



**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences**

Dekarbonisierungsstrategien für Industrieunternehmen im Emissionshandel am
Beispiel einer Papierfabrik

Bachelorarbeit

Im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Yuliya Kim



Hamburg
am 30. Juni 2020

Gutachter: Dr.-Ing.

Dagmar Rokita (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing.(FH)

Andreas Kästner (Tilia GmbH)

EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit eigenständig angefertigt und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Alle sinngemäß und wörtlich übernommenen Textstellen aus der Literatur bzw. dem Internet wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ort, Datum

Unterschrift

INHALTSVERZEICHNIS

ABILDUNGSVERZEICHNIS	iv
TABELLENVERZEICHNIS	iv
ABKÜRUNGEN, FORMELZEICHEN UND EINHEITEN	v
EINLEITUNG	1
ABSTRACT	2
1. UMWELTPOLITIK IN DER PRAXIS	3
1.1. Pariser Klimaschutzabkommen	3
1.2. Agenda 2030: Sustainable Developments Goals	5
1.3. Klimaschutz in Deutschland	6
2. CO₂-BEPREISUNG	11
2.1. Europäischer Emissionshandelssystem (EU-EHS)	11
2.1.1. Funktionsweise/Strategie und Herangehensweise	11
2.1.2. Teilnehmer.....	12
2.1.3. Handelsperiode/Reform 2018.....	13
2.1.4. Marktstabilitätsreserve.....	15
2.1.5. Carbon Leakage	16
2.2. Nationales Emissionshandelssystem (nEHS).....	17
3. PAPIERINDUSTRIE	19
3.1. Papierherstellungsprozess	20
3.2. CO ₂ -Fußabdruck	21
3.3. Energieverteilung in der Papierindustrie	22
4. BESCHREIBUNG DER REFERENZFABRIK	24
4.1. IST-Situation der Referenzfabrik	24
4.2. Teilnahme am Europäischen Emissionshandel	26
5. ROADMAP	28
5.1. Effizienzmaßnahmen.....	28
5.2. Regenerative Maßnahmen.....	29
5.3. Umstellung auf grüne Energieversorgung	32
5.4. CO ₂ -frei werden.....	34
5.5. Ergebnisse	35
ZUSAMMENFASSUNG	38
LITERATURVERZEICHNIS	vii
ANHANG 1	xi

ABILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Szenarien der globalen Treibhausgasemissionen (geändert nach [4])	4
Abbildung 2: Globale CO ₂ -Emissionen von Brennstoffen [11]	5
Abbildung 3: Deutsche Emissionen nach Treibhausgasen in Millionen CO ₂ -Äq im Jahr 2018 (eigene Darstellung auf den Basisdaten vom UBA [17])	7
Abbildung 4: Entwicklung der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern 1990 bis 2019 [20]	8
Abbildung 5: Entwicklung der Treibhausemissionen in Deutschland – Sektor Industrie (eigene Darstellung anhand [24])	9
Abbildung 6: Emissionen der emissionshandlungspflichtigen Anlagen in Deutschland nach Branche im Jahr 2018 [30]	12
Abbildung 7: Gesetzliche Durchführung des Europäischen Emissionshandelssystems [32]	13
Abbildung 8: Cap-Aufteilung in der 4. Handelsperiode [37]	15
Abbildung 9: Entwicklung des CO ₂ -Preises [38]	16
Abbildung 10: Entwicklung der Papierindustrie in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2018 (eigene Darstellung anhand [46])	19
Abbildung 11: Papiermaschine: Prozessschritte zur Papierherstellung [50]	20
Abbildung 12: Input/Output einer Papierfabrik; Grenzen der Untersuchung (eigene Darstellung)	21
Abbildung 13: Spezifischer Energieverbrauch von Papierfabriken (eigene Darstellung auf Basis [47])	22
Abbildung 14: Prozentuale Energieverteilung in einer Papiermaschine (eigene Darstellung gem. [52])	23
Abbildung 15: Energieverbrauch der Referenzfabrik je nach Energieträger und Verbraucher	24
Abbildung 16: Kostenanteil je nach Energieträger	25
Abbildung 17: Papiermaschinebedingte Emissionen	26
Abbildung 18: Übersicht der CO ₂ -Emissionen der PM 2 in 3. Handelsperiode	26
Abbildung 19: Übersicht der CO ₂ -Emissionen der PM 4	27
Abbildung 20: Der Weg zur Klimaneutralität	28
Abbildung 21: Das Dach der Referenzfabrik [Quelle: Google Maps]	30
Abbildung 22: Wärmeleitfähigkeit der Bohrungen [58]	31
Abbildung 23: Brennstoffkosten für Energieträger zur Stromerzeugung frei Kraftwerk [60]	33
Abbildung 24: Verlauf der Stromgestehungskosten von EE-Anlagen und der Vollkosten einer konventionellen Stromversorgung [62]	34
Abbildung 25: Anwendungsfelder Power-to-Gas [65]	35
Abbildung 26: Einsparungen durch den Einsatz der Effizienz- und Regenerativen Maßnahmen	36
Abbildung 27: Mögliche Reduktionsszenarien basierend auf Schritte 3 und 4	37

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Handelsperiode des EU-EHS (eigene Darstellung anhand [33], [34])	14
Tabelle 2: Fixpreise für eine Tonne CO ₂ (eigene Darstellung gem. [42])	18
Tabelle 3: CO ₂ -Minderungsmaßnahmen in 1. Stufe gem. [52], [53]	29
Tabelle 4: Grundlagen für die Berechnung der Produktion von Biogas aus Mais auf Basis [61]	32

ABKÜRUNGEN, FORMELZEICHEN UND EINHEITEN

°C	Grad Celsius
€	Euro
a	Jahr
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bspw.	beispielsweise
BWS	Bruttowertschöpfung
bzw.	beziehungsweise
C2C	Cradle-to-Cradle
CCU	Carbon Capture and Utilization: Abscheidung und anschließende Verwendung von CO ₂
CH ₄	Methan
CL	Carbon Leakage
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ -Äq	Kohlendioxid Äquivalent
Ct	Cent
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
durchschn.	durchschnittlich
EE	Erneuerbare Energie
EEX	European Energy Exchange
EHRL	Emissionshandelsrichtlinie
EHS	Emissionshandelssystem
EU	Europäische Union
EUA	European Union Allowance
EU-EHS	Europäisches Emissionshandelssystem
FM	Frischmasse
GCP	Global Carbon Project
gem.	gemäß
GHGP	Greenhouse Gas Protocol
Gt	Gigatonnen
ha	Hektar
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK-Anlage	Kraft-Wärme-Kopplungsanlage
kWp	Kilowatt Peakleistung
LRF	Linearen Reduktionsfaktor

m	Meter
m ²	Quadratmeter
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
Mrd.	Milliard
MSR	Marktstabilitätsreserve
Mt	Millionen Tonnen
MWh	Megawattstunde
N ₂ O	Lachgas
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
PFC	Perfluorierten Kohlenwasserstoff
PM	Papiermaschine
PRODCOM	Produktionsebene
PtX-Anlage	Power-to-X-Anlage
PVA	Photovoltaikanlage
SDG	Sustainable Development Goals
t	Tonne
TEHG	Treibhausgas-Emissionsgesetz
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
USA	Die Vereinigten Staaten von Amerika
VN	Vereinte Nationen
WLC	White lined chipboard
Wp	Watt Peakleistung
WRG-Anlage	Wärmerückgewinnungsanlage
z. B.	zum Beispiel
λ	spezifische Wärmeleitfähigkeit

EINLEITUNG

Dem zunehmenden CO₂-Austoß und dem dadurch verursachten Klimawandel wird in letzter Zeit eine hohe Aufmerksamkeit gewidmet. Das im Jahr 2016 beschlossene Pariser Abkommen hat für alle unterzeichneten Mitgliedstaaten den ersten Baustein zu den Anforderungen des Klimaschutzes gelegt, um den Anstieg der Durchschnittstemperatur bis Ende des Jahrhunderts unter 2 Grad Celsius, idealerweise unter 1,5 Grad Celsius zu halten. änderte sich in den teilnehmenden Ländern die Richtung des Diskurses über Klimaschutzprogramme [1].

Im europäischen Wirtschaftsraum wurde als umweltpolitische Maßnahme das Instrument des europäischen Emissionshandelssystem (EU-EHS) eingeführt, um energieintensive Sektoren hinsichtlich des CO₂-Kostendruck zu verbessern und den Einsatz von klimafreundlichen Maßnahmen voranzutreiben [2]. Zurzeit sind die Energiewirtschaft und Industriesektor die emissionshandelspflichtigen Teilnehmer: Zusammen tragen sie die Verantwortung für einen großen Teil des Treibhausgasemissionen. Einige europäische Ländern haben parallel dazu noch weitere CO₂-Bepreisungssysteme eingeführt. Zu diesen Ländern zählt auch Deutschland, wo ab 2021 der nationale Emissionshandel (nEHS) für nicht EU-EHS einbezogene Sektoren, Gebäude und Verkehr, in Kraft tritt.

Die Frage, wie effizient das klimapolitische Instrument der des Emissionshandels ist, um den Klimawandel durch in Pariser Abkommen als auch von deutscher Regierung festgelegte Ziele nachzukommen, wird in Rahmen dieser Arbeit untersucht. Das Ziel der Arbeit ist die Entwicklung der Strategie zur Dekarbonisierung am Beispiel einer bestehenden Fabrik aus der Papierindustrie.

Zuerst wird die Analyse von Effizienz der Klimaschutzgesetzen weltweit, europaweit und in Deutschland als die Grundlage für weitere Untersucheng durchgeführt. Danach wird das Thema CO₂-Bepreisung, Funktions- und Vorgehensweise des EU-EHS sowie seine Entwicklung beleuchtet. Im Fokus der Arbeit steht die Bestandsanalyse des zu untersuchenden Unternehmens, das direkt am europäischen Emissionshandel teilnimmt. Dabei werden die Schwachstellen der Papierfabrik identifiziert. Zum Schluss werden Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen basierend auf den Ergebnissen der durchgeführten Bestandsanalyse vorgeschlagen, die potentielle Wege zur Klimaneutralität bilden. Hier werden die Emission aus den verfügbaren Papiermaschinen betrachtet, weil für die Kompensation der Zukauf von Emissionsrechten am Markt erforderlich ist.

In Rahmen dieser Bachelorarbeit wird für die Analyse eine theoretische Methode (Literaturarbeit und Inhaltsanalyse) verwendet. Um einen tiefen Einblick sowohl in die Rahmenbedingungen für die Teilnahme am EU-EHS als auch in die Papierherstellungsprozesse zu bekommen, wurden Fachliteratur, Zeitungsartikel und wissenschaftliche Publikationen genutzt. Die Daten für die Bestandsanalyse wurden von dem Unternehmen per Email zur Verfügung gestellt.

ABSTRACT

Increasing CO₂ emissions and the climate change caused by them have recently received a great deal of attention. The Paris agreement, which was adopted in 2016, has laid the first building block for all signed member states on the requirements of climate protection in order to keep the rise in average temperature below 2 degrees Celsius, ideally below 1.5 degrees Celsius, by the end of the century [1].

In the European Economic Area, the instrument of the European Emission Trading System (EU-ETS) was introduced as an environmental policy measure to improve the CO₂ cost pressure in energy-intensive sectors and to promote the use of climate-friendly measures [2]. At present, the energy industry and the industrial sector are the participants obliged to emissify: Together they bear the responsibility for a large part of the greenhouse gas emissions. Some European countries have introduced additional CO₂ pricing systems in parallel. One of these countries is Germany, where national emissions trading (nETS) for sectors not covered by the EU-ETS, buildings and transport, will come into force from 2021.

The question of how efficient the climate policy instrument of emissions trading is in meeting climate change targets set by the Paris Accord and the German government is examined in this paper. The aim of the thesis is to develop a strategy for decarbonization using the example of an existing factory in the paper industry.

The first step is to analyse the efficiency of climate protection legislation worldwide, Europe-wide and in Germany as a basis for further research. Then the topic of CO₂ pricing, the function and approach of the EU-ETS and its development will be examined. The focus of the work is the analysis of the current situation of the company under investigation, which directly participates in the European emissions trading scheme. Thereby the weak points of the paper factory are identified. Finally, possibilities for the reduction of emissions are suggested based on the results of the analysis of the current situation, which are potential ways to achieve climate neutrality. Here, the emissions from the available paper machines are considered, because the purchase of emission rights on the market is required for compensation.

In the context of this bachelor thesis a theoretical method (literary work and content analysis) is used for the analysis. In order to gain a deep insight into the framework conditions for participation in the EU-ETS as well as into the paper production processes, technical literature, newspaper articles and scientific publications were used. The data for the inventory analysis were provided by the company via email.

1. UMWELTPOLITIK IN DER PRAXIS

Das Thema Klimaschutz wird schon seit Jahrzehnten auf politischer Ebene weltweit diskutiert. Die erste Weltklimakonferenz fand im Jahr 1979 in Genf statt, aber damals konnte sich kaum keiner die Tragweite der menschlichen Verantwortung an der Erwärmung des Klimas vorstellen [3]. Um den aktuellen Klimastand wissenschaftlich zu erforschen und zu bewerten, wurde nach der Klimakonferenz in Toronto im Jahr 1988 das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gegründet. Bereits die erste Ausgabe des Berichts zeigte einen Zusammenhang von Kohlenstoffdioxidemissionen, Treibhauseffekt und dem sich wandelndem Klima. Der globale Temperaturanstieg wird zu einem großen Teil durch den Ausstoß von Treibhausgasen (THG), unter anderem Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄), die durch die Verbrennung der fossilen Energieträger entstehen, verursacht. Um die Auswirkungen des Klimawandels für Mensch und Natur zu minimieren, muss einerseits der Ausstoß reduziert aber auch die Energienutzung geändert werden. Im Folgenden werden wichtige Klimaschutzprogramme und -gesetze ausführlich beschrieben.

1.1. Pariser Klimaschutzabkommen

Im Jahr 2015 auf der Klimaschutzkonferenz in Paris wurde ein allgemeines, rechtverbindliches weltweites Klimaschutzübereinkommen beschlossen [1]. Dieses hat das Ziel, die Erderwärmung bis zum Ende des laufenden Jahrhunderts deutlich auf unter 2 Grad Celsius, idealerweise auf 1,5 Grad Celsius gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen. Im Vergleich zu Kyoto-Protokoll von 1997, laut dem nur einige Industrieländer ihre Emissionen im Zeitraum von 2005 bis 2012 um 5,2 % gegenüber dem Jahr 1990 sinken mussten, sind nach dem Pariser Abkommen alle Länder unabhängig von dem wirtschaftlichen Entwicklungsstand dazu verpflichtet, einen nationalen Klimaschutzbeitrag zu leisten. Jedes Land definiert selbst die nationalen Klimasziele, die alle fünf Jahre neu aufgelegt werden müssen. Damit die Transparenz sichergestellt wird, erfolgt auch eine Berichterstattungspflicht über die erzielten Fortschritte für den Klimaschutz.

Als Grundlage für Klimaschutzpolitik wurde drei Jahre später ein Sonderbericht von dem Weltklimarat IPCC veröffentlicht, in dem die möglichen Szenarien und empfohlene Maßnahmen beschrieben wurden. Wie die Abbildung 1 zeigt, liegt die aktuelle politische Klimastrategie (grüne Pfade) weit außerhalb der Zwei-Grad-Zielpfade und reicht nur für die Begrenzung des durchschnittlichen globalen Temperaturanstieges um 3,1-3,7 °C aus. Passen alle Staaten ihre nationalen Ziele gemäß dem Pariser Abkommen an, ist die Erderwärmung bis 2100 um 2,6-3,2 °C zu erwarten. Man muss jetzt dringend dagegenwirken, sonst werden die Folgen des Klimawandels unumkehrbar.

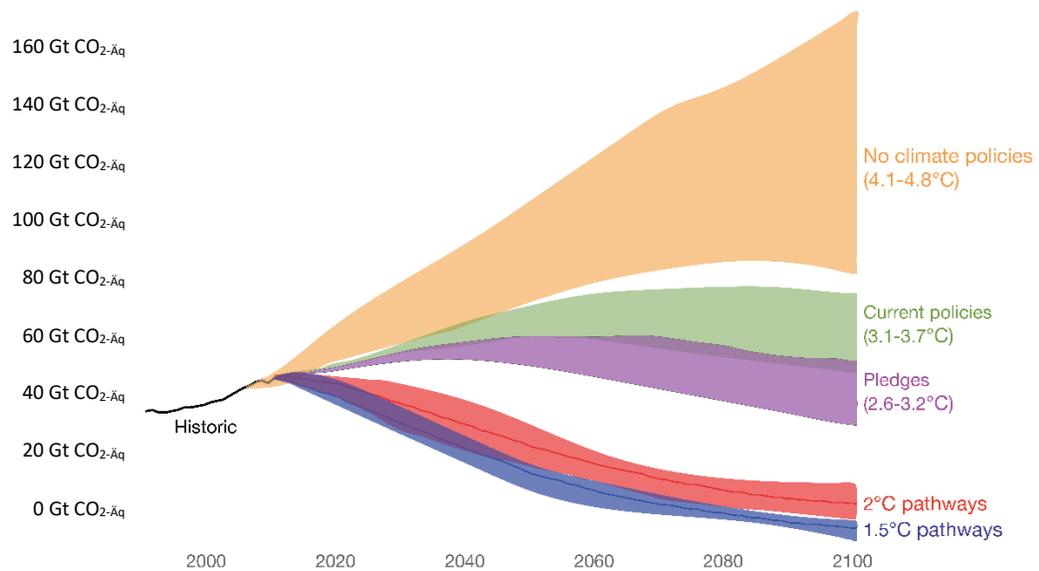


Abbildung 1: Szenarien der globalen Treibhausgasemissionen (geändert nach [4])

Das IPCC ist der Meinung, dass bestimmte CO₂-Budgets für die Einhaltung der Durchschnittstemperatur unter 1,5 °C bzw. 2 °C mit der Wahrscheinlichkeit von 67 % zur Verfügung stehen. Demnach dürften ab 2018 bis 2050 in der Summe nicht mehr als 420 Gigatonnen CO₂ (Gt CO₂) bzw. 1170 Gt CO₂ in die Luft ausgestoßen werden [5]. Jedoch wurden im Jahr 2018 41 Gt CO₂-Äq [6] und im Jahr 2019 43 Gt CO₂-Äq [7] vom Budget aufgebraucht. Bei den durchschnittlichen jährlichen THG-Emissionen von 42 Gt CO₂-Äq wird das CO₂-Budget für 1,5-Grad-Ziel in den nächsten zehn Jahren und für das 2-Grad-Ziel in ca. 28 Jahren erschöpft sein. Nach der Berechnung muss die Klimaneutralität spätestens bis 2050 erreicht werden. Dies kann durch eine Kompensation und einer Verringerung der THG-Emissionen, beispielsweise durch Abbauprozesse von Kohlenstoffdioxid, gelingen. Da CO₂-Emissionen lange Zeit (bis zu Jahrhunderten) in der Atmosphäre bleiben können und dadurch die Erde erwärmen, müssen die wesentliche Maßnahmen, wie ein Umbau des globalen Energiesystems, die erhöhte Nutzung von CO₂-armen Technologien, Kohlenausstieg etc., schnellstmöglich umgesetzt werden [8].

Trotz der wissenschaftlichen Aufklärungsarbeiten, dem Kyoto-Protokoll und dem Pariser Abkommen steigen die Kohlendioxidemissionen jedes Jahr weiter. Laut der Studie Global Carbon Project (GCP) [9] war 2019 mit 36,81 Gt CO₂ (0,6 % mehr als in 2018) ein neues Rekordjahr (s. Abbildung 2). Obwohl der Anstieg geringer als in letzten Jahren ist (im Jahr 2018 bei 2,7 %, 2017 bei 1,5 %), vertreten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Meinung, dass man ohne weltweite Klimaneutralität den Klimawandel nicht begrenzen kann [10]. Nach den Angaben von GCP [11] sind die Emissionen von China – der größte Emittent, um 0,26 Gt CO₂ gestiegen, was größer als der Anstieg der ganzen Welt (0,24 Gt CO₂) ist. Währenddessen reduzieren EU-Länder und USA ihre Emissionen durch den stufenweisen Kohlenausstieg

Global CO₂ emissions from fossil fuels are set to reach another record high in 2019

The 0.6% expected increase is low by historical standards and CO₂ fell outside China.

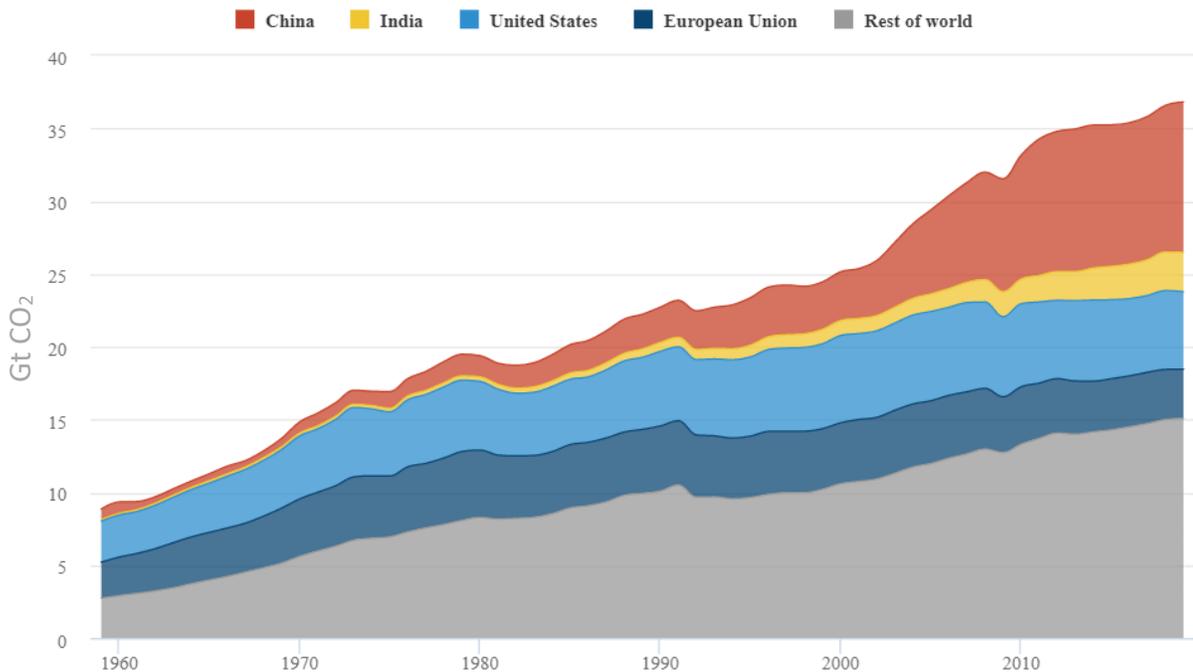


Abbildung 2: Globale CO₂-Emissionen von Brennstoffen [11]

Dank den öffentlichen Bekundungen zum Umweltschutz nimmt dieser in den letzten Jahren ein zentrales Thema in vielen politischen sowie wirtschaftlichen Institutionen ein. Fridays for Future, Extinction Rebellion und Greenpeace nehmen das Pariser Abkommen als formale Grundlage zum Vorantreiben der konkreten Maßnahmen zur Reduzierung der THG-Emissionen. Jetzt 40 Jahren nach der ersten Klimakonferenz, reden die Politikerinnen und Politiker nicht nur darüber, sondern fangen langsam an, was dafür zu tun, um eine Chance zu haben, die Welt von der Klimakatastrophe retten zu können. Mit der Agenda 2030 für Nachhaltige Entwicklung hat man ersten Stein zur gemeinsamen weltweiten Entgegnung gelegt. Ob es ein effektives politisches Instrument ist, wird es im nächsten Kapitel näher angesehen.

1.2. Agenda 2030: Sustainable Developments Goals

Wenige Monate vor der Klimakonferenz in Paris stand das Thema Klimaschutz im Zentrum der Aufmerksamkeit auf einem Gipfel der Vereinten Nationen (VN) im September 2015 in New York, wo 193 Mitgliedstaaten die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung verabschiedet haben [12]. Die festgelegte 17 Ziele (Sustainable Development Goals, SDGs) und 169 Zielvorgaben für eine Transformation der Welt geben einen politischen Rahmen hinsichtlich sozialer, rechtlicher, ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte, die sich gegenseitig beeinflussen. Daraus folgen sich große Herausforderungen vor allem für die Energie- und Industriesektor.

Alle Länder ohne Ausnahme müssen durch Zusammenarbeit dazu beitragen, die UN-Ziele zu erfüllen. Ein Erfolg der Agenda 2030 ist jedoch in den nächsten zehn Jahren schwer vorzustellen. Laut Sustainable Development Report 2019 [13] ist keins der unterzeichnenden Länder auf dem richtigen Weg, alle 17 SDGs zu erreichen. Vor allem besteht Aufholungsbedarf bezüglich dem SDG 12 *Nachhaltige Konsum- und Produktionsweisen* und SDG 13 *Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen*. Der Spotlight Report 2019 [14] zeigt, dass es nach vier Jahren seit der Annahme der Agenda 2030 kaum Fortschritte gibt, vielmehr sogar Rückschritte zu beobachten – die Staaten sind nicht so ambitioniert, wie sie sein müssen, was das Vorankommen enorm erschwert. Die unterschiedlichen Bedürfnisse und Herausforderungen der einzelnen Länder lassen sich nur schwer implementieren. Die Länder mit hohem Einkommen treiben einerseits die Erfüllung der UN-Ziele durch die finanzielle Unterstützung (G20-Länder sind verpflichtet 0,7 % des Bruttoinlandsproduktes auszugeben) voran, andererseits verlangsamen den Prozess in Drittländer durch die hohen Lebensstandards und Konsumvorliebe. Beispielsweise führt die Produktion der hochgefragten Lebensmittel, deren Anbau große Fläche benötigt, zur Abholzung der Regenwälder [13].

Die festgelegten Ziele bilden die Grundlage für die Erarbeitung einer effektiven Politikführung. Durch die Berücksichtigung der qualitativen Zielvorgaben der Agenda 2030 ist es Deutschland gelungen die nationale Nachhaltigkeitsstrategie aufzubauen [15], unter die verschiedenen zielführenden Aktionspläne entwickelt wurden. Obwohl Deutschland zu den Top-10 Ländern mit hoher UN-Ziele-Erfüllungsrate zählt, wird trotzdem immer noch zu wenig unternommen [13].

1.3. Klimaschutz in Deutschland

Deutschland als Industrieland trägt eine besondere Verantwortung. Wegen der ressourcen- und energieintensiven Nutzung in der Vergangenheit muss Deutschland einen großen Beitrag zur Begegnung des Klimawandels leisten. Deutschland kann hier eine Vorreiter- und Pionierrolle einnehmen, dass man nachhaltig und wirtschaftlich sein kann. Gelingt dieser Nachweis, gewinnt Deutschland einen besonderen Platz auf dem zukünftigen Weltmarkt.

Im November 2016 verabschiedete die Bundesregierung den Klimaschutzplan 2050 [16] und legte somit die Ziele fest, um bis 2030 mindestens 55 Prozent der THG-Emissionen gegenüber dem Niveau von 1990 einzusparen und im Jahr 2050 klimaneutral zu werden. Nach dem Plan ist im Jahr 2020 den Emissionsausstoß von einer Reduktion um 40 Prozent bezüglich dem Jahr 1990 geplant. Die Ambitionen, den Klimaschutzplan 2050 zu verwirklichen, verstärken das 2019 beschlossene Klimaschutzprogramm 2030 [17] und Klimaschutzgesetz [18], deren Kernbestandteil die Einführung des nationalen Emissionshandels für Gebäude und Verkehr ist.

Obwohl es viele Initiativen in der Zusammenarbeit mit anderen Ländern als Teil der Europäischen Union (EU-Klimaschutzverordnung [19], European Green Deal [20]) sowie auf nationaler (Klimaschutzplan, Klimaschutzgesetz, der nationale Emissionshandel [21]) und subnationaler Ebene (SINTEG [22], NEW 4.0 [23], Hamburger Klimaplan [24]) geschaffen wurden, ist Deutschland für ca. zwei Prozent der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich und bleibt damit unter den zehn größten CO₂-Emittenten der Welt [25].

Nach ersten Abschätzungen [26] wurden im Jahr 2019 in Deutschland 805 Millionen Tonnen (Mt) Treibhausgas-Emissionen ausgestoßen, was 6,1 Prozent weniger als im Jahr davor ist und die Reduzierung um 35,7 Prozent dem Jahr 1990 gegenüber beträgt. Der Anteil des Kohlendioxids am deutschen Gesamtausstoß macht 88 Prozent im Durchschnitt aus (s. Abbildung 3), davon stammen im Jahr 2018 ca. 38 Prozent (290,1 Mt CO₂) Emissionen aus der Energiewirtschaft und ca. 23 Prozent (177,3 Mt CO₂) aus dem Industriesektor [26].

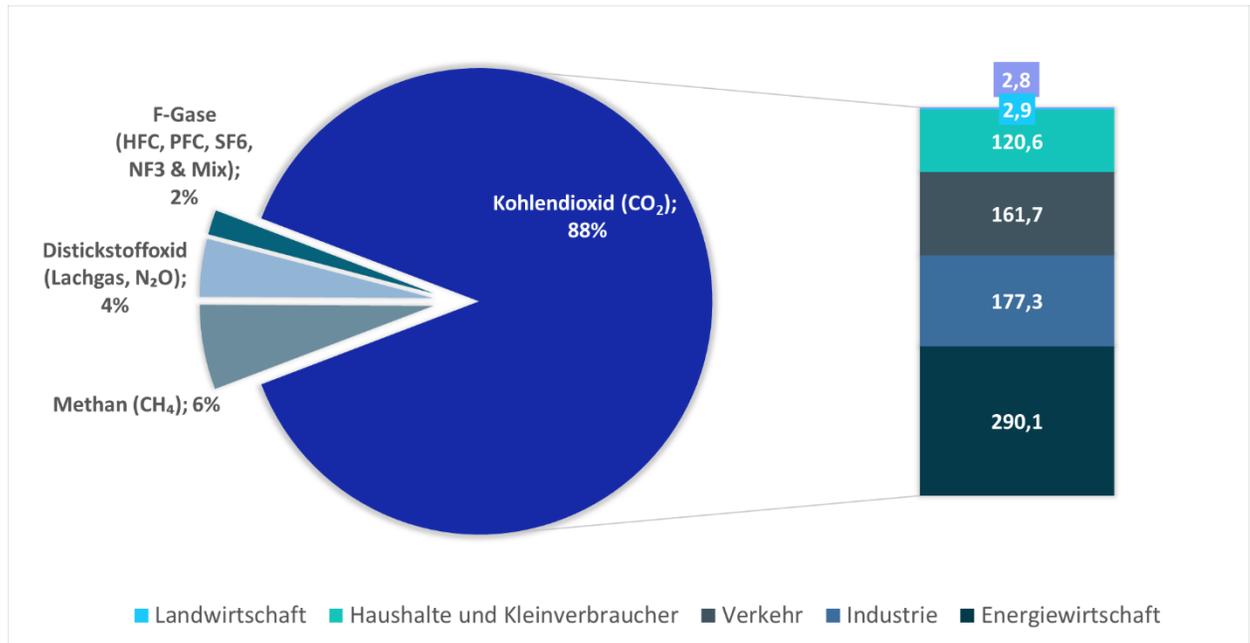


Abbildung 3: Deutsche Emissionen nach Treibhausgasen in Millionen CO₂-Äq im Jahr 2018 (eigene Darstellung auf den Basisdaten vom UBA [17])

Der Klimaschutzplan 2050 konkretisiert die Emissionsminderungsziele für jeden Sektor, sodass die Entscheidungsträger eine Strategie entwickeln können. So müssen die Emissionen bei der Energieerzeugung um 61 bis 62 Prozent bis 2030 reduziert werden, während im Bereich Industrie diese um 49 bis 51 Prozent im Vergleich zu dem Jahr 1990 sinken müssen [16]. Die Umsetzung des Klimaschutzplans wird so, wie das Pariser Abkommen, ständig überprüft und nach Bedarf aktualisiert.

Die von der Bundesregierung vorgeschriebene Minderungsmaßnahmen geben eine Orientierung, wie die festgelegten Ziele am effektivsten erreicht werden können. Für die Energiegewinnung stellt der Umbau des Sektors ein großes Potential vor. Die Folgen der Energiewende sind schon spürbar: Nach letzten Angaben vom Umweltbundesamt (UBA) [27] ist die Stromproduktion in Deutschland deutlich klimafreundlicher geworden. Die Entwicklung der Bruttostromerzeugung in Deutschland seit dem Jahr 1990 ist in Abbildung 4 dargestellt. Man kann deutlich sehen, dass der Anteil der erneuerbaren Energien (EE) im Stromsektor im Jahr 2019 nach den Schätzungen von der Datenfabrik Agora Energiewende [28] 40 % ausmachte. Im Gegensatz dazu ist die Verbrennung von Stein- und Braunkohle nicht profitabel geworden, was auf gestiegenen Preis der CO₂-Zertifikate auf

ca. 25 Euro zurückzuführen ist. Auf der anderen Seite stieg der Verbrauch von Erdgas. Es ist zwar auch ein fossiler Energieträger, aber klimafreundlicher als Kohle [28]. Dank dem gesunkenen Energiebedarf, dem Kohle- und Atomausstieg und dadurch zunehmendem Ökostromverbrauch macht der Strommix in Deutschland 401 Gramm/kWh aus [27]. Diese Menge entspricht der Reduzierung der Emissionen um 47 Prozent seit 1990. Neben dem Umbau der Energiewirtschaft stehen die milde Witterung und windreiche Jahre mit hoher Sonneneinstrahlung als Grund dafür, weniger Brennstoff einzusetzen und mehr Strom aus wetterabhängigen erneuerbaren Energien erzeugen zu können [28].

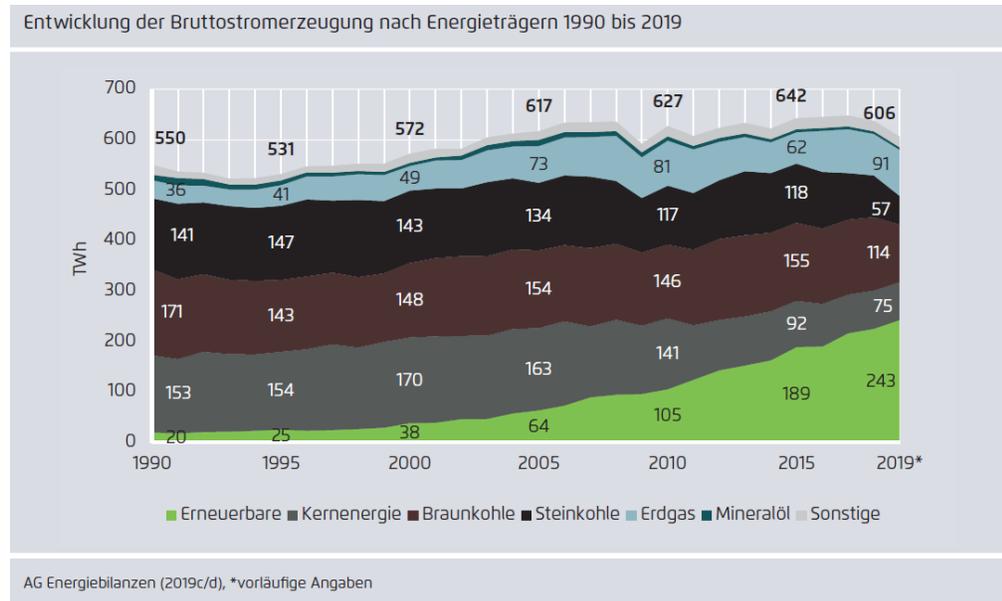


Abbildung 4: Entwicklung der Bruttostromerzeugung nach Energieträgern 1990 bis 2019 [28]

Das Klimaziel im Energiesektor wird nur dann erreicht, wenn die Anstrengungen verstärkt werden. Dazu gehören der intensive Ausbau der erneuerbaren Energien, dessen Anteil an Bruttostromverbrauch laut dem Klimaschutzgesetz bis 2030 auf mindestens 65 Prozent erhöht werden muss, die Verbesserung der Energieeffizienz der Kraftwerkeanlagen, der Einsatz der kohlenstoffarmen Energieträger, aber auch Reduzierung des Stromhandelsexport, da die Emissionen nach dem Quellen- bzw. Verursacherprinzip bilanziert werden, sowie sparsame Energieumgang für die Energiebedarfsenkung [29].

Der Industriesektor als Deutschlands zweitgrößter Emittent umfasst Emissionen aus Verbrennungsprozessen und eigener Energiebereitstellung (direkte Emissionen). Zusätzlich wird auch der Fremdstrom und die Fernwärme (indirekte Emissionen) nach dem Quellprinzip im Energiesektor bilanziert. Die Veränderungen in beiden Sektoren können sich daher unmittelbar gegenseitig beeinflussen.

Der Ausstoß von THG im Industriebereich zwischen den Jahren 1990 und 2019 ist von 284 auf 188 Mt CO₂-Äq zurückgegangen und damit liegt dieser sieben Millionen Tonnen CO₂-Äq niedriger als

im Vorjahr [26]. Die Reduktion entspricht ca. 33,8 % gegenüber dem Jahr 1990. Die Emissionen nehmen schon im zweiten Jahr aufgrund der Abkehr von fossilen Brennstoffen und steigender Energieeffizienz ab, obwohl der Trend davor drei Jahre in Folge dank der guten wirtschaftlichen Konjunktur leicht gestiegen ist (s. Abbildung 5). Außerdem spielten hier die Emissionshandelspreise auch eine wesentliche Rolle. Da die Entwicklung in letzten Jahren nicht deutlich sinkend ist, kann das festgelegte Ziel für Industrie verfehlt werden.



Abbildung 5: Entwicklung der Treibhausemissionen in Deutschland – Sektor Industrie (eigene Darstellung anhand [26])

Vor allem stehen energieintensive Industriebranchen, wie Metallherstellung, Chemieindustrie und Herstellung mineralischer Produkte, für die Emission von schädlichen Gasen in der Verantwortung. Nach den verfügbaren Daten vom UBA [30] betrug ihren Anteil an den von Industrieanlagen freigesetzten Emissionen zwei Drittel im Jahr 2017. Das entspricht die Menge von 126 Mt CO₂-Äq. Hier lassen sich Drehpunkte nur begrenzt ansetzen, da die Emissionen noch nicht von wirtschaftlichem Erfolg entkoppelt sind. Obwohl die Bruttowertschöpfung (BWS) der Industrie zwischen 1995 und 2017 um etwa 39 % stieg, während die Emissionen um 19 % sanken [31], ergibt sich immer noch ein Zielkonflikt zwischen dem durch die Wirtschaftsleistung steigende Wohlstand und dem Klimaschutz. Der Industriesektor spielt dabei eine Doppelrolle: Einerseits verstärkt er die Volkswirtschaft, andererseits verursacht er etwa 23 Prozent des deutschen Gesamtausstoßes.

Die Klimabelastung durch die Industrie repräsentiert die aus dem Verhältnis des Wirtschaftswachstums (BWS in Euro) zu den Emissionen (in Kilogramm CO₂-Äq) erzeugte Kennzahl [32]:

$$CO_2\text{-Intensität} = \frac{CO_2\text{-Emissionen}}{BWS} \quad (1)$$

Nach der Formel (1) ergibt sich die CO₂-Intensität im deutschen Industriesektor für 2019 bei der $BWS_{\text{Industrie}} = 920,21$ Mrd. Euro [33] und den CO₂-Emissionen $E_{\text{Industrie}} = 188$ Mt CO₂-Äq $0,20$ kg CO₂-Äq/€. Dieser Wert lässt sich durch effiziente Produktions- und Energieerzeugungsverfahren, den Umstieg auf die klimafreundlichen Brennstoffe, die Abwärmenutzung und die Anwendung von CCU (Carbon Capture and Utilization: Abscheidung und anschließende Verwendung von CO₂) verringern und sich dem Ziel des Industriesektors im Folgenden annähern. Eine weitere zielführende Maßnahme stellt die Elektrifizierung des Produktionsprozesses dar, da elektrische Energie in andere Energieträger umwandelbar ist. Ein Beispiel ist hier die Stahlherstellung über Direktreduktion mit Wasserstoff. Die strombasierten Produktionsprozesse mit zusätzlichem Strombedarf verstärken aber die Herausforderungen der Energiewirtschaft. Ergänzend dazu fordern neue Technologien hohe Kapitalkosten, die besonders in Wettbewerbssituationen relevant sind. Laut der Studie von der Non-Profit-Organisation Carbon Disclosure Project [34] müssen europäische Unternehmen für Klimaneutralität im Jahr 2050 die Investitionen zur CO₂-Reduzierung verdoppeln, um als ein Technologievorreiter nachhaltige Impulse für Länder mit weniger strikter Klimapolitik aber mit großen Emissionsminderungspotenzial zu geben. Ohne ausreichende Investitionen in „grüne“ Technologien verlangsamt sich das Innovationstempo und damit auch die globale Dekarbonisierung.

2. CO₂-BEPREISUNG

Wie schon in vorhergegangenen Kapiteln beschrieben scheint die CO₂-Bepreisung ein sehr effektives Instrument der Umweltpolitik, das viele Länder für Reduzierung der klimaschädlichen Gase eingeführt haben. Im Jahr 2019 haben 46 Länder sich für ein CO₂-Preissystem entschieden [35]. Die Art und Weise, die zusätzliche Kosten für die Umweltbelastung nach dem Verursacherprinzip zu tragen, stimuliert die Marktteilnehmer die umweltfreundlichen Technologien zu nutzen. Es gibt zwei bekannte Formen der CO₂-Bepreisung: CO₂-Steuer und Emissionshandelssystem (EHS).

Unter der CO₂-Steuer versteht man eine CO₂-Abgabe mit einem Steuersatz für eine Tonne emittierter THG auf die Produkte, deren Verwendung zu den Emissionen führen [36]. Der Preis wird von der Regierung festgesetzt und kann mit der Zeit je nach der Situation (Über- oder Unterfüllung der Ziele sowie Inflation) angepasst werden. Dieses Instrument lässt die emissionsintensiven Unternehmen besser den finanziellen Aufwand vorkalkulieren. Wird das Minderungsziel verfehlt, muss die Regierung die Steuer mit der Zeit erhöhen. Wie die Erfahrung von Frankreich gezeigt hat, wo mehrere Wochen lang die Gelbwestenbewegung stattfand, finden die politisch gesteuerte Verteuerung einer CO₂-Abgabe nicht immer positive Akzeptanz unter der Gesellschaft [37].

Das Emissionshandelssystem (EHS) impliziert ein Emissionsrecht, das Unternehmen kaufen, um eine Tonne CO₂ in die Atmosphäre ausstoßen zu dürfen [36]. Der Zertifikatspreis bildet sich auf dem Markt, worauf die Regierung nur indirekt durch eine Knappheit der verfügbaren Zertifikate wirkt. Mit dem auf Angebot und Nachfrage basierenden Preis ist es schwer die genaue Kostenprognose vorzurechnen, deswegen steigt der Anreiz, schneller klimaneutral zu werden. Daher liegt in der Basis des EHS ein Mengensteuerungsmechanismus, der sich auf Emissionsminderungsziele bezieht, d. h. es wird so viel Zertifikate ausgegeben, wie die Gesamtmenge an zugelassenen Emissionen, wohingegen es bei den CO₂-Steuern hingegen keine genaue Gesamtausstoßgrenze gibt. Aus diesem Grund weist das EHS das Erreichen der Umweltziele mit einer höheren Treffsicherheit auf.

2.1. Europäischer Emissionshandelssystem (EU-EHS)

Im EU-Bereich funktioniert der bislang weltweit größte Kohlenstoffmarkt – das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS), das 2005 durch die Emissionshandelsrichtlinie [38] für die Verwirklichung der Kyoto-Ziele in Kraft trat. Am Handel beteiligen sich alle 27 EU-Länder sowie Island, Liechtenstein, Norwegen und Großbritannien. Das EU-EHS soll dazu beitragen, die Treibhausgasemissionen in der EU aus dem Jahr 1990 um mindestens 40 % bis zum Jahr 2030 zu verringern [2].

2.1.1. Funktionsweise/Strategie und Herangehensweise

In der Grundlage des EU-EHS liegt das Kernprinzip „Cap and trade“ („Mengenbegrenzung und Handel“), das sich in weiteren Etappen ausführlich beschreiben lässt. Es wird politisch eine Emissionsobergrenze („cap“) bestimmt, die Emittenten mit ihrem Ausstoß nicht übersteigern dürfen. Mit der Zeit verringert sich diese Grenze, um den Emissionsrückgang sicherzustellen. Alle Teilnehmenden müssen die Emissionszertifikate erwerben, die sie vom Staat kostenlos zugeteilt bekommen oder auf dem Markt kaufen. Ein Zertifikat, European Union Allowance (EUA), entspricht eine Tonne

sie die abgegebenen Emissionsberechtigungen zu den in einem Bericht umfassten Monitoringsergebnisse gegenüber, die wiederum von einer akkreditierten Prüfstelle auf Qualität und Quantität geprüft werden. Falls die Daten nicht übereinstimmen oder fehlen, sind die Bußgelder in Höhe von ca. 100 bis zu 500.000 Euro fällig [41].

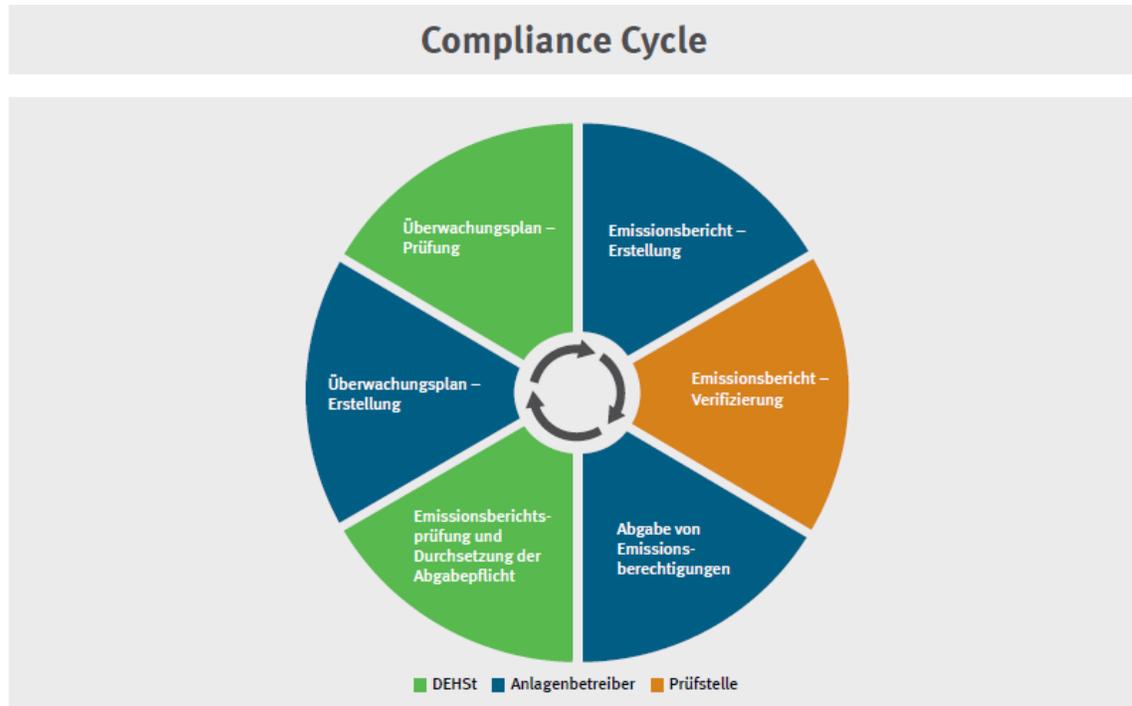


Abbildung 7: Gesetzliche Durchführung des Europäischen Emissionshandelssystems [42]

Zusätzlich dazu müssen die Unternehmen, die den Anspruch an der kostenlosen Zuteilung haben, einen Antrag, der einen Bezugsdatenbericht mit zuteilungsrelevanten Daten, einen Plan zur Überwachungsmethodik und einen Prüfbericht enthält, bereitstellen, um Doppel- und Mehrzuteilungen zu vermeiden [43].

2.1.3. Handelsperiode/Reform 2018

Das Emissionshandelssystem erfolgt in sogenannten mehrjährigen Handelsperioden, in denen Rahmenbedingungen entsprechend der Marktsituation neu definiert werden, um das Minderungsziel am effektivsten zu erreichen (s. Tabelle 1). In kommender Handelsperiode, die erst ab 1. Januar 2021 beginnt, sind die Rahmenbedingungen gemäß der Emissionshandelsrichtlinie (EHRL) [44] verschärft. So steht für den Zeitraum von 2021 bis 2030 ein Emissionsbudget zur Verfügung, das nicht gleichmäßig über die gesamte Handelsperiode verteilt wird, sondern jährlich um den Linearen Reduktionsfaktor (LRF) von 2,2 Prozent sinkt [43].

Tabelle 1: Handelsperiode des EU-EHS (eigene Darstellung anhand [43], [45])

Dauer	1. Handelsperiode	2. Handelsperiode	3. Handelsperiode	4. Handelsperiode	
	2005 - 2007	2008 - 2012	2013 -2020	2021 - 2030	
Teilnehmer	~ 1.850	~ 1.650	~ 1.900	keine Angaben	
Emissionsbudget	in DE: 499 Mt CO ₂ pro Jahr	in DE: 444 Mt CO ₂ pro Jahr	EU-weites Gesamtbudget (Cap) mit einem LRF 1,74 % (Ø 1,95 Mrd. Tonnen CO ₂ /Jahr)	EU-weites Gesamtbudget (Cap) mit einem LRF 2,2 % (im Durchschnitt 1,55 Mrd. Tonnen CO ₂ pro Jahr)	
Kostenlose Zuteilung	für Energie- und Industrieanlagen anhand Grandfathering ¹	für Energieanlagen auf Basis Benchmarks; für Industrieanlagen auf Basis Grandfathering mit fixem Kürzungsfaktor von 1,25 %	für Industrie- und Wärmeproduktionsanlage von 80 % 2013 auf 30 % 2020 anhand von Benchmarks;	1. Zuteilungsperiode: für Wärme- und Industrieanlagen 30 % des Benchmarks	2. Zuteilungsperiode: für Wärme- und Industrieanlagen 30 % 2026 und 0 % 2030 anhand von Benchmarks
Versteigerung	keine	in EU bis zu 10 %; in DE weitgehend ausgeschöpft durch die Kürzung des Zuteilungsbudget für die Stromerzeugung	100 % für Stromversorger	100 % für Stromversorger	

Bei der Zuteilung gelten einige Regeln: Sie erfolgt in zwei Zuteilungsperioden (2021 bis 2025 bzw. 2026 bis 2030) und 57 % der Zertifikate müssen an den Börsen und Auktionen (etwa European Energy Exchange (EEX) in Leipzig) versteigert werden, anderer Teil wird ausgehend von Benchmarks – die Produkt-Emissionswerten (CO₂-Äq/Tonne Produkt) – unter Industrieunternehmen kostenlos verteilt (s. Abbildung 8) [46]. Der Produkt-Benchmark ergibt sich aus einem Durchschnittswert von Treibhausgasen, die zehn Prozent effizientesten Anlagen in der EU für die Herstellung des bestimmten Produkts emittieren [47]. Das bedeutet, dass die Unternehmen, die unter diesem Wert liegen, ihre Emissionen voll mit den kostenlos erhaltenden Zertifikaten decken können. Alle anderen müssen die Emissionsrechte auf dem Markt zukaufen. Die Benchmarks werden für jede Zuteilungsperiode auf der Basis der realen Daten von 2016-2017 bzw. 2021-2022 aktualisiert [43]. Um eine Minderungsanreize bei einer Benchmarksstagnation weiter zu behalten, verknappen sich die Emissionsrechte: mit einem jährlichen Abwertungskorridor zwischen 0,2 % und 1,6 % [43]. Welche Menge unter welchen Unternehmen verteilt wird, entscheidet die DEHSt unter der Kontrolle von der EU-Kommission. Außerdem ist in kommender Handelsperiode ein „Sicherheitspuffer“ vorgesehen. Drei Prozent des Gesamtbudgets werden von dem Auktionsanteil entzogen und sollen zur Vermeidung der sektorübergreifenden Korrektur beitragen [46]. Dadurch werden sowohl die Industrieunternehmen gesichert, dass sie einen vollständigen Anteil der beantragten Zertifikate umsonst bekommen,

¹ auf Basis historischer Emissionen

außerdem wird die festgelegte Obergrenze eingehalten. Je nach Bedarf, z. B. bei der Änderung der Produktionsmenge (Schwellenwert: 15 %), wird die Zuteilungsmenge während der Zuteilungsphase dynamisch angepasst [43].

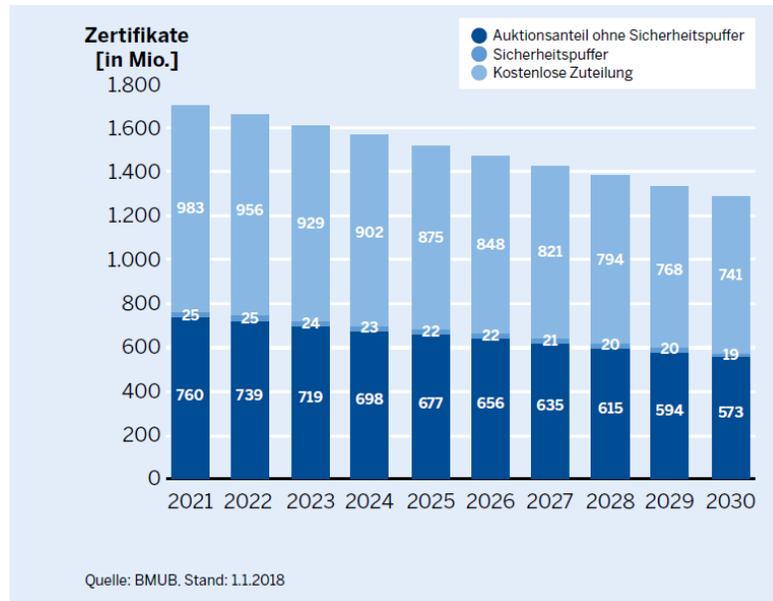


Abbildung 8: Cap-Aufteilung in der 4. Handelsperiode [48]

2.1.4. Marktstabilitätsreserve

Der in vergangenen Handelsperioden entstandene CO₂-Berechtigungenüberschuss wegen der Marktsituation (Finanzkrise und zu hoch festgelegte Obergrenze) wirkte sich negativ auf der Effizienz des EHS aus: Es führte dazu, dass eine Tonne CO₂ mehrere Jahre weniger als zehn Euro kosteten (s. Abbildung 9) [48]. Es gab keinen Anreiz, in CO₂-arme Technologien zu investieren. Die Marktstabilitätsreserve (MSR) soll dieses Problem lösen, indem 24 Prozent Zertifikate jährlich aus dem Umlauf solange entnommen und in diese Reserve überführt werden [46], bis das Maximum auf dem Markt befindenden Zertifikaten von 833 Mio. nicht erreichen wird. Steht weniger als 400 Mio. EUAs Auktionsmenge zur Verfügung, werden 100 Mio. EUAs aus der MSR zusätzlich versteigert [42]. Um den Überschussabbau auf langfristige Weise zu sichern, bleiben laut der Reform ab 2023 in der MSR so viele Rechte, wie im Vorjahr benötigt wurde – andere werden gelöscht [46].

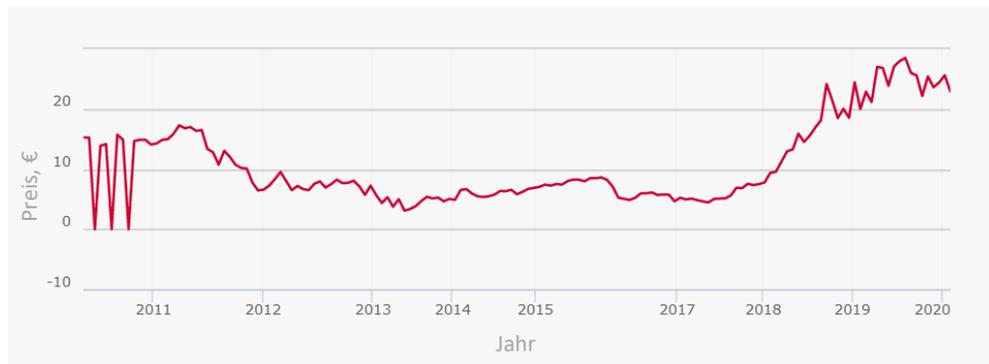


Abbildung 9: Entwicklung des CO₂-Preises [49]

2.1.5. Carbon Leakage

Für die EHS-Teilnehmer, die sich am internationalen Wettbewerb beteiligen, besteht die Gefahr zur Emissionsverlagerung in Regionen mit weniger strikter Klimaschutzpolitik – Carbon Leakage (CL). Aus diesem Grund bekommen CL-gefährdete Anlagen eine Gratiszuteilung in Höhe von 100 % des Benchmarks als die Entlastung von zusätzlichen Kosten [43]. Carbon-Leakage-Status wird durch die Multiplikation der Handelsintensität² mit der CO₂-Intensität (1) bestimmt. Das quantitative Kriterium darf nicht weniger als Schwellenwert von 0,2 sein [50]:

$$\text{Handelsintensität mit Drittländer} \cdot \text{CO}_2\text{-Intensität} \geq 0,2 \quad (2)$$

Jedoch kann das Unternehmen aufgrund entweder einer qualitativen Bewertung oder einer quantitativen Bewertung auf Produktionsebene (PRODCOM) in die CL-Liste aufgenommen werden, wenn folgende Kriterien auftreten/erfüllt sind [50]:

- Carbon-Leakage-Indikator zwischen 0,15 und 0,2;
- Emissionsintensität von mehr als 1,5;
- Berechnung der kostenlosen Zuteilung auf der Grundlage der Raffinerie-Benchmarks;
- In der Carbon-Leakage-Liste 2015-2020 für das EU-EHS auf 6- oder 8-stelliger PRODCOM aufgeführt;

Die Stromerzeuger, die alle ihre Zertifikate zukaufen müssen, geben ihre CO₂-Kosten durch die Erhöhung des Strompreises an ihre Kunden weiter und drohen damit indirekt, Carbon-Leakage-Risiko zu verursachen und Wettbewerbsfähigkeit zu verzehren. Ausgehend davon ist eine Strompreiskompensation für energieintensiven Unternehmen vorgesehen.

Zur langfristiger Minderungszielerreichung sollen in 4. Handelsperiode eingeführte Innovations- und Modernisierungsfonds beitragen. Der Innovationsfond stellt die Mittel mit einem Marktwert von 400 Millionen EUA als Förderung für Entwicklung neuer Technologien im Bereich erneuerbare Energien, Abscheidung, Speicherung und Nutzung von CO₂ sowie kohlenstoffarme Technologien

² Handelsintensität – ein Verhältnis der Summe aller Importe und Exporte von den mit nicht-EU-Ländern gehandelten Produkten zu der Gesamtgröße des EU-weites Markts inklusive Importe [38]

und Prozesse zur Verfügung [51]. Es werden unter anderem EU-weit beschränkte innovative Demonstrationsprojekte, die kommerziell noch nicht verfügbar sind, gefördert [51]. Währenddessen unterstützt der Modernisierungsfond die Mitgliedstaaten, dessen Bruttoinlandsprodukt (BIP) pro Kopf im Jahr 2013 unter 60 Prozent der Unionsdurchschnitt liegen, mit den Mitteln in Höhe von zwei Prozent der Gesamtmenge der Zertifikate bei den Projekten zur Energieeffizienzsteigerung und Modernisierung der Energiesysteme [51].

Laut betroffenen Änderungen im Rahmen der Reform lässt es sich sagen, dass der Europäische Emissionshandelssystem immer kosteneffizienter aufgebaut wird. Darauf weist der Trend der Reduktion insbesondere im emissionshandelspflichtigen Sektor: 2019 sind die Emissionen dieses Sektors in Deutschland 14 Prozent weniger als im Jahr davor geworden, während die Gesamtmindering 6,3 Prozent beträgt [52]. Die obengenannten Maßnahmen führen deutlich zu stärker Verknappung der am Markt verfügbaren CO₂-Berechtigungen und daher zu einem hohen CO₂-Preis: ab bestimmtem Zeitpunkt reichen die Zertifikate nicht aus, um gesamten Ausstoß zu decken. Dementsprechend wird es durch politische Steuerung erzielt, die energieeffiziente und kohlenstoffarme Technologien wirtschaftlich attraktiver im Vergleich zu einer Emissionskompensation mithilfe der CO₂-Bepreisung zu machen. Im Emissionshandel müssen auch andere Sektoren (Verkehr und Gebäude), klimaschädliche Gasen sowie Emittenten einbezogen werden. Hier muss man betonen, dass zurzeit nur einzelne Anlagen emissionshandelspflichtig sind, nicht ein ganzes Unternehmen, obwohl dieses sehr emissionsintensiv sein kann. Nur dann funktioniert eins der wichtigsten Instrumente der Umweltpolitik am effizientesten.

Auf dem Weg zur globalen Klimaneutralität sollen die Staatsregierungen zusammen für alle gleiche Marktbedingungen, bspw. Handel auf einem globalen Kohlenstoffmarkt oder Klimasteuer auf Importe, für eine faire Konkurrenz schaffen. Sonst leiden die Unternehmen einer nachhaltigen Produktion durch Verlust ihren Anteil auf dem Weltmarkt aufgrund höher Emissionskosten. Die Förderprogramme in kohlenstoffarme Technologien sind ein guter Schritt zur Beschleunigung der Entkopplung des THG-Ausstoßes von dem Wirtschaftswachstum. Im Rahmen des EU-EHS entsteht ein Kreislauf der Mittel: CO₂-Einnahmen der von der Europäischen Investitionsbank versteigerten Berechtigungen werden für die Entwicklung der klimafreundlichen Technologien verwendet [46]. Zukünftig müssen aber nicht nur die Pilotprojekte gefördert werden, sondern auch andere Projekte, die ein großes CO₂-Einsparungspotenzial garantieren.

2.2. Nationales Emissionshandelssystem (nEHS)

In Deutschland werden die Emissionen aus den nicht am EU-EHS teilnehmenden Sektoren – Wärme und Verkehr – im Rahmen des im Dezember 2019 neben dem Brennstoffemissionsgesetz (BEHG) [53] eingeführten nationalen Emissionshandelssystems (nEHS) bepreist [21].

Das System funktioniert nach gleichem Prinzip: „Cap & Trade“, aber im Vergleich zum EU-EHS verpflichtet nEHS nicht die Anlagebetreiber, die direkt Emissionen ausstoßen, sondern diejenigen, die klimaschädliche Brennstoffe, u. a. Benzin, Diesel, Heizöl, Erdgas, Flüssiggas und Kohle (ab 2023), auf den Markt bringen („Upstream“), beispielsweise die Brennstoffimporteure. Der CO₂-Preis bleibt

in erster Phase fixiert und steigt jährlich bis 55 Euro im Jahr 2025 (Tabelle 2). Im Jahr 2026 werden die Zertifikate in einem Preiskorridor von 55 € bis 65 € versteigert und danach bildet sich der Preis frei am Markt, falls 2025 keine Entscheidung zur Preiskorridorverlängerung getroffen wird.

Tabelle 2: Fixpreise für eine Tonne CO₂ (eigene Darstellung gem. [21])

Jahr	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Preis, €	25	30	35	45	55	55 – 65

Bei der Berichterstattung bildet sich der Compliance Cycle: Man muss für jede Handelsperiode einen Überwachungsplan erstellen, jedes Jahr einen Emissionsbericht vorlegen und für jede Tonne CO₂ eine Emissionsberechtigung abgeben. Es sind keine kostenlosen Zuteilungen vorgesehen, deswegen müssen alle Zertifikate auf dem Markt erworben werden.

Der Anreiz zur Minderung wird dadurch geschaffen, dass die emissionshandelspflichtigen Unternehmen ihre Kosten an ihren Kunden weiterreichen, die seinerseits entweder die energieeffizienten Maßnahmen treffen oder für verursachte Emissionen bezahlen sollen [21]. Betrachtet man die Industrieunternehmen, so werden sie nur dann indirekte Emissionskosten tragen, wenn sie die Brennstoffe für folgende Punkte benötigen:

- Fuhrpark
- Gebäudeheizung
- Produktionsprozesse

Dabei sind die EU-EHS-Teilnehmer von der Doppelbelastung geschützt: Inverkehrbringer dürfen bei der Abgabe die von den EU-EHS-Anlagen benutzten Brennstoffmenge ausschließen, anderenfalls können EU-emissionshandelspflichtige Anlagebesitzer bei der DEHSt einen Antrag zum Ausgleich erstellen [21].

Ausgehend davon kann man sagen, dass nur die Anlagen, die am EU-EHS nicht teilnehmen und den Brennstoff verbrauchen, mit Emissionskosten des nationalen Emissionshandels indirekt belastet werden können. In dieser Arbeit wird die Kompensation der Luftverschmutzung durch die Teilnahme am nEHS nicht untersucht, da in der zu entwickelnden Dekarbonisierungsstrategie die emissionshandelspflichtigen Anlagen im Fokus stehen.

3. PAPIERINDUSTRIE

Die Papierindustrie gehört zu den energieintensivsten Wirtschaftszweigen und ist daher ein verbindlicher Teilnehmer am EU-Emissionshandelssystem (Tätigkeit 20 und 21 nach Anhang 1 TEHG). In Deutschland steht die Papiergewerbe mit Energieverbrauch im Jahr 2018 von 260,97 TJ auf dem 5. Platz unter die energieintensivsten Industriebranchen [54].

Deutsche Papierindustrie exportiert großen Teil der Papierprodukte (im Jahr 2018 über 50 % der Gesamtproduktionsmenge) und nimmt damit den vierten Platz auf dem Weltmarkt nach China, USA und Japan [55]. Der Umsatz der Papier- und Zellstoffindustrie in Deutschland betrug im Jahr 2019 14,34 Milliarden Euro, davon liegt der Energiekostenanteil über zehn Prozent des Umsatzes [56]. Aus diesem Grund ist Papierindustrie stark von der Energiepreisentwicklung betroffen. Die rationale Nutzung der Ressourcen, wie Energie und Rohstoffe, ist hier von großer Bedeutung, da sie die Wettbewerbsfähigkeit durch Produktionskostensenkung verstärkt. Nachhaltige Konzepte sind in diesem Bereich notwendig.

Der Energieeinsatz hängt stark von der Produktionsmenge ab, die über den Zeitraum seit 2010 mit leichten Schwankungen konstant geblieben ist (s. Abbildung 10). Jedoch ist sie seit 1995 um 53 % auf 22,7 Millionen Tonnen Produkt gestiegen [57]. Damit stieg auch der Gesamtenergieeinsatz um 24 %. Diese ungleiche Veränderung ist auf gestiegene Energieeffizienz sowie Verwendung des Altpapiers als Rohstoff zurückzuführen: der Energieeinsatz pro Tonne Produktion ist von 3,3 auf 2,6 MWh/Tonne Produktion (um 19 %) gesunken. Die Emissionen pro Tonne Produktion wurden von 1995 bis 2018 um 0,35 t CO₂-Äq dank der geänderten Brennstoffeinsatz reduziert.

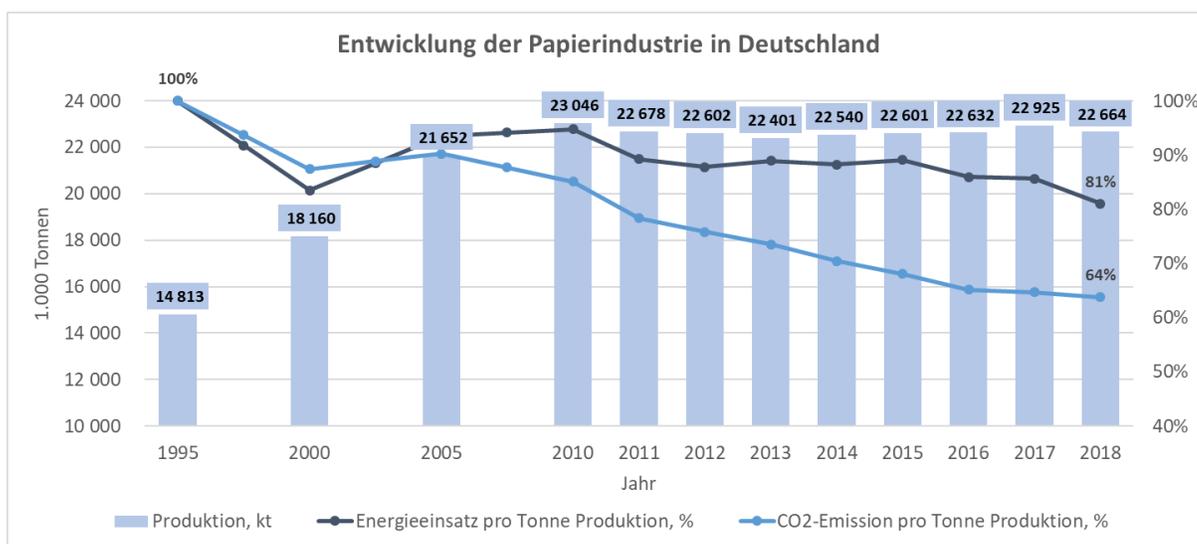


Abbildung 10: Entwicklung der Papierindustrie in Deutschland in den Jahren 1995 bis 2018 (eigene Darstellung anhand [57])

3.1. Papierherstellungsprozess

Die Papierherstellung ist ein ressourcenschonender Prozess aufgrund der Verwendung der wiederverwendeten Materialien: einerseits Holz aus nachhaltig bewirtschafteten Wäldern, andererseits Zufuhr des Altpapiers in frischen Fasern. Ausgehend davon lässt sich das Cradle-to-Cradle (C2C)³ Verfahren erfolgreich einsetzen. Allgemein teilt sich die Papierherstellung aus zwei Hauptteilen: Stoffaufbereitung und Papierherstellung in einer Papiermaschine [58], [59], [60], die im Folgenden beschrieben werden.

In erster Produktionsphase werden die Faserstoffe aus Holz und die Altpapierreste, die vorher von den Druckfarben befreit wurden, je nach Ziel der zu produzierenden Papiersorte in bestimmten Verhältnissen im Wasser aufgelöst und folgend mit chemischen Stoffen für die Verbesserung der Papierqualität und die Erhöhung der Produktivität (Dispergierung) gemischt. Diese Fasersuspension ist für die Weiterverarbeitung bereit und wird in die Papiermaschine angeliefert.

Papiermaschine ist eine große Industrieanlage bis zu 250 m lang mit einer Bandbreite bis zu 12 m, wo durch verschiedene Verfahren das Wasser entfernt wird und aus dem Stoff Papier als Fertigprodukt hergestellt wird. Diese Produktionsphase kann man noch auf weitere Produktionsschritte untergliedern (s. Abbildung 11). Die Faserstoff-Wasser-Mischung in einer Konzentration von 1:100 verteilt sich durch den Stoffauflauf gleichmäßig über die gesamte Siebbreite der Papiermaschine – Grundlage für die Blattbildung. In der Siebpartie fließt das Wasser durch das Sieb, sodass das Produkt mit einem Wassergehalt von ca. 80 % in die Pressenpartie gelangt. Da wird der große Wasserteil mechanisch ausgepresst und der Trockengehalt erhöht sich bis zum 50 – 55 %. Letztlich wird die Restfeuchte in der Trockenpartie über slalomartig gestellte Trockenzylinder mit der Temperatur bis zu 100 °C auf von fünf bis acht Prozentpunkten verdampft. Nach der Trockenpartie wird die Papierbahn mit der Restfeuchte ins Glattwerk geführt, wo die Produkteigenschaften, wie Glätte und Dichte, entsprechend den Fertigprodukterfordernissen durch die Bearbeitung der Papieroberfläche verbessert werden. Schließlich wird die Papierbahn auf große Rolle (Tambour) gewickelt.

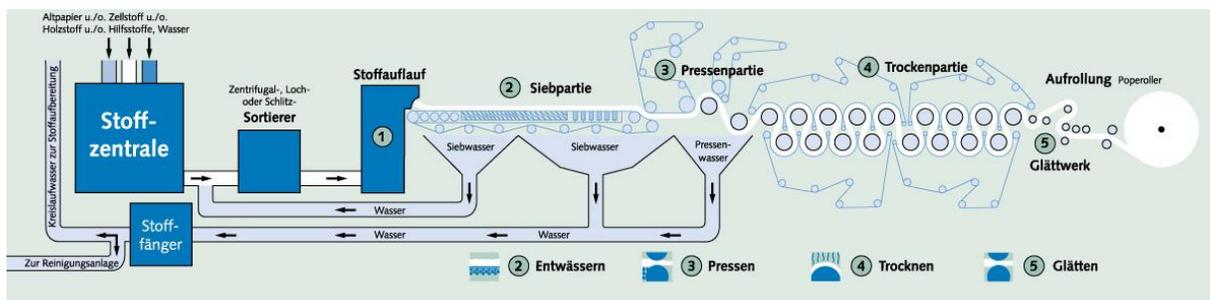


Abbildung 11: Papiermaschine: Prozessschritte zur Papierherstellung [61]

³ Durch Recycling, Rückgewinnung und Wiederverwendung geschlossenes Lebenszyklus eines Materials; – abfalllose Kreislaufwirtschaft [57]

3.2. CO₂-Fußabdruck

Um die Klimaneutralität in einem Unternehmen zu erzielen, müssen zuerst die Emissionsquellen identifiziert werden und die zusammenhängenden CO₂-Emissionen nach dem Prinzip „analysieren, reduzieren und kompensieren“ zunichtegemacht werden. Im Rahmen der CO₂-Bepreisung, steigenden Brennstoffkosten und an der Bedeutung gewinnende Klimaneutralität kommt die CO₂-Bilanz immer häufiger in Frage. Bei der Analyse des CO₂-Fußabdruckes eines Unternehmens wird die Berechnung der direkten und indirekten Treibhausgasemissionen mithilfe einer Methode basierend auf der CO₂-Bilanz verwendet – so genannte Carbon Accounting. Dies erfolgt nach dem Standard des Treibhausgas-Protokolls (Greenhouse Gas Protocol, GHGP) und die darauf aufgebauten Normen (ISO 14064) in drei Scopes [62]:

Scope 1 – Direkte Emissionen aus den Quellen innerhalb der Unternehmensgrenze. Sie sind von Unternehmen direkt kontrollierbar.

Scope 2 – Energiebedingte indirekte Emissionen, die bei der Erzeugung der zugekauften Energie entstehen, z. B. durch Energiedienstleister

Scope 3 – Indirekte Emissionen von Dritten, die im Zusammenhang mit betrachtetem System stehen, z. B. Lieferanten.

Die Ergebnisse der Bewertung dienen als Grundlage für das interne Nachhaltigkeitsmanagement und helfen die in emissionsreichen Phasen die Reduktionspotentiale entlang der Produktionslinie zu erkennen, CO₂-Profil nach den international anerkannten Standards zu erstellen und damit die wettbewerbsfähigen Vorteile im Vergleich mit gleichen Produkten aufgrund des Benchmarks zu gewinnen

In dieser Arbeit werden aber nur die energiebezogene direkte sowie indirekte Emissionsquelle untersucht (auf der Abbildung 12 farbig markiert). Die prozessbedingten Emissionen sind vernachlässigbar.

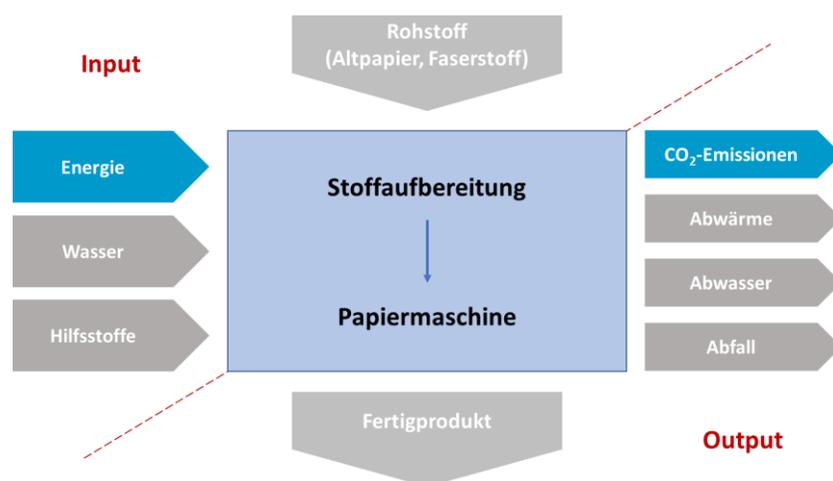


Abbildung 12: Input/Output einer Papierfabrik (eigene Darstellung)

3.3. Energieverteilung in der Papierindustrie

In der Papierindustrie ist der Energieeinsatz je nach Papiersorte unterschiedlich. Die Energieverteilung für Verpackungs- und Grafikpapier – die am meisten produzierten Papiersorten in Deutschland – sieht folgend aus: Im Durchschnitt wird 2.165 kWh Energie pro Tonne Produkt eingesetzt [58]. Davon beträgt der Wärmeanteil knapp 69 Prozent, während Stromanteil 31 Prozent ausmacht. Der größte Energieeinsatz entfällt auf die Papiermaschine, wo 72 Prozent der notwendigen Energie mithilfe der Brennstoffe gedeckt wird (s. Abbildung 13).

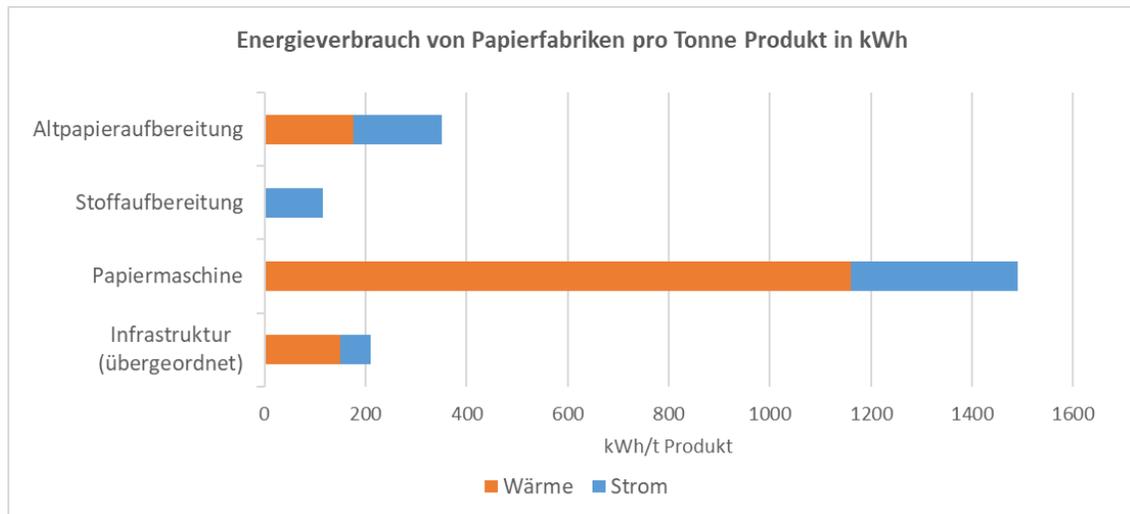


Abbildung 13: Spezifischer Energieverbrauch von Papierfabriken (eigene Darstellung auf Basis [58])

Laut der Abbildung 14, die die Energieverteilung und einer Papiermaschine verdeutlicht, benötigt die Trockenpartie mehr als die Hälfte der in der Papiermaschine verbrauchten Gesamtenergie. Dies ist auf den Dampfbedarf mit der Temperatur unterhalb 100 °C für die thermische Papiertrocknung zurückzuführen.

Aufgrund der Energieverwendung, die zum großen Teil aus den Brennstoffen, bei deren Verbrennung Treibhausgasemissionen freisetzen, gewonnen wird, ist die Papierindustrie nicht nur energieintensive, sondern auch emissionsintensive Industriebranche. Da die Papiermaschine eine massive Industrieanlage ist, die in einer Stunde 70 Tonnen Papier produzieren kann, fällt sie somit als eine emissionspflichtige Anlage nach TEHG. Aus diesem Grund stehen die Emissionsreduzierungsmöglichkeiten bei der Energieversorgung einer Papiermaschine im Fokus dieser Arbeit.

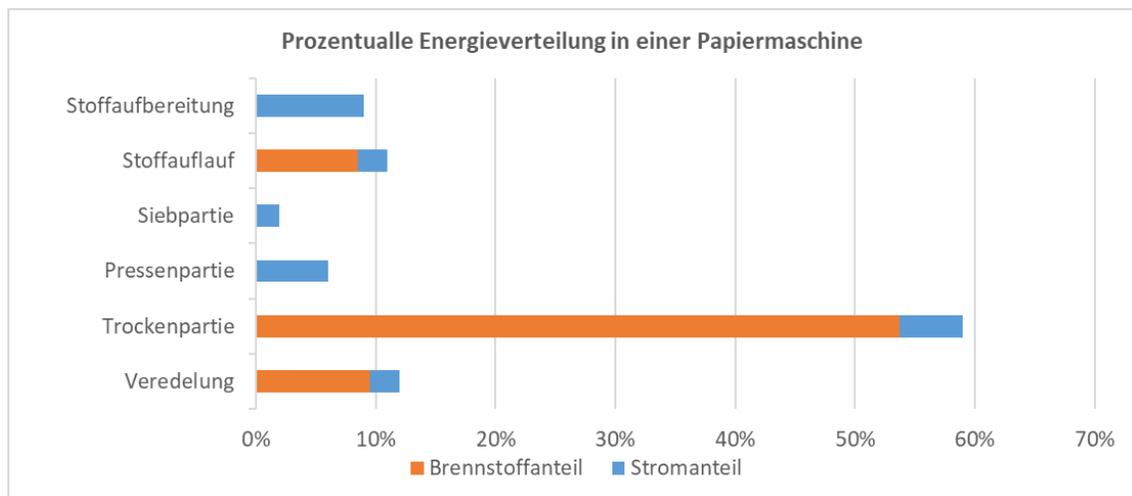


Abbildung 14: Prozentuale Energieverteilung in einer Papiermaschine (eigene Darstellung gem. [63])

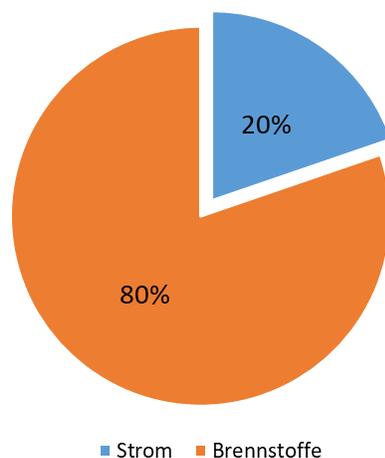
4. BESCHREIBUNG DER REFERENZFABRIK

Im Rahmen der Arbeit wird auf dem Beispiel eines Unternehmens aus der Papierindustrie mit einer Papierfabrik in Niedersachsen eine Strategie zur Minderung der CO₂-Emissionen entwickelt. Das Unternehmen an diesem Standort recycelt das Altpapier und aus dem gewonnenen Stoff produziert es Wellpappenrohpaapiere sowie WLC (White lined chipboard) für die Lebensmittelindustrie (weiter als Karton bezeichnet). Im Folgenden wird der IST-Zustand der Referenzpapierfabrik im Jahr 2016 beschrieben und ausgehend davon werden die Reduktionsmaßnahmen vorgeschlagen.

4.1. IST-Situation der Referenzfabrik

Die Fabrik verfügt zwei Papiermaschinen (PM), die zwei Produktionslinien bilden: Auf einer (PM 2) wurden im Jahr 2016 352.021 Tonnen Wellpappenrohpaaper hergestellt, auf der anderen (PM 4) – 84.051 Tonne Karton. Die dafür aufgebrauchte Energie ist auf der Abbildung 15 dargestellt. Zu den Brennstoffen zählen Erdgas (97 %), Biogas und Diesel (3 %). Der Strombedarf wird zu 50 % durch eigene Versorgung aus der Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK-Anlage) gedeckt. Man kann auch deutlich sehen, dass die Energieverbrauch direkt von der Produktionsmenge abhängig ist. Darauf weist auch der Energieeinsatz bei der PM 2 hin, der dreifach größer ist, als bei der PM 4. Der spezifische Energieeinsatz ist hingegen bei der PM 2 weniger und ergibt folgenden Wert: 1,86 MWh pro Tonne Wellpappenrohpaaper, während die Herstellung einer Tonne Karton 2,73 MWh verbraucht.

Energieverbrauch je nach Energieträger
Gesamtenergieeinsatz: 883,5 GWh



Energieverbrauch je nach Verbraucher

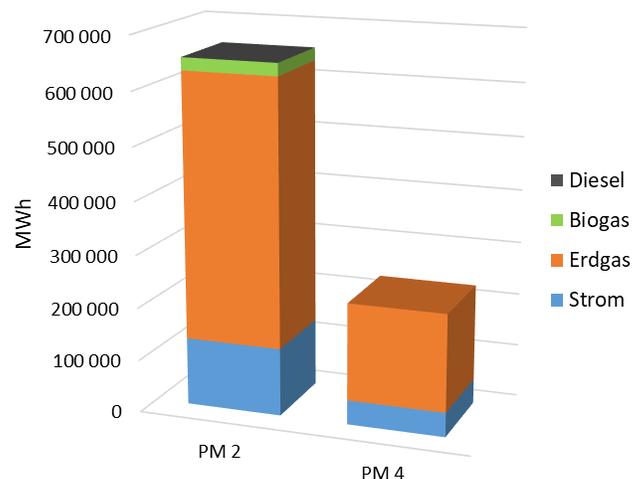


Abbildung 15: Energieverbrauch der Referenzfabrik je nach Energieträger und Verbraucher

Die Kosten für Energieverbrauch in der gesamten Fabrik betragen in der Summe 18.839.205,85 Euro. Auf der Abbildung 16 sind die Prozentanteile des Stroms, Erdgas und Biogas

(Literaturwert [64]) an der gesamten Energiekostenrechnung dargestellt. Die Kosten für Diesel sind im Vergleich zu anderen Energiekosten sehr gering. Aus diesem Grund sind sie ausgeschlossen. Hier muss man besonders hervorgehoben, dass die Stromkosten sich auf Fremdstromverbrauch beziehen. Die Kosten für Eigenstromerzeugung sind im Erdgasanteil eingepreist, da KWK-Anlage mit Erdgas fährt.

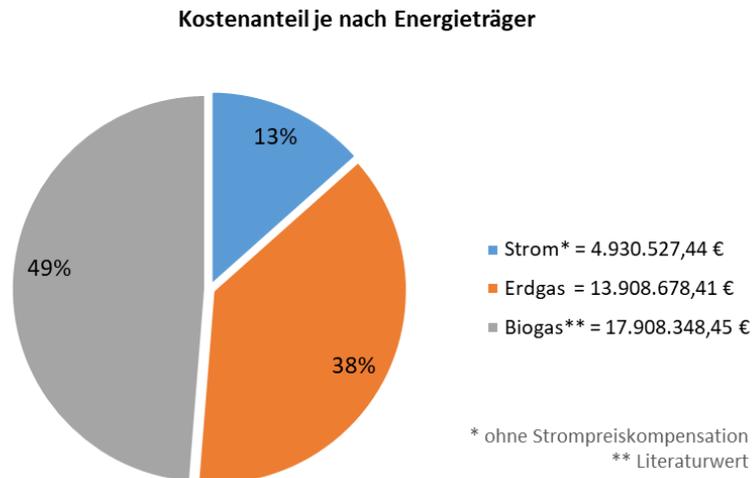


Abbildung 16: Kostenanteil je nach Energieträger

Um eine Doppelberechnung zu vermeiden, wird die Eigenstromversorgung mithilfe einer KWK-Anlage in der Systemgrenze in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Die Emissionen werden in Bezug auf Einsatz Brennstoffen und Fremdstrom in den Papiermaschinen bilanziert, die am EU-EHS teilnehmen. Dabei ist Biogas aufgrund seiner nachhaltigen Herkunft aus der Emissionsrechnung ausgeschlossen. Darauf basierend illustriert die Abbildung 17 die Zusammenfassung des IST-Standes gegenüber der aus Papiermaschinen stammenden Emissionen von Gesamtenergieverbrauch von 774,16 MWh.

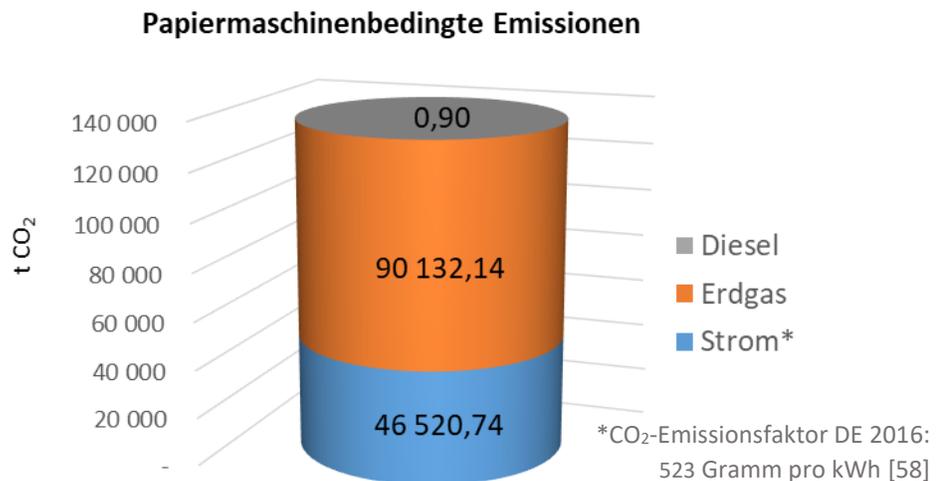


Abbildung 17: Papiermaschinebedingte Emissionen

4.2. Teilnahme am Europäischen Emissionshandel

In diesem Kapitel werden die Teilnahmebedingungen am EU-EHS näher betrachtet. Umgerechnet auf Tagesproduktionsmenge stellen die beiden Papiermaschinen über 20 Tonnen Produkt pro Tag her. Dementsprechend gelten sie als emissionshandelspflichtige Anlagen gemäß dem TEHG. Der überwiegende Anteil der fossilen Brennstoffe als eingesetzte Energieträger trägt die Verantwortung für die ausgestoßenen Emissionen. Es ist wichtig zu betonen, dass die Fabrik im internationalen Wettbewerb steht, wodurch das Risiko von Carbon Leakage besteht. Aus diesem Grund hat man das Recht die kostenlosen Zuteilungen in Höhe von 100 % anhand des Benchmarks zu erhalten.

Die unten beigefügten Diagramme bilden die Teilnahme der Produktionsanlagen am EU-EHS ab. Auf der Abbildung 18 kann man deutlich sehen, dass die Emissionen weiter steigen, während der kostenlos zugeteilten Zertifikate immer weniger werden. Bei der Hochrechnung bleibt der Ausstoß stabil bis zum Ende der Handelsperiode. Nichtsdestotrotz liegen die Werte über denen vom Staat zur Verfügung gestellten Zertifikaten. Die schwankenden Zuteilungen sind darauf zurückzuführen, dass die Produktion bzw. Kapazität sich um 10 % geändert haben. Im Durchschnitt überschritten die Emissionen um 10.421 t/a im Zeitraum von 2013 bis 2016.

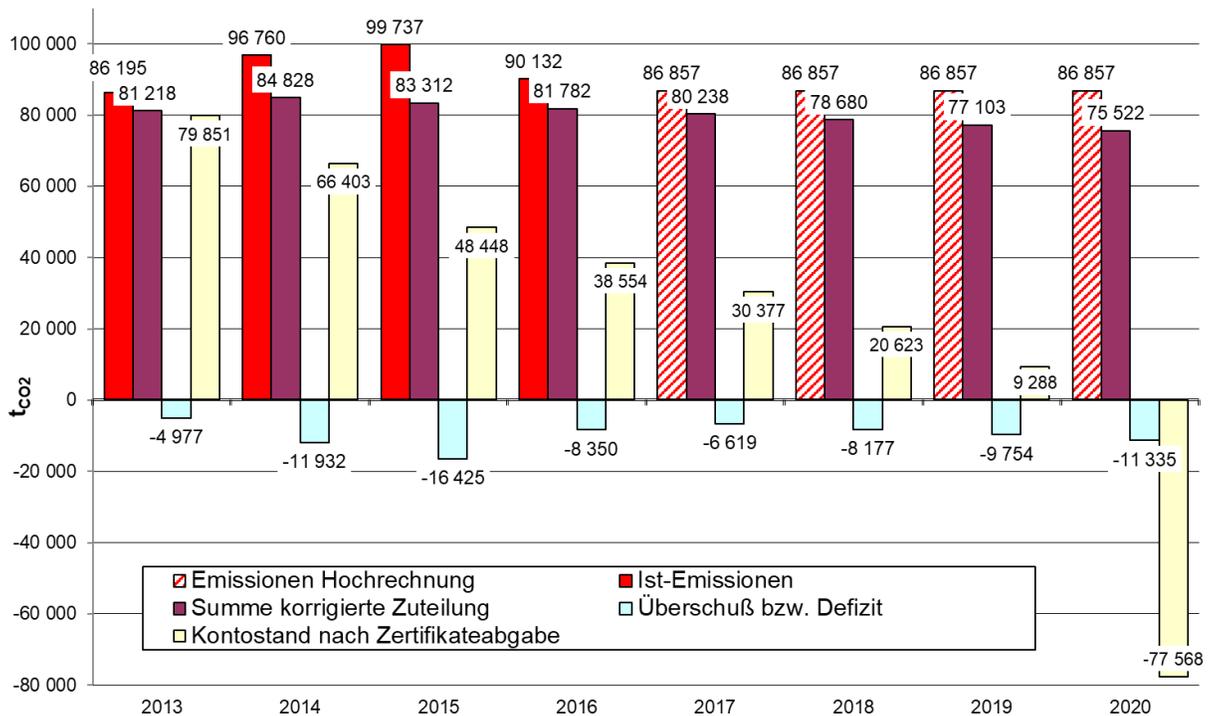


Abbildung 18: Übersicht der CO₂-Emissionen der PM 2 in 3. Handelsperiode

Die Abbildung 19 stellt die Übersicht der CO₂-Emissionen für PM 4 dar. Was auffällig ist, dass die Abweichung der Hochrechnung von der Zuteilungsmengen im Vergleich zu PM 2 höher ist. Daher folgt, dass man für diese Anlage mehr Zertifikate am Markt erwerben muss, wobei diese die Produktionskosten beeinflussen werden können. Der Unterschied von den Überschüssen zwischen PM 2 und PM 4 liegt bei 5.926 t CO₂.

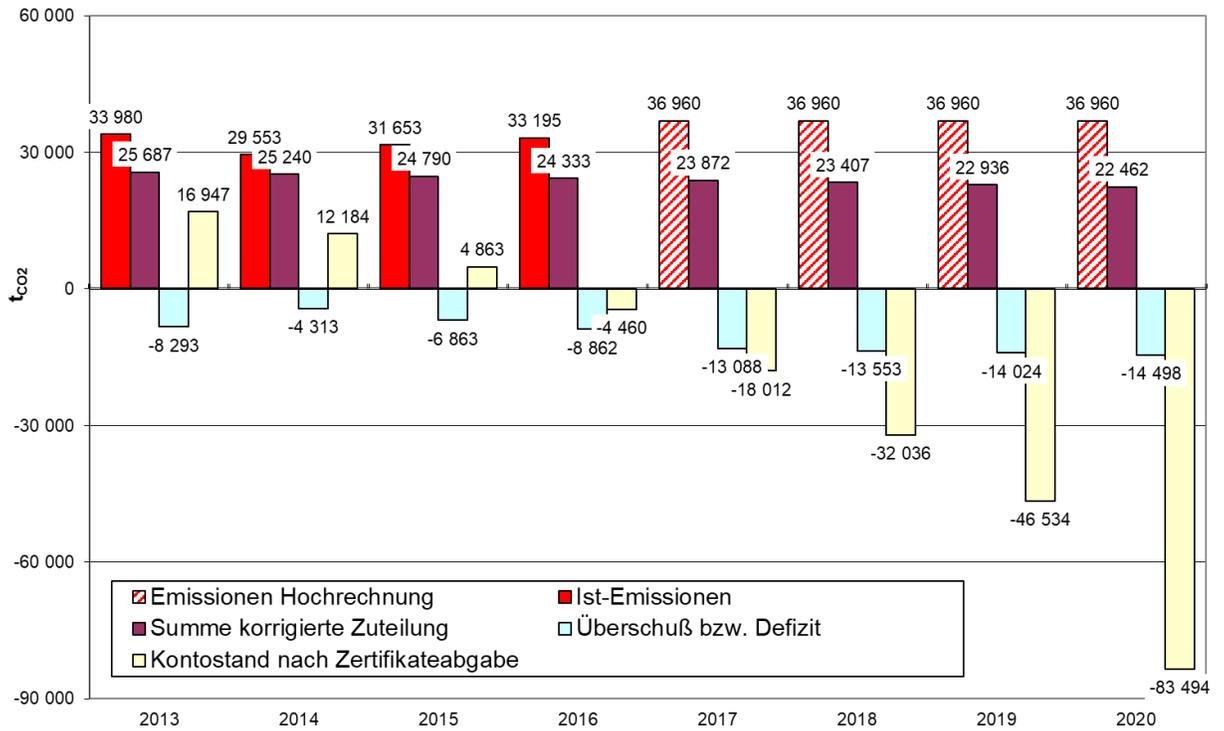


Abbildung 19: Übersicht der CO₂-Emissionen der PM 4

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Papiermaschinen mit den Produkt-Emissionswerten von 0,256 t CO₂/t Wellpappenrohpaper bzw. 0,395 t CO₂ pro Tonne Karton nicht zu effizientesten Anlagen anhand des Benchmarks gehören. Für die 3. Handelsperiode sind keine emissionsreduzierenden Maßnahmen vorgesehen.

5. ROADMAP

Laut dem im Kapitel 3.2. genannten Prinzip der Emissionsminderung folgt nach der Analyse der Punkt „Reduzieren“. Den Weg zur Klimaneutralität kann man in vier Stufen darstellen. Diese sind auf der Abbildung 20 gezeigt: Von einfachen Maßnahmen bis zu diesen, die hohe Investitionen fordern. Zunächst über den Inhalt und die Höhe des CO₂-Einsparungspotentials, aufbauend auf den Daten aus dem Kapitel 4, und die dann über die Durchführbarkeit in der Referenzfabrik. Zum Schluss wird die Analyse von möglichen Szenarien durchgeführt. Es wird angenommen, dass die Verteilung der eingesetzten Brennstoffe unverändert bleibt. Die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird nicht berücksichtigt.

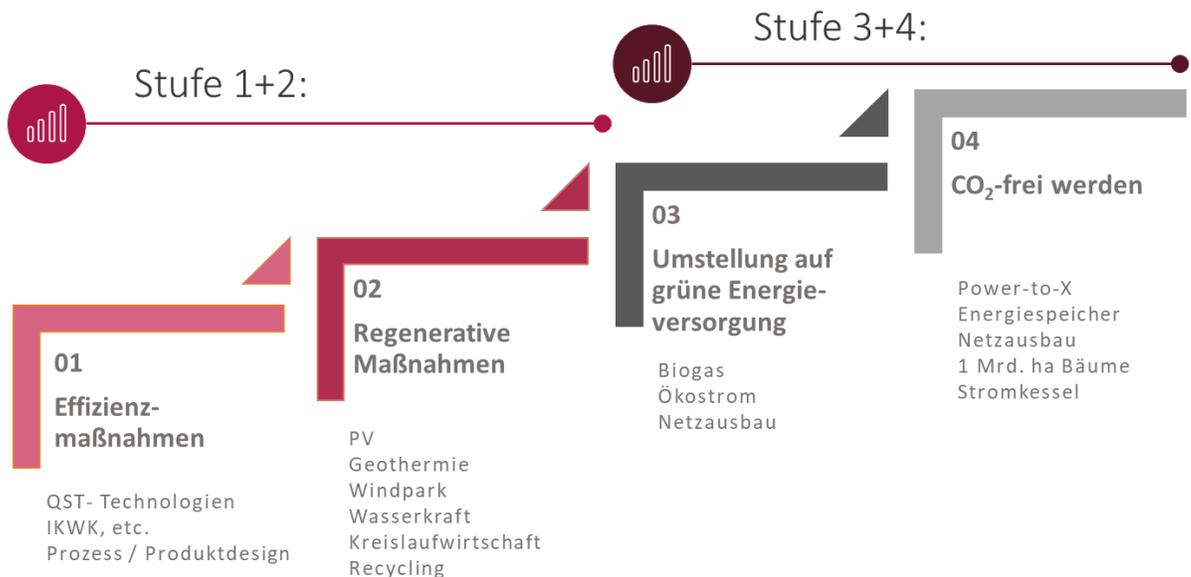


Abbildung 20: Der Weg zur Klimaneutralität

5.1. Effizienzmaßnahmen

Die erste Stufe „Effizienzmaßnahmen“ umfasst das Einsparungspotential durch die Energieeffizienzsteigerung. Die Maßnahmen, wie Abwärmenutzung durch die integrierte Wärmerückgewinnungsanlage (WRG-Anlage), Einsetzung der innovativen Technologieprozesse und Prozesselektifizierung, führen zu einer Senkung des Verbrauchs an fossilen Brennstoffen. Dabei wird die Produktionskapazität nicht gefährdet, was vorteilhaft für den Wettbewerb ist.

Grundsätzlich weist die Verwendung innovativer Technologien im Trocknungspartie den wesentlichen Ansatzpunkt auf. Dieser Prozess ist besonders energieaufwendig, deswegen entstehen da hohe Einsparpotentiale. In den Studien [63] und [65] sind die energieeffizienten Maßnahmen mit ihren Einsparpotenzialen beschrieben. Davon werden nur diejenigen Maßnahmen ausgewählt, die einen Anwendungsfaktor über 50 Prozent haben sowie bei der Altpapieraufbereitung und der Papiermaschine anwendbar sind, und in der Tabelle 3 zusammenfassend dargestellt. Das

untersuchende Unternehmen hat das Energiemanagementsystem ISO 50001 eingesetzt. Im Rahmen dieses Systems besteht die Pflicht, ständig die Energieeffizienz zu verbessern. Es wird aufgrund der schlechten Verfügbarkeit von Daten davon ausgegangen, dass unten beschriebene Maßnahmen bis jetzt noch keinen Einsatz gefunden haben.

Tabelle 3: CO₂-Minderungsmaßnahmen in 1. Stufe gem. [63], [65]

Produktionsbereich	Maßnahme	kurze Beschreibung	Spez. Einsparpotential, kWh/t Produkt	
			Wärme	Strom
Altpapier	Hochkonsistenzstoffauflösung	Eine Erhöhung der Stoffdichte		7
	Effiziente Siebung	Abscheideleistung durch Dichteerhöhung sowie durch die Nutzung von Siebkörben		12
	Wärmerückgewinnung von der Bleiche	Abwärmerückgewinnung aus dem Abwasser mithilfe eines Wärmetauschers für Frischwasseraufheizen	8	
	Optimierung Deinking-Verfahren	bessere Regulierung der Pumpen sowie Reduzierung der Flussgeschwindigkeit der Suspension		14
	Effiziente Disperger	Ersatz der alten Disperger durch moderne Technik		6
Papiermaschine	Refinerkonzept	Reduzierung der Leerlaufverluste		Ø 27
	Chemische Fasermodifikation	Chemische Behandlung der Faser	51	46
	Neue Trocknungsverfahren	Konzepte zur effizienten Trocknung, bspw. die Impulstrocknung, die Dampf-/Pralltrocknung und die Kondensationsband-Trocknung	183	
	Abwärmenutzung	Abwärmenutzung in der Trockenpartie von den Refinern und des Mahlens; die Nutzung von Niedertemperaturwärme	298	

In der Summe werden durch oben beschriebenen Maßnahmen 13 % Brennstoffe bzw. 21 % Strom eingespart. Das ergibt eine CO₂-Reduktion um 21.860 t CO₂-Äq. Nimmt man die Querschnittstechnologien, wie z. B. Ersatz von Motoren, Pumpen und Ventilatoren, in der Analyse an, ist der Einsparpotential deutlich höher.

5.2. Regenerative Maßnahmen

Dieser Schritt umfasst die Möglichkeiten, den Energiebedarf durch eigene Energieerzeugung mittels der Photovoltaikanlagen (PVA), der Solarkollektoren oder des eigenen Windparks zu decken. In der Papierindustrie gibt es auch die Option der Energiegewinnung durch die Verbrennung der Reststoffe (Rejekte) oder der Produktabfälle.

Die im Fokus dieser Arbeit stehende Papierfabrik verfügt über ein Dach mit der Fläche von ca. 3.500 m² (gemessen mit Google Maps). Wie die Abbildung 21 illustriert, ist das Dach leer, sodass man es als potentialer Grund für Aufbau der PVA betrachten kann. Die typischen PV-Modulen mit

60 Zellen sind 1.650 x 992 mm ($\approx 2 \text{ m}^2$ inklusive Abstände dazwischen) groß und ergeben die Peakleistung von ca. 280 W_p. Nimmt man die Fläche von eines Solar-Panels als 2 m² inklusive Montageabstände dazwischen an, so passen über 1.500 Module auf dem Dach, die über 400 kW_p Gesamtleistung haben.

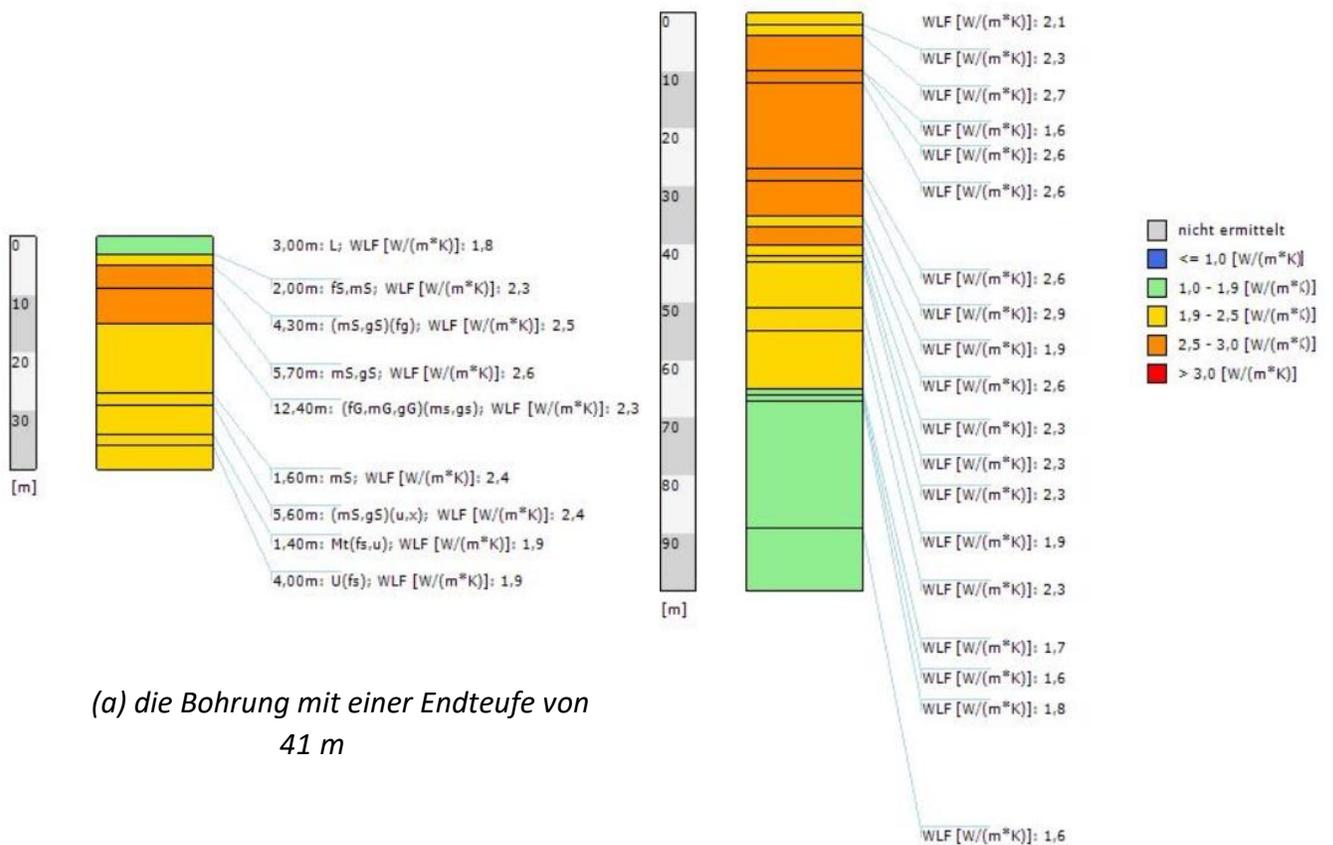


Abbildung 21: Das Dach der Referenzfabrik [Quelle: Google Maps]

Laut den Daten von Global Solar Atlas [66] beträgt die tägliche spezifische Output-Leistung einer PVA auf Basis der Sonneneinstrahlung in Niedersachsen durchschn. 2,8 kWh pro Kilowatt installierte Peakleistung. Dementsprechend können 1.500 PV-Modulen ca. 430 MWh/a Strom erzeugen. Für 1 kW installierte Leistung fallen die Investitionskosten in Höhe von 1.000 Euro an [67].

Einerseits werden durch diese Maßnahme weitere Einsparungen von eingesetzter Energie sowie von den CO₂-Emissionen erzielt, andererseits ist die Anlage wetterabhängig und damit auch nicht flexibel, d. h. sie liefert die Energie nicht dann, wenn man sie benötigt, sondern, wenn die Wetterbedingungen für Energieerzeugung geeignet sind [68]. Um die erzeugte Energie selbst zu benutzen, statt sie ins öffentliche Netz einzuspeisen, ist ein Speicher erforderlich. Hier lässt sich sowohl ein Batteriespeicher als auch ein Wärmespeicher einsetzen, da Strom als Energieträger an sich in jede Energie umwandelbar ist. Die aus der elektrischen Energie erzeugte Wärme kann man auch in der Erde speichern, um später den Wärmebedarf zu decken. Laut den Daten von Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz [69] befindet sich die Papierfabrik im geeigneten Raum für Erdwärmekollektoren für eine einbautiefe 1,2 – 1,5 m, wo Geothermie als Wärmespeicher mit der Wärmeentzugsleistung in Bereich von 20 bis 30 W/m² eingesetzt werden kann. Darüber hinaus gibt es neben der Fabrik zwei Bohrungen. Der wichtigste Koeffizient ist dabei die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ , die das Vermögen des Stoffs beschreibt, die thermische Energie in Form von Wärme zu transportieren [70]. Mit einer durchschn. spezifischen Wärmeleitfähigkeit im

oberflächennahen Bereich von $2,3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ fallen beide Bohrungen unter der Kategorie *Erdwärmernutzung durch Erdwärmesonden bedingt zulässig*. Die detaillierte Information darüber stellt die Abbildung 22 dar. Damit ist nachgewiesen, dass es ein Potenzial zur Nutzung der Geothermie gibt. Für die Betrachtung der Einsparmöglichkeiten durch Geothermie ist eine ausführliche Analyse des Standortes erforderlich.



Verbrennung. Dieses Energienutzungsverfahren zählt zu den kombinierten Maßnahmen mit einem höheren Einsparpotenzial – von 165 kWh/t Produkt [58].

Demgemäß kann nach der Betrachtung dieser Stufe die Einsparung einerseits durch PVA, andererseits durch Wiederverwendung von Abfällen in Höhe von 6 % Brennstoffe und 8 % Strom erzielt werden.

5.3. Umstellung auf grüne Energieversorgung

Die Emissionen können nicht nur durch die Optimierung des Energiebedarfs und die Erweiterung eigener Energieversorgung reduziert werden, sondern auch durch die Maßnahmen außerhalb der Unternehmensgrenze. Darunter kann der Zukauf von grüner Energie, wie Biogas und Ökostrom, genannt werden. Die komplette Umstellung auf grüne Energieversorgung kann das Ziel der Klimaneutralität erreichen. Die Frage ist, ob die umweltfreundliche Energieerzeugung für alle ausreicht und ob es wirtschaftlich attraktiv wird. Besonders ohne die weitere Entwicklung der erneuerbaren Energien ist zu erwarten, dass die Energiepreise mit der Nachfrage steigen werden.

Die Nutzung der Biomasse als Alternative zu Erdgas findet am effektivsten die Verwendung zur Bereitstellung der Nieder- und Mitteltemperaturwärme [72]. Dies ist aber eine Übergangsschritt, weil für die Herstellung von Biogas in gleicher Menge als Erdgasverbrauch der Referenzfabrik (685 207 148 kWh – 13 % Minderungspotenziale durch die energieeffiziente Maßnahmen = 596 130 218,76 kWh) große Anbaufläche notwendig ist (die Berechnungsdaten sind in der Tabelle 4 abgebildet). Es lässt sich sagen, dass die Biomasse nur begrenzt zur Verfügung steht.

Darüber hinaus weist die Preisentwicklung der biogenen Brennstoffe, die im Jahr 2050 nach der Prognose des Instituts für angewandte Ökologie [64] deutlich teurer als Erdgas sind, daraufhin, dass die Verwendung weder von Biogas noch Holzhackschnitzel gegenüber dem Erdgas in der Zukunft wirtschaftlich unattraktiv seien (s. Abbildung 23).

Tabelle 4: Grundlagen für die Berechnung der Produktion von Biogas aus Mais auf Basis [73]

Energiebedarf, kWh	596 130 218,76
Fläche Deutschland, ha	35 738 600
Biogas Energiegehalt, kWh/m ³	5,5
Durchschnittlicher Methangehalt, %	55
Durchschnittlicher ha – Ertrag Mais, t/ha Frischmasse (FM)	40
Durchschnittlicher Biogasertrag je t/FM, m ³	170
Biogasproduktion, m ³ /ha	6800
Biogasbedarf, m ³	108 387 312,50
Maisanbaufläche, ha	15 939,31
Anteil Deutschlandfläche, %	0,045

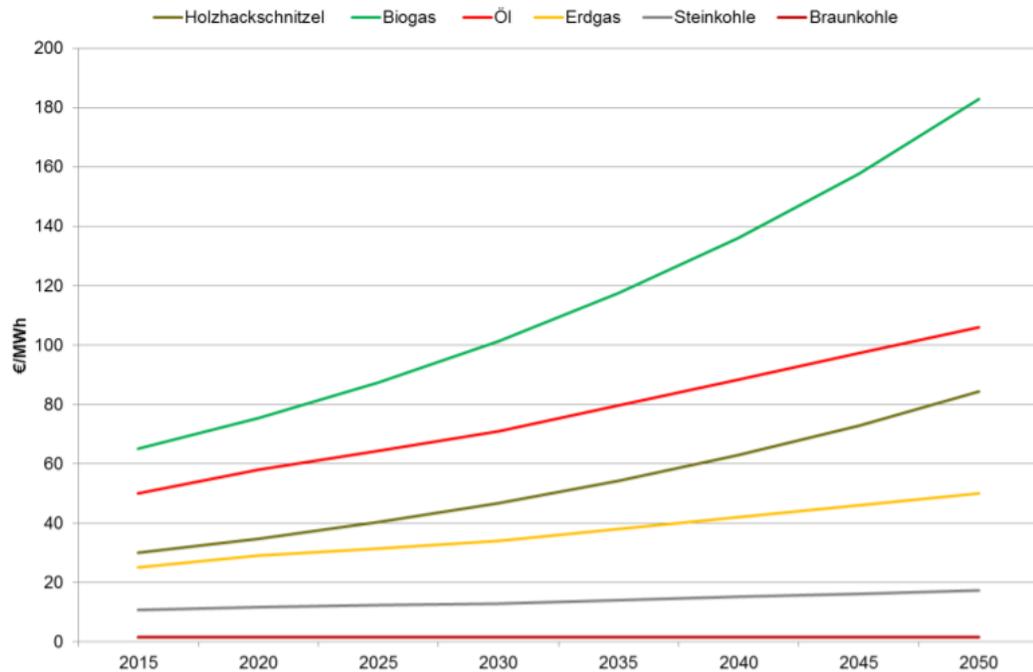


Abbildung 23: Brennstoffkosten für Energieträger zur Stromerzeugung frei Kraftwerk [64]

Die CO₂-Emissionen, die aus der Energiewirtschaft stammen, kann man durch den Zukauf von Ökostrom vermeiden. Nach den Angaben aus einer Greenpeace-Energy-Studie [74] liefern die Windkraftanlagen die Hälfte von EE ins öffentliche Netz. Daher bietet die Windenergie im Jahr 2030 für eine Kilowattstunde Strom günstigere Preise (6,9 – 7,7 Cent) gegenüber den durchschnittlichen Ökostromkosten (8,1 – 9,0 Ct/kWh) an. Es wird berücksichtigt, dass das Angebot an EE-Technologien durch die Lerneffekte günstiger wird und zur Reduktion Kapitalkosten und damit auch spezifischen Stromkosten führen, deswegen gibt es die Unterschiede zwischen den Stromkosten aus Bestandsanlagen und Neuanlagen. Die konventionelle Stromerzeugung ist stark von Brennstoffkosten und CO₂-Preise beeinflusst und damit liegen ihre Kosten im Jahr 2030 bei 11,2 Ct/kWh. Die Kostendifferenz wird immer höher und erreicht 2050 den Unterschied von 5 – 6 Ct/kWh.

Auf niedrige Preise weist eine weitere Modellierungsstudie von der LUT University und der Energy Watch Group hin [75]: Vollständig nachhaltigen Energiesysteme können im Jahr 2050 kostengünstigere Energie mit einem Preis von 5 – 6 Ct/kWh europaweit zur Verfügung stellen. Das ist eine große Herausforderung für die Energiewirtschaft, die das Hauptziel hat, die störungslose Energieversorgung zu gewährleisten. Um dies zu ermöglichen und dabei auch die Klimaziele einzuhalten, muss die Entwicklung der EE und deren Ausbau ambitioniert vorangetrieben werden.

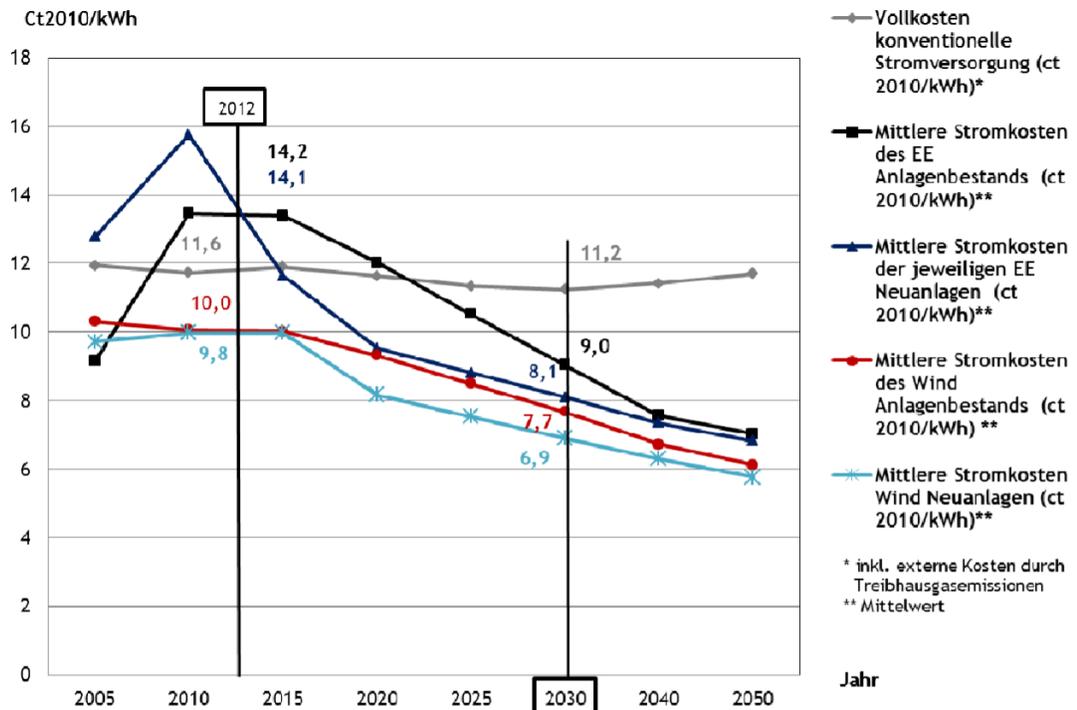


Abbildung 24: Verlauf der Stromgestehungskosten von EE-Anlagen und der Vollkosten einer konventionellen Stromversorgung [74]

5.4. CO₂-frei werden

Die Dekarbonisierung des Unternehmens wird teilweise durch die Emissionskompensation geschafft. Es besteht die Möglichkeit, in Forschung und Entwicklung der kohlenstoffarmen Technologien zu investieren, die Aufforstung zu steuern oder die nachhaltige Klimaschutzprojekte finanziell zu unterstützen.

Die Investitionen in eine Power-to-X-Anlage (PtX) scheinen sinnvoll zu sein, da die Anlage schon erprobt wurde und gute Ergebnisse gezeigt hat [76]. Ihre Funktionsweise basiert auf der Elektrolyse, wodurch es den überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energiequellen dauerhaft speichern kann. Wasser wird mit Hilfe von elektrischer Energie in Wasserstoff gegebenenfalls in Methan (s. Abbildung 25) umgewandelt. Als Energieträger ist er klimafreundlich im Vergleich zu fossilen Brennstoffen, weil bei der Verbrennung keine Abgase entstehen. Daher stellt die PtX-Anlage großen Einsparpotenzial dar. Der Nachteil ist die Speicherung von Wasserstoff: Die Reaktion mit Sauerstoff kann explosiv sein, deswegen sind noch die zusätzlichen Maßnahmen zur Arbeitsschutztechnik erforderlich.

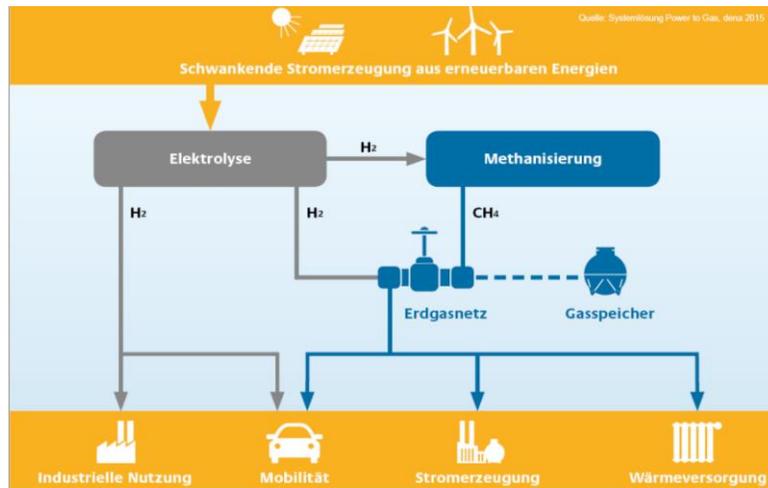


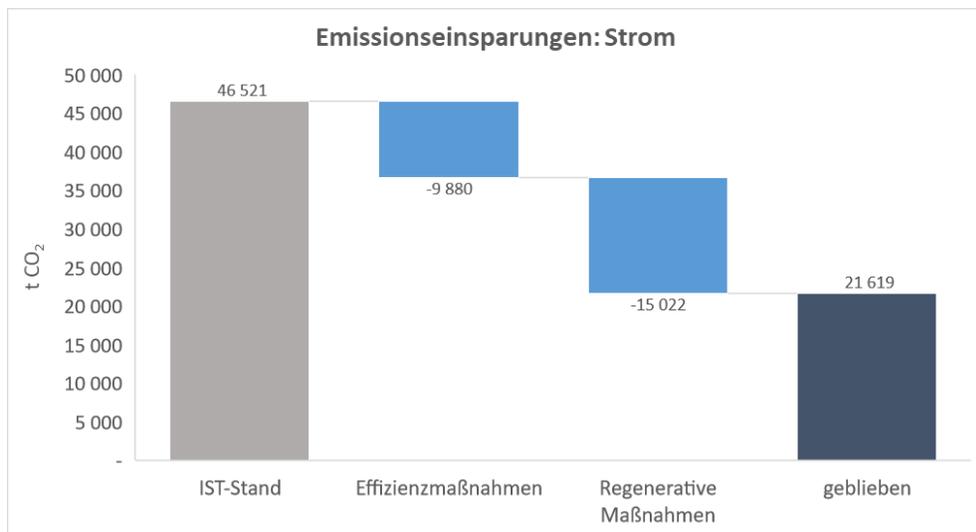
Abbildung 25: Anwendungsfelder Power-to-Gas [77]

Die PtX-Technologie ist sicher ein Zukunftsthema. Zurzeit liegen die Kosten für 1 kW installierte Leistung bei 1.000 Euro, dabei machen die Gestehungskosten 3,70 – 5,12 €/kg Wasserstoff aus, die auch stark von Strombezugskosten abhängig sind [76]. Es ist zu erwarten, dass die Anlage ab dem Jahr 2030 mehr Kostenvorteile mit sich bringt. Dafür ist intensive Technologieweiterentwicklung schnellstmöglich notwendig.

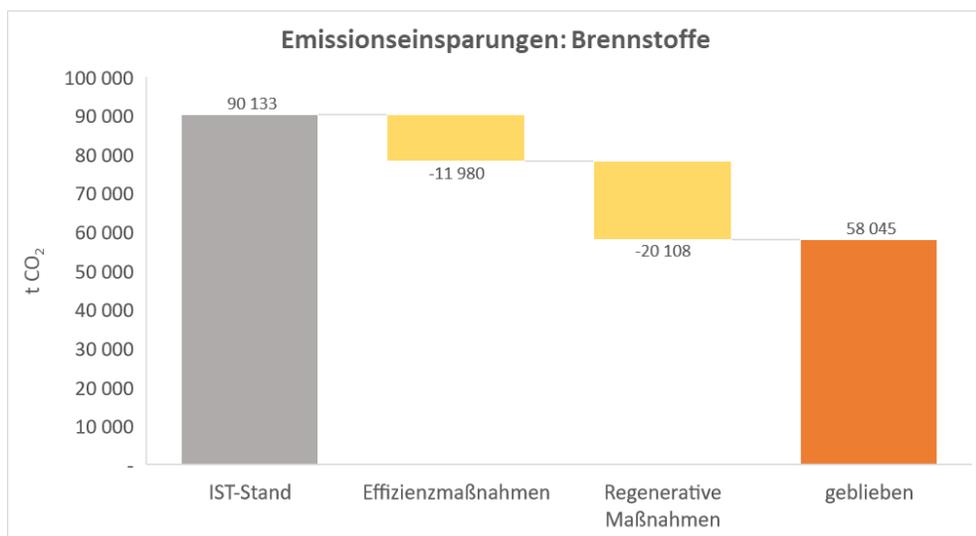
5.5. Ergebnisse

Nachdem ein Überblick auf die Schritte zur Dekarbonisierung gegeben wurden, wird auf Basis der Bewertung eine Strategie zur Reduzierung energiebedingter Emissionen entwickelt. Die Auswirkung der CO₂-Minderungsmaßnahmen durch Schritte 1 und 2 sind auf der Abbildung 26 dargestellt. Diese Maßnahmen leisten einen Beitrag zu der Reduzierung der Notwendigkeit, für die verursachten Emissionen weitere Zertifikate auf dem Markt zu erwerben, aufgrund des gesunkenen gesamten Energiebedarfes des Unternehmens. Ausgehend davon ist es empfehlenswert, Schritte 1 und 2 in erster Linie zu verfolgen, da sie sich am kosteneffizientesten umsetzen lassen.

Sobald es keine internen Ansatzpunkte mehr gibt, kann man die Emissionen durch die weitere Umstellung auf nachhaltige Energieträger senken. Die nicht zu vermeidenden Emissionen können durch die Investitionen und den Zukauf von Emissionsrechten kompensiert werden. Daraus lassen sich zwei verschiedene Wege bilden, die sich dadurch unterscheiden, dass nach dem ersten Szenario (2030) das Ziel schneller erreicht werden kann. Das zweite Szenario (2050) zeigt einen aufwendigen Weg mit niedrigen Investitionskosten (s. Abbildung 27).



(a) Emissionseinsparungen im Bereich Strom



(b) Emissionseinsparungen im Bereich Brennstoffe

Abbildung 26: Einsparungen durch den Einsatz der Effizienz- und Regenerativen Maßnahmen

Das Szenario 2030 umfasst die Umstellung der Energieversorgung auf Ökostrom. Dabei sind aber hohe Investitionen erforderlich, weil zurzeit grüner Strom noch keine Kostenvorteile mit sich bringt. Das Szenario 2050 stellt die Möglichkeit dar, in eine PtX-Anlage investieren und damit den technologischen Erfolg zu beschleunigen. Die dargestellten Pfade lassen die Reduktion auf ca. 8.000 t CO₂ erreichen. Weder Szenario 2030 noch Szenario 2050 können hohe Treffsicherheit leisten, da in beiden Fällen ein weiterer Forschungsbedarf besteht. Es ist noch nicht geklärt, ob die Energiewirtschaft den Ökostrom in guter Qualität ohne Ausfälle zur Verfügung stellen kann und ob der Technologiestand in der Zukunft ein Niveau erreicht, um die konventionellen Anlagen komplett zu ersetzen.

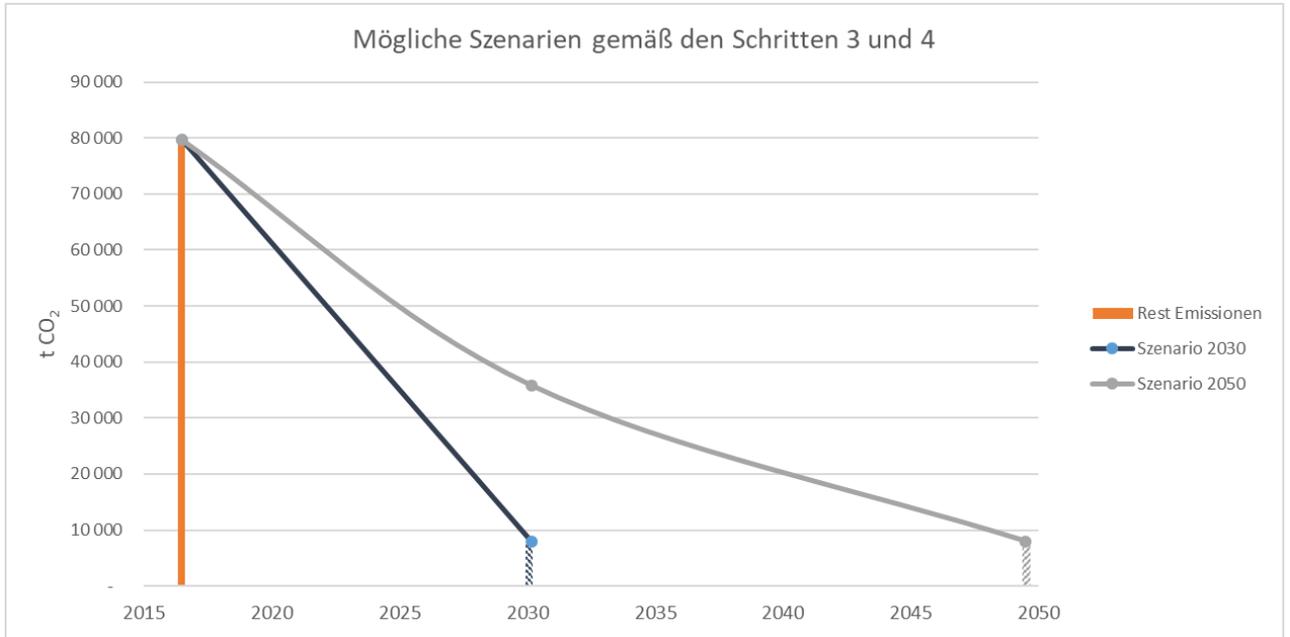


Abbildung 27: Mögliche Reduktionsszenarien basierend auf Schritte 3 und 4

ZUSAMMENFASSUNG

Die politischen Entwicklungen und die verabschiedeten Gesetze haben eine gute Basis im Klimaschutzbereich für die Umsetzungen von verschiedenen klimaorientierten Programmen geschaffen. Jedoch mangelt es noch an der erfolgreichen Implementierung, um das 2 °C Ziel oder sogar eine Klimaneutralität zu erreichen. Die Einführung des Kohlenstoffmarktes hat bis jetzt positive Wirkungen aufgezeigt und gilt damit als ein effizientes Instrument der Umweltpolitik. Nach der Reform 2018 ist folgende Tendenz zu erwarten: Die Menge der im Umlauf befindenden Zertifikaten wird jährlich verknappt und der Preis wird bei einer steigenden Nachfrage immer teurer. Es führt dazu, dass es ab bestimmtem Zeitpunkt keine verfügbaren Zertifikate mehr auf dem Markt gibt. Es muss gesagt werden, dass der Emissionshandel keine sichere Lösung bei der Bekämpfung des Klimawandels ist, sondern lediglich kosteneffiziente Anreize schafft, um den Einsatz von kohlenstoffarmen Technologien zu beschleunigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein energie- und emissionsintensiver Wirtschaftszweig basierend auf den Daten von einer bestehenden Papierfabrik analysiert. Der Papierherstellungsprozess und dafür verbrauchte Energie von zwei verfügbaren Papiermaschinen wurden näher betrachtet. Auf Basis der energiebedingten Emissionen wurden klimafreundliche Maßnahmen vorgeschlagen. Es ist zu empfehlen, erst interne Maßnahmen zu der Verbesserung der Energieeffizienz und der Integration von regenerativen Energiequellen zu treffen. Diese haben nach der Erfahrung eine Amortisationszeit von bis zu 10 Jahre. Darüber hinaus kann dadurch mit einer Gesamtemissionseinsparung um ca. 40 % erwartet werden. Mit der Senkung des Energiebedarfs, besonders von fossilen Brennstoffen, reduziert sich auch die Notwendigkeit, die Emissionen durch eine CO₂-Abgabe zu kompensieren, deswegen haben kohlenstoffneutrale Unternehmen Wettbewerbsvorteile. Zurzeit ist es schwer, die Rentabilität von Investitionen und ihre Menge einzuschätzen, weil noch keine Benchmarks festgelegt wurden. Für eine genaue Wirtschaftlichkeitsrechnung besteht weiterer Forschungsbedarf.

Zusammenfassend lässt es sich sagen, dass die Dekarbonisierung neben Chancen auch die Herausforderungen mit sich bringt. Heutzutage gibt es noch keine auf dem Markt verfügbare Technologien, die konventionelle Anlagen komplett ersetzen könnten. Der Staat muss Bedingungen schaffen, wie z. B. Förderprogramme oder Zusammenarbeit zwischen Produktionsunternehmen, Anlagenherstellern und Forschungszentren organisieren, um den Anreiz zu steigern, in die kohlenstoffarmen Technologien, Forschung und Entwicklung zu investieren. Die Marktteilnehmer aufgrund der hohen Unsicherheit sind nicht dafür bereit, hohe Geldsumme für nicht lukrative Maßnahmen auszugeben.

LITERATURVERZEICHNIS

1. Die Klimakonferenz in Paris. BMU. 5. September 2017. [Online] Zugegriffen am 3. April 2020 über <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/pariser-abkommen/>.
2. Der Europäische Emissionshandel. UBA. 26. Juli 2019. [online] Zugegriffen am 9. Mai 2020 über <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>.
3. Erste Weltklimakonferenz in Genf. Deutschlandfunk. 12. Februar 2019. [Online] Zugegriffen am 1. April 2020 über https://www.deutschlandfunk.de/vor-40-jahren-erste-weltklimakonferenz-in-genf.871.de.html?dram:article_id=440681.
4. Ritchie, H., Roser, M., 2020. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. Our World in Data. [Online] Zugegriffen am 5. April 2020 über <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
5. IPCC, 2018. Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. [pdf] Zugegriffen am 5. April 2020 über <http://ipcc.ch/report/sr15/>.
6. Wie viel CO₂ darf die Menschheit noch ausstoßen? SPIEGEL Online. 17. Juni 2019. [Online] Zugegriffen am 6. April 2020 über <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/co2-budget-so-viel-treibhausgas-darf-die-menschheit-noch-ausstossen-a-1277801.html>.
7. Mooney, C., Dennis, B., Global greenhouse gas emissions will hit yet another record high this year, experts project. Washington Post. 4. Dezember 2019. [Online] Zugegriffen am 5. April 2020 über <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2019/12/03/global-greenhouse-gas-emissions-will-hit-yet-another-record-high-this-year-experts-project/>.
8. Seidler, C., Sonderbericht des Weltklimarats: Die Welt gerät aus den Fugen - fragt sich nur, wie sehr. SPIEGEL Online. 8. November 2018. [Online] Zugegriffen am 4. April 2020 über <https://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/klimawandel-ipcc-bericht-zum-1-5-grad-ziel-vorgestellt-a-1231805.html>.
9. Global Carbon Budget. Global Carbon Project. 4. Dezember 2019. [Online] Zugegriffen am 2. April 2020 über <https://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>.
10. Weltweite CO₂-Emission steigt langsamer. Zeit Online. 4. Dezember 2019. [Online] Zugegriffen am 4. April 2020 über <https://www.zeit.de/wissen/umwelt/2019-12/studie-wachstum-co2-emission-weltweit-2019>.
11. Hausfather, Z., Analysis: Global fossil-fuel emissions up 0.6% in 2019 due to China. Carbon Brief. 4. Dezember 2019. [Online] Zugegriffen am 3. April 2020 über <https://www.carbonbrief.org/analysis-global-fossil-fuel-emissions-up-zero-point-six-per-cent-in-2019-due-to-china>.
12. Martens, J., Obenland, W., 2017. Die Agenda 2030: Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung. Global Policy Forum.
13. Dr. Kroll, C. Viele Worte, wenig Taten: UN-Nachhaltigkeitsziele könnten scheitern. Bertelsmann Stiftung. 19. Juni 2019. [online] Zugegriffen am 30. Mai 2020 über <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/themen/aktuelle-meldungen/2019/juni/viele-worte-wenig-taten-un-nachhaltigkeitsziele-koennten-scheitern>.
14. Global Policy Forum, 2019. Spotlight on Sustainable Development 2019. Reshaping governance for sustainability. Transforming institutions – shifting power – strengthening rights.
15. Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Bundesregierung. [online] Zugegriffen am 03. Juni 2020 über <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/eine-strategie-begleitet-uns/die-deutsche-nachhaltigkeitsstrategie>.
16. Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie. BMU. 5. Oktober 2017. [online] Zugegriffen am 10. April 2020 über <https://www.bmu.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimaschutzplan-2050/>.
17. Klimaschutzprogramm 2030. Bundesregierung. 9. Oktober 2019. [online] Zugegriffen am 29. Juni 2020 über <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzprogramm-2030-1673578>.
18. Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften vom 12. Dezember 2019.

19. VERORDNUNG (EU) 2018/842 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013.
20. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS The European Green Deal. COM/2019/640 final.
21. DEHSt, 2020. Nationales Emissionshandelssystem. Hintergrundpapier. [pdf] Zugriffen am 25. Mai 2020 über https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/nehs/nehs-hintergrundpapier.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
22. BMWi, 2018. Broschüre: SINTEG – Schaufenster intelligente Energie. [pdf] zugegriffen am 29. Juni 2020 über https://www.sinteg.de/fileadmin/media/Publikationen/SINTEG-Broschuere_2018.pdf.
23. Startseite. NEW 4.0 - Norddeutsche EnergieWende. [online] Zugriffen am 29. Juni 2020 über <https://www.new4-0.de/>.
24. Hamburger Klimaplan. Hamburger Stadtportal. [online] Zugriffen am 29. Juni 2020 über <https://www.hamburg.de/klimaplan/>.
25. CO2-Emissions. Global Carbon Project. 4. Dezember 2019. [online] Zugriffen am 14. April 2020 über <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>.
26. Indikator: Emission von Treibhausgasen. UBA. 25. März 2020. [online] Zugriffen am 27. April 2020 über <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-emission-von-treibhausgasen#die-wichtigsten-fakten>.
27. CO2-Ausstoß bei Stromerzeugung geht deutlich zurück. SPIEGEL Online. 8. April 2020. [online] Zugriffen am 18. April 2020 über <https://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/klimawandel-co2-ausstoss-bei-stromerzeugung-geht-in-deutschland-deutlich-zurueck-a-d18faff9-ce8f-4513-9a63-14be7ad93f0d>.
28. Agora Energiewende, 2020. Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2019. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2020. [online] Zugriffen am 20. April 2020 über https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2019/Jahresauswertung_2019/171_A-EW_Jahresauswertung_2019_WEB.pdf.
29. Icha, P., 2019. Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2018. UBA.
30. BMU, 2019. Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik. [online] Zugriffen am 25. April 2020 über https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_zahlen_2019_broschuere_bf.pdf.
31. Indikator: Treibhausgas-Emissionen der Industrie. UBA. 28. Februar 2020. [online] Zugriffen am 28. April 2020 über <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-treibhausgas-emissionen-der-industrie#die-wichtigsten-fakten>.
32. Archive: Statistik der Treibhausgasemissionen - Luftemissionsrechnung. Eurostat - Statistics Explained. 2. Oktober 2012. [online] Zugriffen am 30. April 2020 über https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Archive:Statistik_der_Treibhausgasemissionen_-_Luftemissionsrechnung&oldid=103192.
33. Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen bis 2019. Statista. 2020. [online] Zugriffen am 25. Mai 2020 über <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/255682/umfrage/bruttowertschoepfung-nach-wirtschaftsbereichen/>.
34. Unternehmen investieren zu wenig in CO2-Reduzierung. SPIEGEL Online. 25. Februar 2020. [online] Zugriffen am 30. April 2020 über <https://www.spiegel.de/wirtschaft/unternehmen-investieren-zu-wenig-in-co2-reduzierung-a-a9d2b9f2-f74a-43e6-a8c9-768c0f5beae5>.
35. BMU, 2019. Klimaschutz in Zahlen: CO2-Bepreisung. [online] Zugriffen am 10. Mai 2020 über https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutz_zahlen_2019_fs_co2_bepreisung_de_bf.pdf.
36. Frohn, C., 2019. Policy Paper: CO2-Emissionshandel vs. CO2-Steuer. .
37. Rohleder, F., 2019. „Gelbe Westen“ in Frankreich: Welche Ziele haben Sie? Was steckt hinter den Protesten? Merkur.de [online] Zugriffen am 29. Juni 2020 über <https://www.merkur.de/politik/gelbe-westen-frankreich-welche-ziele-was-steckt-hinter-protesten-zr-10792261.html>.
38. Richtlinie 2003/87/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Oktober 2003 über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft und zur Änderung der Richtlinie 96/61/EG des Rates (Text von Bedeutung für den EWR).

39. Der Europäische Emissionshandel und seine Umsetzung in Deutschland. DEHSt. 1. August 2019. [online] Zugegriffen am 18. Mai 2020 über <https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Emissionshandel-verstehen/Umsetzung-Ausgestaltung/umsetzung-ausgestaltung-node.html>.
40. Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz vom 21. Juli 2011 (BGBl. I S. 1475), das zuletzt durch Artikel 360 Absatz 2 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.
41. Sanktionierung. DEHSt. 27. März 2020. [online] Zugegriffen am 12. Mai 2020 über https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/Emissionshandel-verstehen/Sanktionierung/sanktionierung_node.html.
42. DEHSt, 2015. Emissionshandel in Zahlen.
43. DEHSt, 2019. Leitfaden Zuteilung 2021 - 2030. Teil 1.
44. 23, Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten (Text von Bedeutung für den EWR).
45. DEHSt, 2019. Factsheet: Europäischer Emissionshandel 2013–2020.
46. BMU, 2018. Die Reform des EU-Emissionshandels für die 4. Handelsperiode (2021-2030). Überblick über Verhandlungsergebnisse.
47. Zuteilung für Industrieanlagen. Offizielle Webseite der EU. [online] Zugegriffen am 14. Mai 2020 über https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/allowances/industrial_de.
48. EnergieAgentur.NRW, 2019. Broschüre: 4. Handelsperiode des Europäischen Treibhausgas-Emissionshandelssystems (2021 - 2030). Einführung und Überblick.
49. CO2 European Emission Allowances. Börse Online. [online] Zugegriffen am 15. Mai 2020 über <https://www.boerse-online.de/rohstoffe/co2-emissionsrechte>.
50. Europäische Kommission, 2018. Bekanntmachung der Kommission — Vorläufige Carbon-Leakage-Liste 2021-2030 (2018/C 162/01).
51. Europäische Union, 2018. Richtlinie 2018/410 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2018 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Unterstützung kosteneffizienter Emissionsreduktionen und zur Förderung von Investitionen mit geringem CO₂-Ausstoß und Beschlusses (EU) 2015/1814.
52. Europäischer Emissionshandel: Deutsche Anlagen mindern 2019 um rund 14 Prozent. DEHSt. 1. April 2020. [online] Zugegriffen am 20. Mai 2020 über <https://www.dehst.de/SharedDocs/news/DE/vet-zahlen-2018.html>.
53. Brennstoffemissionshandelsgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2728).
54. Breitkopf, A., 2020. Energieverbrauch* des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland nach ausgewählten Sektoren im Jahr 2018. Statista. [online] Zugegriffen am 5. Juni 2020 über <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/432596/umfrage/energieverbrauch-im-verarbeitenden-gewerbe-in-deutschland-nach-sektor/>.
55. Verband Deutsche Papierfabriken, 2020. Papier 2020. Ein Leistungsbericht. .
56. Verband Deutsche Papierfabriken, 2020. Papier 2020. Ein Leistungsbericht. Privat breitgestellt per Email am 4. Juni 2020.
57. Verband Deutscher Papierfabriken, 2020. Lange Reihe Produktion. Privat breitgestellt per Email am 05. Juni 2020.
58. Prof. Dr.-Ing. Putz, M. et al. Energieeffizienzpotenzial in der Planung am Beispiel der Papierherstellung. Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Chemnitz, Dresden und Zittau, Projektnummer 145521.
59. Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier, 2008. Leitfaden Energieeffizienz für die Papierindustrie.
60. EnergieAgentur.NRW, 2010. Effiziente Energienutzung in der Papierindustrie. Nützliche Informationen und Praxisbeispiele für Unternehmen.
61. Grafiken: Papiermaschine. Verband Deutscher Papierfabriken e. V.. [online] Zugegriffen am 8. Juni 2020 über <https://www.vdp-online.de/presse/mediathek/bilder/altpapier/grafiken>.
62. Innovation Center for U.S. Dairy, 2019. Scope 1 & 2 GHG Inventory Guidance for U.S. Dairy Cooperatives and Processors. [pdf] Zugegriffen am 12. Juni 2020 über https://ghgprotocol.org/sites/default/files/Guidance_Handbook_2019_FINAL.pdf. S. 13.
63. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2018. CO₂-Verminderung im Papiergewerbe [pdf].

64. Koch, M., Hennenberg, K., Hünecke, K., Haller, M., Hesse, T., 2018. Rolle der Bioenergie im Strom- und Wärmemarkt bis 2050 unter Einbeziehung des zukünftigen Gebäudebestandes. Öko-Institu e. V. [pdf] Zugriffen am 27. Juni 2020 über https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB114_Bericht_Bio-Strom-W%C3%A4rme.pdf. S. 26-29.
65. Fleiter, T., Schlomann, B., Eichhammer, W., 2013. Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer Verlag. S. 345 - 405.
66. Projekt details: Niedersachsen. Global Solar Atlas. [online] Zugriffen am 26. Juni 2020 über https://globalsolaratlas.info/detail?c=52.61639,9.118652,7&r=DEU:DEU.9_1.
67. Hecking, H., Hintermayer, M., Lencz, D., Wagner, J., 2017. Endbericht: Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO₂-Minderung. ewi Energy Research & Scenarios. . [pdf] https://www.ewi.research-scenarios.de/cms/wp-content/uploads/2017/11/ewi_ERS_Energiemarkt_2030_2050.pdf.
68. Wetterbedingte Risiken der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien reduzieren. Deutsche Wetterdienst. 18. März 2020. [online] Zugriffen am 29. Juni 2020 über https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/180306/ertragsausfaelle_ee_pk_2018.html.
69. Erdwärmenutzung in Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. 19. Dezember 2020. [online] Zugriffen am 27. Juni 2020 über https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/wasser/grundwasser/leitfaden_erdwarmenutzung/erdwaermenutzung-in-niedersachsen-8927.html.
70. WÄRMELEITFÄHIGKEIT. Bundesverband Geothermie e.V. [online] Zugriffen am 27. Juni 2020 über <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/w/waermeleitfaehigkeit.html>.
71. NIBIS® KARTENSERVEN, 2020. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. [online] Zugriffen am 27. Juni 2020 über <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?TH=545.314#>.
72. Navigant Energy Germany GmbH, 2019. Energiewende in der Industrie. Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor.
73. Deutscher Verband für Landschaftspflege (DVL), 2007. Biogas aus Sicht des Umwelt- und Naturschutzes. [pdf] Zugriffen am 27. Juni 2020 über https://www.lpv.de/uploads/media/biogas_fact-sheet.pdf. S. 8.
74. FÖS & Greenpeace Energy, 2013. WAS DIE ENERGIEWENDE WIRKLICH KOSTET. [pdf] Zugriffen am 27. Juni 2020 über https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/Studie_Was_die_Energiewende_wirklich_kostet.pdf. S. 16-17.
75. LUT University & Energy Watch Group, 2018. Global Energy System based on 100% Renewable Energy - Energy Transition in Europe Across Power, Heat, Transport and Desalination Sectors. Key Findings. [pdf].
76. DVGW, 2017. 4.3 Power-to-Gas-Projekte in Deutschland – eine Übersicht. [pdf]. S. 130-135.
77. Langer, B. Vortrag vom 29. Mai 2018: Wohin mit dem regenerativ erzeugten Strom? BEKS EnergieEffizienz GmbH .
78. Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) in der Fassung vom 18.01.2019, in Kraft getreten am 25.01.2019, Bundesgesetzblatt I Nr. 2.
79. Seitz, K., 2019. Nachhaltig nur auf dem Papier? Die ambivalente Rolle der Wirtschaft bei der Umsetzung der SDGs. Global Policy Forum Europe e.V.
80. Das sind die größten Klima-Ignoranten der Welt. WELT. 23. September 2019. [online] Zugriffen am 20. Mai 2020 über <https://www.welt.de/politik/ausland/article200813204/UN-Klimagipfel-Erneuernde-Bilanz-der-Klimapolitik-weltweit.html>.
81. Breitkopf, A., 2020. Umsatz der deutschen Papier- und Zellstoffindustrie in den Jahren 2009 bis 2019. Statista. [online] Zugriffen am 7. Juni 2020 über <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5939/umfrage/umsatz-der-papier-und-zellstoffindustrie-seit-2006/>.
82. Hollberg, A., 2018. Vorlesung über Ökobilanzierung an der Bauhaus Universität Weimar. Caala Software. [YouTube] Zugriffen am 14. Juni 2020 über <https://www.youtube.com/watch?v=g60Z3tQpwZ8>.
83. Breitkopf, A. 2020. Kohlendioxid - Emissionsfaktor für den Strommix in Deutschland bis 2019. Statista. [online] Zugriffen am 23. Juni 2020 über <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>.
84. Überprüfungsmechanismus der Agenda 2030. BMZ. [online] Zugriffen am 7. April 2020 über http://www.bmz.de/de/themen/2030_agenda/monitoring/index.html.

ANHANG 1

EU-emissionshandlungspflichtige Anlagen und Tätigkeiten ohne Luftverkehrssektor [78]

Nr.	Tätigkeiten	Treibhausgas
1	Verbrennungseinheiten zur Verbrennung von Brennstoffen mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von insgesamt 20 MW oder mehr in einer Anlage, soweit nicht von einer der nachfolgenden Nummern erfasst	CO ₂
2	Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas durch den Einsatz von Brennstoffen in einer Verbrennungseinrichtung (wie Kraftwerk, Heizkraftwerk, Heizwerk, Gasturbinenanlage, Verbrennungsmotoranlage, sonstige Feuerungsanlage), einschließlich zugehöriger Dampfkessel, mit einer Feuerungswärmeleistung von 50 MW oder mehr	CO ₂
3	Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas durch den Einsatz von Kohle, Koks, einschließlich Petrolkoks, Kohlebriketts, Torfbriketts, Brenntorf, naturbelassenem Holz, emulgiertem Naturbitumen, Heizölen, gasförmigen Brennstoffen (insbesondere Koksofengas, Grubengas, Stahlgas, Raffineriegas, Synthesegas, Erdöl aus der Tertiärförderung von Erdöl, Klärgas, Biogas), Methanol, Ethanol, naturbelassenen Pflanzenölen, Pflanzenölmethylestern, naturbelassenem Erdgas, Flüssiggas, Gasen der öffentlichen Gasversorgung oder Wasserstoff mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 20 MW bis weniger als 50 MW in einer Verbrennungseinrichtung (wie Kraftwerk, Heizkraftwerk, Heizwerk, Gasturbinenanlage, Verbrennungsmotoranlage, sonstige Feuerungsanlage), einschließlich zugehöriger Dampfkessel	CO ₂
4	Anlagen zur Erzeugung von Strom, Dampf, Warmwasser, Prozesswärme oder erhitztem Abgas durch den Einsatz anderer als in Nummer 3 genannter fester oder flüssiger Brennstoffe in einer Verbrennungseinrichtung (wie Kraftwerk, Heizkraftwerk, Heizwerk, Gasturbinenanlage, Verbrennungsmotoranlage, sonstige Feuerungsanlage), einschließlich zugehöriger Dampfkessel, mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 20 MW bis weniger als 50 MW	CO ₂
5	Verbrennungsmotoranlagen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen für den Einsatz von Heizöl EL, Dieseldieselmotor, Methanol, Ethanol, naturbelassenen Pflanzenölen, Pflanzenölmethylestern oder gasförmigen Brennstoffen (insbesondere Koksofengas, Grubengas, Stahlgas, Raffineriegas, Synthesegas, Erdöl aus der Tertiärförderung von Erdöl, Klärgas, Biogas, naturbelassenem Erdgas, Flüssiggas, Gasen der öffentlichen Gasversorgung, Wasserstoff) mit einer Feuerungswärmeleistung von 20 MW oder mehr	CO ₂
6	Gasturbinenanlagen zum Antrieb von Arbeitsmaschinen für den Einsatz von Heizöl EL, Dieseldieselmotor, Methanol, Ethanol, naturbelassenen Pflanzenölen, Pflanzenölmethylestern oder gasförmigen Brennstoffen (insbesondere Koksofengas, Grubengas, Stahlgas, Raffineriegas, Synthesegas, Erdöl aus der Tertiärförderung von Erdöl, Klärgas, Biogas, naturbelassenem Erdgas, Flüssiggas, Gasen der öffentlichen Gasversorgung, Wasserstoff) mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 20 MW	CO ₂
7	Anlagen zur Destillation oder Raffination oder sonstigen Weiterverarbeitung von Erdöl oder Erdölprodukten in Mineralöl- oder Schmierstoffraffinerien	CO ₂
8	Anlagen zur Trockendestillation von Steinkohle oder Braunkohle (Kokereien)	CO ₂
9	Anlagen zum Rösten, Schmelzen, Sintern oder Pelletieren von Metallerzen	CO ₂
10	Anlagen zur Herstellung oder zum Erschmelzen von Roheisen oder Stahl einschließlich Stranggießen, auch soweit Konzentrate oder sekundäre Rohstoffe eingesetzt werden, mit einer Schmelzleistung von 2,5 Tonnen oder mehr je Stunde, auch soweit in integrierten Hüttenwerken betrieben	CO ₂
11	Anlagen zur Herstellung oder Verarbeitung von Eisenmetallen (einschließlich Eisenlegierung) bei Betrieb von Verbrennungseinheiten mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von 20 MW oder mehr,	CO ₂

Nr.	Tätigkeiten	Treibhausgas
	soweit nicht von Nummer 10 erfasst; die Verarbeitung umfasst insbesondere Walzwerke, Öfen zum Wiederaufheizen, Glühöfen, Schmiedewerke, Gießereien, Beschichtungs- und Beizanlagen	
12	Anlagen zur Herstellung von Primäraluminium	CO ₂ , PFC
13	Anlagen zum Schmelzen, zum Legieren oder zur Raffination von Nichteisenmetallen bei Betrieb von Verbrennungseinheiten mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung (einschließlich der als Reduktionsmittel verwendeten Brennstoffe) von 20 MW oder mehr	CO ₂
14	Anlagen zur Herstellung von Zementklinker mit einer Produktionsleistung von mehr als 500 Tonnen je Tag in Drehrohröfen oder mehr als 50 Tonnen je Tag in anderen Öfen	CO ₂
15	Anlagen zum Brennen von Kalkstein, Magnesit oder Dolomit mit einer Produktionsleistung von mehr als 50 Tonnen Branntkalk, gebranntem Magnesit oder gebranntem Dolomit je Tag	CO ₂
16	Anlagen zur Herstellung von Glas, auch soweit es aus Altglas hergestellt wird, einschließlich Anlagen zur Herstellung von Glasfasern, mit einer Schmelzleistung von mehr als 20 Tonnen je Tag	CO ₂
17	Anlagen zum Brennen keramischer Erzeugnisse mit einer Produktionsleistung von mehr als 75 Tonnen je Tag	CO ₂
18	Anlagen zum Schmelzen mineralischer Stoffe, einschließlich Anlagen zur Herstellung von Mineralfasern, mit einer Schmelzleistung von mehr als 20 Tonnen je Tag	CO ₂
19	Anlagen zum Trocknen oder Brennen von Gips oder zur Herstellung von Gipskartonplatten und sonstigen Gipserzeugnissen bei Betrieb von Verbrennungseinheiten mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von 20 MW oder mehr	CO ₂
20	Anlagen zur Gewinnung von Zellstoff aus Holz, Stroh oder ähnlichen Faserstoffen	CO ₂
21	Anlagen zur Herstellung von Papier, Karton oder Pappe mit einer Produktionsleistung von mehr als 20 Tonnen je Tag	CO ₂
22	Anlagen zur Herstellung von Industrieruß bei Betrieb von Verbrennungseinheiten mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von 20 MW oder mehr	CO ₂
23	Anlagen zur Herstellung von Salpetersäure	CO ₂ , N ₂ O
24	Anlagen zur Herstellung von Adipinsäure	CO ₂ , N ₂ O
25	Anlagen zur Herstellung von Glyoxal oder Glyoxylsäure	CO ₂ , N ₂ O
26	Anlagen zur Herstellung von Ammoniak	CO ₂
27	Anlagen zur Herstellung von a) organischen Grundchemikalien (Alkene und chlorierte Alkene; Alkine; Aromaten und alkylierte Aromaten; Phenole, Alkohole; Aldehyde, Ketone; Carbonsäuren, Dicarbonsäuren, Carbonsäureanhydride und Dimethylterephthalat; Epoxide; Vinylacetat, Acrylnitril; Caprolactam und Melamin) oder b) Polymeren (Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol, Polyvinylchlorid, Polycarbonate, Polyamide, Polyurethane, Silikone) mit einer Produktionsleistung von mehr als 100 Tonnen je Tag	CO ₂

Nr.	Tätigkeiten	Treibhausgas
28	Anlagen zur Herstellung von Wasserstoff oder Synthesegas durch Reformieren, partielle Oxidation, Wassergas-Shiftreaktion oder ähnliche Verfahren mit einer Produktionsleistung von mehr als 25 Tonnen je Tag	CO ₂
29	Anlagen zur Herstellung von Natriumkarbonat und Natriumhydrogenkarbonat	CO ₂
30	Anlagen zur Abscheidung von Treibhausgasen aus Anlagen nach den Nummern 1 bis 29 zum Zwecke der Beförderung und geologischen Speicherung in einer in Übereinstimmung mit der Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die geologische Speicherung von Kohlendioxid und zur Änderung der Richtlinie 85/337/EWG des Rates sowie der Richtlinien 2000/60/EG, 2001/80/EG, 2004/35/EG, 2006/12/EG und 2008/1/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 (ABl. L 140 vom 5.6.2009, S. 114) zugelassenen Speicherstätte	CO ₂
31	Rohrleitungsanlagen zur Beförderung von Treibhausgasen zum Zwecke der geologischen Speicherung in einer in Übereinstimmung mit der Richtlinie 2009/31/EG zugelassenen Speicherstätte	CO ₂
32	Speicherstätte zur geologischen Speicherung von Treibhausgasen, die in Übereinstimmung mit der Richtlinie 2009/31/EG zugelassen ist	CO ₂