solarsektor? Wenn ja, wie kann das Marktversagen effizient behoben werden?

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage wurde hergeleitet, dass die Vermeidung von CO₂-Emissionen den gesellschaftlichen Nutzen steigert. Um zu untersuchen, unter welchen Bedingungen PV-Module Emissionen vermeiden, wurden die Konsequenzen einer marginalen Erhöhung des Solarstromangebots auf die Merit-Order komparativ-statisch analysiert. Dabei war für die Höhe der Externalitäten zentral, welche Erzeugungstechnologie durch Solarstrom substituiert wird und in welchem Verhältnis die Substitution erfolgt. Da die Erzeugungstechnologie Kohle emissionsintensiver ist als Gas, sind die Externalitäten einer Einheit Solarstrom höher, wenn Kohle substituiert wird. Folgende Einflussfaktoren auf den Umfang der Externalitäten konnten identifiziert werden: der vorherrschende Strommix (Borenstein, 2012) und die Elastizität der Stromnachfrage.

Im zweiten Schritt wurde analysiert, wie das attestierte Marktversagen durch Externalitäten behoben werden kann. Mittels wohlfahrtsökonomischer Theorie konnte hergeleitet werden, dass der Zertifikatehandel ein effizientes Instrument ist (Tietenberg, 2006, 31f.). Für das EU ETS wurden zwei verbleibende Defizite identifiziert: Das Informationsproblem durch die unbekannt optimale Emissionsmenge und eine potenziell unvollständige Internalisierung der Externalitäten ins Stromnetz eingespeisten Solarstroms. Es wurde hergeleitet, dass die erste Insuffizienz nicht durch Subventionen lösbar ist, da auch für die perfekte Internalisierung mittels Subventionen die optimale Menge bekannt sein muss (Raufer et al., 2022). Das zweite Defizit könnte im Einklang mit der Tinbergen-Regel potenziell effizient durch eine Ausweitung des EU ETS behoben werden. Schließlich wurde untersucht, ob zusätzliche Subventionen zusätzliche Emissionsreduktionen erwirken können, um die strengeren deutschen Reduktionsziele einzuhalten. Es wurde hergeleitet, dass Subventionen in Sektoren, in denen die Emissionen durch einen Zertifikatehandel bereits verbindlich gedeckelt sind, den Wasserbetteffekt hervorrufen. Emissionsreduktionen können jedoch ohne den Umweg über zusätzliche Subventionen allein durch die Stilllegung von Zertifikaten erreicht werden.

Es gilt hervorzuheben, dass die Ergebnisse der Instrumentendiskussion nur innerhalb eines begrenzten Bezugsrahmens gültig sind; dass zusätzliche Subventionen zur Internalisierung des Marktversagens ineffizient sind, gilt nur in Bezug auf die Internalisierung der positiven Externalität durch Emissionsvermeidung. Des Weiteren wurde verdeutlicht, dass die Analyseergebnisse aufgrund des Risikos von *Nirvana-*

Fehlschlüssen nicht direkt in politische Handlungsempfehlungen übersetzt werden können. Sie dienen vielmehr zur Identifikation einer theoretischen Benchmark (Roth, 2020, Minute 2:25-4:56) und zentraler Mechanismen. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich insbesondere im Hinblick auf die Effizienz und Umsetzbarkeit nationaler Zertifikatsstilllegungen ohne begleitende Maßnahmen. Nach dem Kenntnisstand der Autorin wurde dieses Thema in der Literatur bisher kaum diskutiert.

Zusammenfassend konnte diese Arbeit aufzeigen, dass im Solarsektor positive Externalitäten durch die Vermeidung von CO₂-Emissionen vorliegen und dass diese proportional durch das EU ETS internalisiert werden können. Besonders hervorzuheben sind zwei Erkenntnisse: Es besteht ein potenzielles Defizit durch die unvollständige Abdeckung privater PV-Nachfrager*innen im EU ETS und nationale Stilllegungen kommen als Mittel zusätzlicher Emissionsreduktionen infrage.

6 Literaturverzeichnis

- Abrell, J., Kosch, M. & Rausch, S. (2019). Carbon abatement with renewables: Evaluating wind and solar subsidies in Germany and Spain. *Journal of Public Economics*, 169, 172–202. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2018.11.007>
- Acemoglu, D., Aghion, P., Bursztyn, L. & Hémous, D. (2012). The environment and directed technical change. *American Economic Review*, 102(1), 131–166. <https://doi.org/10.1257/aer.102.1.131>
- Agora Energiewende & Öko-Institut. (2018). *Vom Wasserbett zur Badewanne: Die Auswirkungen der EU-Emissionshandelsreform 2018 auf CO₂-Preis, Kohleausstieg und den Ausbau der Erneuerbaren*. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/Reform_des_Europaeischen_Emissionshandels_2018/Agora_Energiewende_Vom_Wasserbett_zur_Badewanne_WEB.pdf
- Bley, A. (2007). *Haushaltsenergieproduktion: Eine wirtschaftstheoretische Analyse der Nutzung erneuerbarer Energieträger und des Wasserstoffs durch private Haushalte*. WiKu.
- BMWK. (2022). *Eröffnungsbilanz Klimaschutz*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile
- BMZ. (o. D.). *Klimaabkommen von Paris*. Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/klimaabkommen-von-paris-14602>
- Böhringer, C. & Rosendahl, K. E. (2010). Green promotes the dirtiest: On the interaction between black and green quotas in energy markets. *Journal of*

- Regulatory Economics*, 37(3), 316–325. <https://doi.org/10.1007/s11149-010-9116-1>
- Borenstein, S. (2012). The private and public economics of renewable electricity generation. *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), 67–92.
<https://doi.org/10.1257/jep.26.1.67>
- Braathen, N. A. (2011). Interactions between emission trading systems and other overlapping policy instruments. *OECD Green Growth Papers*, 2011/02. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/5k97gk44c6vf-en>
- Brümmerhoff, D. & Büttner, T. (2015). *Finanzwissenschaft* (11. Aufl.). De Gruyter.
- Burke, P. J. & Abayasekara, A. (2018). The price elasticity of electricity demand in the United States: A three-dimensional analysis. *The Energy Journal*, 39(2).
<https://doi.org/10.5547/01956574.39.2.pbur>
- Carlén, B., Dahlqvist, A., Mandell, S. & Marklund, P. (2019). EU ETS emissions under the cancellation mechanism - Effects of national measures. *Energy Policy*, 129, 816–825. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.060>
- Cludius, J., Duscha, V., Friedrichsen, N. & Schumacher, K. (2019). Cost-efficiency of the EU Emissions Trading System. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 8(1), 145–162. <https://doi.org/10.5547/2160-5890.8.1.jclu>
- Cludius, J., Hermann, H., Matthes, F. C. & Graichen, V. (2014). The merit order effect of wind and photovoltaic electricity generation in Germany 2008–2016: Estimation and distributional implications. *Energy Economics*, 44, 302–313.
<https://doi.org/10.1016/j.eneco.2014.04.020>
- Colmer, J., Martin, R., Muûls, M. & Wagner, U. J. (2020). Does pricing carbon mitigate climate change? Firm-level evidence from the European Union Emissions

- Trading Scheme. *SSRN Journal*. CEPR Discussion Paper No. 232.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3725482>
- Couture, T., Barbose, G., Jacobs, D., Parkinson, G., Chessin, E., Belden, A., Wilson, H., Barrett, H. & Rickerson, W. (2014). *Residential prosumers: Drivers and policy options (re-prosumers): International Energy Agency - Renewable energy technology deployment*. Meister Consultants Group; Lawrence Berkeley National Lab. <https://doi.org/10.2172/1163237>
- Cramton, P., Ockenfels, A. & Stoft, S. (2013). Capacity Market Fundamentals. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2(2).
<https://doi.org/10.5547/2160-5890.2.2.2>
- Dales, J. H. (1968). *Pollution, property & prices: An essay in policy-making and economics*. University of Toronto Press.
- Del Río, P. (2008). Policy implications of potential conflicts between short-term and long-term efficiency in CO2 emissions abatement. *Ecological Economics*, 65(2), 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.06.013>
- Del Río, P., Klessmann, C., Winkel, T. & Gephart, M. (2013). *Interactions between EU GHG and renewable energy policies – how can they be coordinated*. Intelligent Energy Programme of the European Union. <http://www.res-policy-beyond2020.eu/>
- Demsetz, H. (1969). Information and efficiency: Another viewpoint. *Journal of Law and Economics*, 12(1), 1–22.
<http://www.jstor.org/stable/724977?origin=JSTOR-pdf>
- Die Bundesregierung. (7. November, 2022). *Klimaschutzgesetz: Generationenvertrag für das Klima*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>

- Die Bundesregierung. (1. März, 2023). *EEG 2023: Ausbau erneuerbarer Energien massiv beschleunigen*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/nouvelle-eeg-gesetz-2023-2023972>
- Doda, B., La Hoz Theuer, S., Cames, M., Healy, S. & Schneider, L. (2021). *Voluntary offsetting: credits and allowances* (Climate Change). Umweltbundesamt. https://www.carbon-mechanisms.de/fileadmin/media/dokumente/Publicationen/Bericht/2021_01_11_cc_04-2020_voluntary_offsetting_credits_and_allowances_1.pdf
- Edenhofer, O., Flachsland, C., Arlinghaus, J., Haywood, L., Kalkuhl, M., Knopf, B., Koch, N., Kornek, U., Pahle, M. & Pietzcker, R. (2018). *Eckpunkte einer CO₂-Preisreform für Deutschland*. Potsdam Institut für Klimafolgenforschung; Mercator Institute on Global Commons and Climate Change.
- European Commission (o. D.). *EU Emissions Trading System (EU ETS)*. European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en
- Europäische Kommission (2011). Beschluss der Kommission vom 27. April 2011 zur Festlegung EU-weiter Übergangsvorschriften zur Harmonisierung der kostenlosen Zuteilung von Emissionszertifikaten gemäß Artikel 10a der Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 130/1.
- Europäische Kommission. (2020). *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Mehr Ehrgeiz für das Klimaziel Europas bis 2030 - In eine klimaneutrale Zukunft zum Wohl der Menschen investieren*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>

Europäische Kommission. (2021). *Umsetzung des Europäischen Grünen Deals: Das entscheidende Jahrzehnt*. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal_en

Europäische Kommission. (2022). *Bericht der Kommission an das Europäische Parlament und den Rat über das Funktionieren des CO₂-Marktes im Jahr 2021 der EU gemäß Artikel 10 Absatz 5 und Artikel 21 Absatz 2 der Richtlinie 2003/87/EG (geändert durch Richtlinie 2009/29/EG und Richtlinie (EU) 2018/410)*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:516:FIN>

Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union (2003). Richtlinie 2003/87/EG des europäischen Parlaments und des Rates über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 275/35.

European Parliament and the Council (2009). Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community. *Official Journal of the European Union*, L 140/63.

European Parliament and the Council (2018). Richtlinie 2018/410 des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Unterstützung kosteneffizienter Emissionsreduktionen und zur Förderung von Investitionen mit geringem CO₂-Ausstoß und des Beschlusses (EU) 2015/1814. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 76/3.

Feess, E. & Seeliger, A. (2021). *Umweltökonomie und Umweltpolitik* (5. Aufl.). Franz Vahlen.

Fischer, C. & Preonas, L. (2010). Combining policies for renewable energy: Is the whole less than the sum of its parts? *Resources for the Future*. Discussion Paper No. 10-19. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1569634>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE). (2023, 3. Januar).

Nettostromerzeugung in Deutschland 2022: Wind und Photovoltaik haben deutlich zugelegt [Pressemitteilung]. <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2023/nettostromerzeugung-in-deutschland-2022-wind-und-photovoltaik-haben-deutlich-zugelegt.html>

Gerlagh, R. & Heijmans, R. J. R. K. (2019). Climate-conscious consumers and the buy, bank, burn program. *Nature Climate Change*, 9(6), 431–433. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0482-0>

Goulder, L. & Stavins, R. (2010). *Interactions between state and federal climate change policies*. NBER Working Paper No. 16123. <https://doi.org/10.3386/w16123>

Gugler, K., Haxhimusa, A. & Liebensteiner, M. (2021). Effectiveness of climate policies: Carbon pricing vs. subsidizing renewables. *Journal of Environmental Economics and Management*, 106, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2020.102405>

Hamenstädt, U. (2008). *Bestimmung der Preiselastizität für Strom*. [Masterarbeit, Universität Münster]. https://www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/25724/ssoar-2008-hamenstadt-bestimmung_der_preiselastizitat_fur_strom.pdf?sequence=1&isAllowed=y&Inkname=ssoar-2008-hamenstadt-bestimmung_der_preiselastizitat_fur_strom.pdf

Harrison, D. & Radov, D. B. (2002). *Evaluation of alternative initial allocation mechanisms in a European Union greenhouse gas emissions allowance trading*

- scheme*. National Economic Research Associates.
[https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc29350/m2/1/high_res_d/allocati
on.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc29350/m2/1/high_res_d/allocati

on.pdf)
- Hasson, R., Löfgren, Å. & Visser, M. (2010). Climate change in a public goods game: Investment decision in mitigation versus adaptation. *Ecological Economics*, 70(2), 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.09.004>
- Haucap, J., Kühling, J., Amin, M., Brunekreeft, G., Fouquet, D., Grimm, V. & Stephanos, C. (2022). *Strommarktdesign 2030: Die Förderung der erneuerbaren Energien wirksam und effizient gestalten*. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Union der deutschen Akademien der Wissenschaften. [https://www.akademienunion.de/fileadmin/au-
uploads/publikationen/publikationen_pdfs/2022/impuls_strommarkt.pdf](https://www.akademienunion.de/fileadmin/au-

uploads/publikationen/publikationen_pdfs/2022/impuls_strommarkt.pdf)
- Held, A., Ragwitz, M., Del Ro, P., Resch, G., Klessmann, C., Hassel, A., Elkerbout, M. & Rawlins, J. (2019). Do almost mature renewable energy technologies still need dedicated support towards 2030? *Economics of Energy & Environmental Policy*, 8(2). <https://doi.org/10.5547/2160-5890.8.2.ahel>
- Hirth, L., Khanna, T. & Ruhnau, O. (2022). *The (very) short-term price elasticity of German electricity demand*. ZBW - Leibniz Information Centre for Economics. <http://hdl.handle.net/10419/249570>
- Hohmeyer, O. (1989). *Soziale Kosten des Energieverbrauchs: Externe Effekte des Elektrizitätsverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland*. Springer.
- Hohmeyer, O. (2021). The social costs of electricity generation: Wind and photovoltaic vs. fossil and nuclear energy. In J. Byrne & D. Rich (Hrsg.), *Energy and Environment* (S. 141–186). Routledge.

- IPCC. (2021). Summary for policymakers. In *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2022a). *Climate change 2021: The physical science basis: Synthesis report*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2022b). Summary for policymakers. In *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- IPCC. (2022c). Summary for policymakers. In *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157926.001>
- IRENA. (2019). *Global energy transformation: A roadmap to 2050*. International Renewable Energy Agency.
- Jacksohn, A., Grösche, P., Rehdanz, K. & Schröder, C. (2019). Drivers of renewable technology adoption in the household sector. *Energy Economics*, 81, 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.04.001>
- Jensen, S. G. & Skytte, K. (2003). Simultaneous attainment of energy goals by means of green certificates and emission permits. *Energy Policy*, 31(1), 63–71. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00118-0)
- Knopf, B., Koch, N., Grosjean, G., Fuss, S., Flachsland, C., Pahle, M., Jakob, M. & Edenhofer, O. (2014). The European Emissions Trading System (EU ETS): Ex-post analysis, the Market Stability Reserve and options for a comprehensive

reform, *FEEM Working Paper No. 79.2014*.

<https://doi.org/10.2139/ssrn.2499457>

- Krewitt, W. (2007). Die externen Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur fossilen Stromerzeugung. *UWSF - Z Umweltchem Ökotox*, 19(3), 144–151. <https://doi.org/10.1065/uwsf2007.06.193>
- Ladwig, T. (2018). *Demand side management in Deutschland zur Systemintegration erneuerbarer Energien. Schriften des Lehrstuhls für Energiewirtschaft: Band 14*. Technische Universität Dresden.
- López Prol, J. & Steininger, K. W. (2018). The social profitability of photovoltaics in Germany. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 26(8), 631–641. <https://doi.org/10.1002/pip.2988>
- Lübben, W. & Jedamzik, M. (2019). *Fördergeld für Klimaschutz, Energieeffizienz und erneuerbare Energien: Private Haushalte, Unternehmen, öffentliche Einrichtungen*. Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
- Matthes, F. C. (2010). *Der Instrumenten-Mix einer ambitionierten Klimapolitik im Spannungsfeld von Emissionshandel und anderen Instrumenten: Bericht für das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Öko-Institut e. V.
- Musgrave, R. A. (1959). *The theory of public finance: A study in public theory*. McGraw-Hill.
- Perino, G. (2018). New EU ETS phase 4 rules temporarily puncture waterbed. *Nature Climate Change*, 8(4), 262–264. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0120-2>
- Pigou, A. C. (1912). *Wealth and Welfare*. Macmillan and Company.

- Platzer, M. D. (2012). *US solar photovoltaic manufacturing: Industry trends, global competition, federal support*.
https://www.everycrsreport.com/files/20120530_r42509_001e9604208c2a98eb37d6c9dfd5aa9733351de8.pdf
- Quaschnig, V. (2021a). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe - Techniken und Planung - Ökonomie und Ökologie - Energiewende* (6., aktualisierte Aufl.). Hanser.
- Quaschnig, V. (2021b). *Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz*. Hanser.
- Raufer, R., Coussy, P. & Freeman, C. (2022). Emissions trading. In M. Lackner, B. Sajjadi & W.-Y. Chen (Hrsg.), *Handbook of climate change mitigation and adaptation* (S. 3237–3294). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-72579-2_8
- Rave, T. (2013). Politikkoordination im Rahmen der Energiewende - das Beispiel Emissionshandelssystem und Förderung erneuerbarer Energien. *ifo Schnelldienst*, 66(12), 23–36.
- Rave, T., Triebswetter, U. & Wackerbauer, J. (2013). *Koordination von Innovations-, Energie- und Umweltpolitik: Studie im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)*. *ifo Forschungsberichte: Bd. 61*. Ifo-Institut.
- Ringel, M. (2021). *Umweltökonomie*. Springer Fachmedien Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-33075-0>
- Roth, S. J. (2009). Ausreichende Teilhabemöglichkeiten, systematische Bedarfsdeckung und konsequente Einforderung zumutbarer Selbsthilfeanstrengungen. *Zeitschrift für Wirtschaftspolitik*, 58(1), 67–81. <https://doi.org/10.1515/zfw-2009-0106>

- Roth, S. J. (2020). *Der Nirvana Approach* [YouTube].
<https://www.youtube.com/watch?v=KagdvX0SlnU>
- Roth, S. J. (2021). *VWL für Einsteiger* (6. überarb. Aufl.). UTB.
- Roth, S. J. (2023). Moderner Ablasshandel oder wirksamer Beitrag zum Klimaschutz? - Kompensationszahlungen zur Neutralisierung von Treibhausgasemissionen. *Kölner Impulse zur Wirtschaftspolitik*, 2023(2), 3–14.
- Schomerus, T. & Franßen, G. (2018). *Klimaschutz und die rechtliche Zulässigkeit der Stilllegung von Braun- und Steinkohlekraftwerken*. Essen. im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.
http://fox.leuphana.de/portal/files/13307575/wbs_gutachten_bf.pdf
- Scorza, S. A., Pfeiffer, J., Schmitt, A. & Weissbart, C. (2018). Kurz zum Klima: »Sektorkopplung« – Ansätze und Implikationen der Dekarbonisierung des Energiesystems. *ifo Schnelldienst*, 71(10), 49–53.
- Sensfuß, F., Ragwitz, M. & Genoese, M. (2008). The merit-order effect: A detailed analysis of the price effect of renewable electricity generation on spot market prices in Germany. *Energy Policy*, 36(8), 3086–3094.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.035>
- Sievering, O. (2022). Elastizitäten. In H. Drewello, F. Kupferschmidt & O. Sievering (Hrsg.), *Markt und Staat: Eine anwendungsorientierte Einführung in die allgemeine Volkswirtschaftslehre* (2. Aufl., S. 69-81). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Gabler.
- Sijm, J. (2005). The interaction between the EU emissions trading scheme and national energy policies. *Climate Policy*, 5(1), 79–96.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2005.9685542>

- Sijm, J., Hers, S. J., Lise, W. & Wetzelaer, B. J. H. W. (2008). *The impact of the EU ETS on electricity prices: Final report to DG Environment of the European Commission*. Energy Research Centre of the Netherlands.
- Statista. (2022a). *Anteil der Photovoltaik an der Bruttostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2022*.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250915/umfrage/anteil-der-photovoltaik-an-der-stromerzeugung-in-deutschland/>
- Statista. (2022b). *Verteilung der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien in Deutschland nach Energieträger im Jahr 2022*.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173871/umfrage/stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energien-in-deutschland/>
- Tietenberg, T. H. (2006). *Emissions trading: Principles and practice* (2. Aufl.). Resources for the Future.
- Tinbergen, J. (1952). *On the theory of economic policy. Contributions to economic analysis: Bd. 1*. North-Holland Publishing Company.
- Tschochohei, H. & Zöckler, J. (2008). Business and emissions trading from a public choice perspective - waiting for a new paradigm to emerge. In R. Antes, B. Hansjürgens & P. Letmathe (Hrsg.), *Emissions trading: Institutional design, decision making and corporate strategies*. Springer.
- Tveten, Å. G., Bolkesjø, T. F., Martinsen, T. & Hvarnes, H. (2013). Solar feed-in tariffs and the merit order effect: A study of the German electricity market. *Energy Policy*, 61, 761–770. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.060>
- UBA. (2021). *Übereinkommen von Paris*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu->

klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-ubereinkommens-von-paris-
uvp

UBA. (2022). *Die Treibhausgase*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>

UBA. (2023). *Photovoltaik*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik#photovoltaik>

UNEP. (2020). *Emissions gap report 2020 - Executive summary*. United Nations

Environment Programme. <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>

Werding, M. (2019). Ökonomische Zielkonflikte der Sozialpolitik. In H. Obinger & M.

G. Schmidt (Hrsg.), *Handbuch Sozialpolitik* (S. 493–513). Springer Fachmedien

Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-22803-3_25

Wildgrube, T. (2022). *Fit for 55? An assessment of the effectiveness of the EU COM's*

reform proposal for the EU ETS. EWI Working Paper No. 22/04.

<http://hdl.handle.net/10419/268217>

Willner, M. & Perino, G. (2022). Beyond control: Policy incoherence of the EU

Emissions Trading System. *Politics and Governance*, 10(1).

<https://doi.org/10.17645/pag.v10i1.4797>

World Nuclear Association. (2011). *Comparison of lifecycle greenhouse gas emissions*

of various electricity generation sources. [https://www.world-](https://www.world-nuclear.org/uploadedfiles/org/wna/publications/working_group_reports/compari-son_of_lifecycle.pdf)

[nuclear.org/uploadedfiles/org/wna/publications/working_group_reports/compari-son_of_lifecycle.pdf](https://www.world-nuclear.org/uploadedfiles/org/wna/publications/working_group_reports/compari-son_of_lifecycle.pdf)