

STUDIE

KLIMANEUTRALITÄT ÖSTERREICHS BIS 2040

BEITRAG DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE

KURZFASSUNG



Christian Diendorfer, Bernhard Gahleitner, Bernhard Dachs (AIT)
Thomas Kienberger, Peter Nagovnak (MUL)
Hans Böhm, Simon Moser (EI-JKU)
Gregor Thenius, Karina Knaus (AEA)

September 2021

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary	3
2	Einleitung	6
2.1	Motivation	6
2.2	Methodik	7
2.2.1	Klassifizierung der Industrie	7
2.2.2	Bilanzgrenze der Industrie	7
3	Die Österreichische Industrie im Detail – Status Quo	9
3.1	THG-Emissionen der österreichischen Wirtschaft	9
3.2	Die österreichische Industrie im internationalen Vergleich	11
3.3	Der Emissionsgehalt der österreichischen Importe	12
3.4	Sektorale Betrachtung der österreichischen Industrie	13
3.4.1	Eisen- & Stahlerzeugung	16
3.4.2	Steine & Erden, Glas	19
3.4.3	Chemie- & Petrochemie	21
3.4.4	Papier & Druck	22
4	Technisches Dekarbonisierungspotential	25
4.1	Technische Dekarbonisierungspotentiale der Sektoren	25
4.1.1	Eisen- & Stahlerzeugung	25
4.1.2	Steine & Erden, Glas	28
4.1.3	Chemie- & Petrochemie	30
4.1.4	Papier & Druck	32
4.2	Zusammenfassung des technischen Dekarbonisierungspotentials	34
4.3	Auswirkungen auf das österreichische Energiesystem	37
5	Kosten der Transformation	38
5.1	Kosten der Querschnittstechnologien	39
5.2	Investitionskosten der Dekarbonisierung in den Industriesektoren	39
5.2.1	Eisen- & Stahlerzeugung	39
5.2.2	Steine & Erden, Glas	41
5.2.3	Chemie- & Petrochemie	44
5.2.4	Papier & Druck	46
5.3	Zusammenfassende Darstellung der Investitionskosten	47
5.4	Instrumente	50
6	Literatur	51

1 EXECUTIVE SUMMARY

Hintergrund der Studie

Die österreichische Bundesregierung verfolgt in ihrem aktuellen Regierungsprogramm das ambitionierte Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung des Energie- bzw. gesamten Wirtschaftssystems bis zum Jahr 2040. Das Konsortium aus AIT Austrian Institute of Technology, Montanuniversität Leoben, Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz und der Österreichischen Energieagentur wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) beauftragt, in dieser wissenschaftlichen Studie auszuarbeiten (i) wie der Status quo der österreichischen Industrie im internationalen Vergleich ausfällt, (ii) welche Dekarbonisierungsoptionen es für die einzelnen Sektoren der österreichischen Industrie gibt und (iii) abzuschätzen, mit welchen Investitionskosten diese technologischen Optionen verbunden sind. Eine detaillierte wirtschaftliche Analyse dieser Kosten oder szenarienspezifisch optimierte Empfehlungen sind nicht Teil dieser Studie.

Status quo der österreichischen Industrie im internationalen Vergleich

Innerhalb der Bilanzgrenze um alle Anlagen und Prozesse der österreichischen Industriestandorte werden jährlich rund 110 TWh benötigt. Dies entspricht etwa 27% des Bruttoinlandverbrauchs. Seit 1990 wuchs der THG-Ausstoß der Industrie in Österreich von damals 23,4 auf 27,1 Mt CO₂e an. Besonders große THG-Emissionen fallen bei der Erzeugung von Metallen wie Eisen und Stahl, Produkten aus Steinen und Erden wie Zement und Ziegel, Papier sowie chemischen Produkten an. Es zeigt sich, dass die österreichische Wirtschaft intensiv in internationale Wertschöpfungsketten eingebunden ist. Durch im Ausland hergestellte Industriegüter werden THG-Emissionen im Umfang von 15,3 Mt CO₂e importiert. Diese Menge liegt leicht unter den Emissionen, die anfallen würden, wenn die Importe mit den Emissionsintensitäten der heimischen Industrie auf Branchenebene gewichtet werden. Ein Ersatz der inländischen Produktion durch Importe würde die Emissionen also nur geringfügig reduzieren. Gleichzeitig fallen für die Produktion von Industriegütern, die exportiert werden, 15 Mt CO₂e an. In den Sektoren Eisen- & Stahlerzeugung und bei der Erzeugung von Zement ruft ein im internationalen Vergleich hoher Anteil an Primärproduktion einen großen Anteil der Gesamtemissionen hervor. Während diese Tatsache Österreich im europäischen Vergleich der Emissionen pro Wertschöpfung lediglich im vorderen Mittelfeld aufscheinen lässt, entsprechen die in der Primärproduktion eingesetzten Prozesse durchwegs den Best-Available-Technologies gemäß offizieller branchenspezifischer Einordnung der Europäischen Union.

Technische Dekarbonisierungspotentiale der 13 Sektoren der österreichischen Industrie

Zur Untersuchung möglicher Hebel der Dekarbonisierung mittels Erhebung technischer Potentiale in den 13 Industriesektoren nach IEA-Klassifizierung wurden die vier Dekarbonisierungsstrategien *Elektrifizierung*, *Einsatz CO₂-neutraler Gase*, *Carbon Capture*, und *Kreislaufwirtschaft* betrachtet. Dabei wird zwischen energie- und prozessbedingten Emissionen unterschieden. Unter prozessbedingten Emissionen werden jene Emissionen verstanden, die in industriellen Umwandlungsprozessen (bspw. Hochofen) oder durch für die Produktion notwendige eingebrachte Mineralstoffe verursacht werden. Energiebedingte Emissionen entstehen aus der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern zur Versorgung der Bedarfe der Nutzenergiekategorien.

Im energie- und emissionsintensivsten Sektor **Eisen- & Stahlerzeugung** können allein durch den Einsatz von CO₂-neutralen Gasen durch die Etablierung der Direktreduktion/Elektrolichtbogen-Route, je nach eingesetztem Gas und dafür benötigter Vorkette, bis zu 10 Mt CO₂e pro Jahr eingespart werden. Während der Transitionsphase zu einer klimaneutralen Stahlerzeugung bringt dieser Technologiewechsel noch einen weiteren Vorteil mit sich: Bei gegebenenfalls vorübergehend verringerter Eisenerz-Reduktionskapazität in Österreich kann mit international verfügbarem Eisenschwamm durch den schnellen Ausbau der vorgesehenen Elektrolichtbogenöfen eine gleichbleibende Menge hochqualitativen Stahls produziert werden. Für eine annähernd vollständige Dekarbonisierung dieses Sektors muss komplementär zum Ersatz der Hochofenroute die Dekarbonisierung der Hochtemperatur-Prozesswärmeanwendungen (> 200°C) vorangetrieben werden. Aufgrund des Temperaturniveaus werden auch hier CO₂-neutrale Gase zum Einsatz kommen müssen, welche eine Verminderung der Treibhausgase um 1,4 bis 1,9 Mt CO₂e ermöglichen können. Aufgrund notwendiger Vorketten bei der Erzeugung der CO₂-neutralen Gase muss jedoch immer ein signifikanter energetischer Mehraufwand mitberücksichtigt werden. Dieser Mehraufwand kann durch vermehrtes Schrott-Recycling jedoch signifikant reduziert werden. Für ein gleichbleibendes Produktportfolio kann von bis zu 50% Schrotteinsatz ausgegangen werden, der in gleichem Ausmaß das aus Direktreduktion zu gewinnende Roheisen minimieren und damit energetische als auch rohstoffliche Ressourcen einsparen könnte.

Der Sektor **Steine & Erden, Glas** stellt den zweit-emissionsintensivsten Sektor der österreichischen Industrie dar. Die Zementindustrie ist dabei für rund 2/3 der Emissionen des Gesamtsektors verantwortlich. Die größte Herausforderung bei der Dekarbonisierung dieses Sektors sind die geogenen Emissionen, die prozessbedingt durch das Austreiben von CO₂ aus mineralischen Verbindungen entstehen. Aus diesem Grund spielt die Anwendung von Carbon Capture-Technologien eine besondere Rolle. Neben der bereits etablierten Aminwäsche, wird derzeit eine Vielzahl an Varianten aus dieser Technologiefamilie in Pilotanlagen auf ihre industrielle Eignung geprüft. Die erreichbare Reduktion der THG-Emissionen bewegt sich aufgrund von Leckagen bei rund 90%. Durch den Einsatz zur Vermeidung geogener Emissionen könnten so jährlich rund 2,5 Mt CO₂e eingespart werden, sofern eine langfristige Bindung des abgetrennten CO₂ ermöglicht wird. Ähnlich zur oben angesprochenen Stahlerzeugung, bilden auch in diesem Sektor die Hochtemperatur-Anwendungen mit Temperaturen über 200°C das zweithöchste Potential nach der Vermeidung der Prozessemissionen. In diesem Zusammenhang eröffnet die Etablierung der angesprochenen Carbon Capture Technologien die Möglichkeit, auch energiebedingte Emissionen des Austreibungsprozesses zu minimieren. Gesondert ist hervorzuheben, dass die österreichische Zementwirtschaft bereits einen im internationalen Vergleich überdurchschnittlichen Anteil an Sekundärbrennstoffen einsetzt. Obwohl diese Brennstoffe (bspw. Altöl, Altreifen und Industrieabfall) ebenfalls THG-Emissionen verursachen, ist darauf hinzuweisen, dass im Fall des Ersatzes dieser Energieträger andere Verwendungs- oder Verwertungsoptionen diskutiert werden müssen. In der öffentlichen Diskussion derzeit weniger priorisiert ist der vermehrte Einsatz von Recycling-Beton in der Zementindustrie, der bis zu 1/3 der dortigen Emissionen reduzieren und gleichzeitig natürliche Ressourcen schonen könnte.

Das zu hebende **Dekarbonisierungspotential in den übrigen Sektoren** beschränkt sich im Wesentlichen auf die energiebedingten Emissionen, die bei der Verbrennung fossiler kohlenstoffhaltiger Energieträger entstehen. Dabei weisen die chemische Industrie, sowie der Sektor Papier & Druck jedoch sektorspezifische Eigenheiten auf, denen besondere Beachtung geschenkt werden muss:

In der **Chemieindustrie**, dem dritt-bedeutendsten Sektor in Bezug auf die THG-Emissionen, ist zu erwarten, dass die derzeitige Kopplung dieses Sektors mit dem Sektor Energie (Raffinerie Schwechat), in Zukunft an Bedeutung verlieren wird. Der dadurch notwendig werdende Ersatz von Raffinerie-Nebenprodukten als wichtige Plattform-Chemikalien bringt eine neue Struktur des Sektors mit sich und kann zu einer Verschiebung von THG-Emissionen aus dem Sektor Energie in den Industriesektor führen.

In der **Papierindustrie**, die mit über 22 TWh den zweit-energieintensivsten Sektor der österreichischen Industrie darstellt, werden industrielle KWK-Anlagen großteils mit innerhalb der Bilanzgrenze anfallender Biomasse betrieben, die sowohl Strom als auch in großen Mengen benötigten Prozessdampf bereitstellen. Die größten Dekarbonisierungspotentiale sind daher in der Bereitstellung von Prozesswärme bzw. -dampf auf Temperaturniveaus über 200°C zu verorten, die derzeit noch mit Erdgas durchgeführt wird. Neben einer Erhöhung des Biomasseanteils wäre in diesem Bereich auch der Einsatz CO₂-neutraler Gase als einfache Ersatzlösung im bestehenden System denkbar.

In den übrigen, **nicht-energieintensiven Sektoren** bieten sich auf der betrachteten Technologieebene im Temperaturbereich bis 200°C sowohl die Elektrifizierung (Wärmepumpen) als auch der Einsatz CO₂-neutraler Gase an, wobei darauf hingewiesen werden muss, dass sich diese in Hinblick auf deren Realisierung durch dafür benötigte Installationen, Investitionen und Vorketten bei der Energieträger-Herstellung teils stark unterscheiden. Im Hochtemperaturbereich über 200°C sind im allgemeinen CO₂-neutrale Gase das Mittel der Wahl um den jeweiligen Prozessanforderungen Genüge tun zu können. Über alle Sektoren hinweg könnten beispielsweise durch den Einsatz CO₂-neutraler Gase bei der Bereitstellung von Prozesswärme über 200°C ca. 5 Mt CO₂e, und damit 18% der gesamten THG-Emissionen der Industrie vermieden werden. Der Einsatz von CO₂-neutralen Gasen bei der Bereitstellung von Prozesswärme unter 200°C ermöglicht eine Reduktion von bis zu 2,4 Mt CO₂e und entspricht damit dem Potential, dass durch Elektrifizierung mittels Wärmepumpen möglich wäre (ca. 2,2 Mt CO₂e).

Kosten der Transformation

Um den notwendigen Investitionsbedarf für die Umsetzung der untersuchten Dekarbonisierungsstrategien beurteilen zu können wurden die entsprechenden Technologiekosten in Bezug auf den Umsetzungszeitraum analysiert. Für den Einsatz CO₂-neutraler Gase zur Reduktion prozessbedingter Emissionen im Sektor **Eisen- & Stahlerzeugung** ist dabei mit einem Investitionsbedarf von 2,9–4,7 Mrd.€ zu rechnen, wobei hier für den unteren Grenzwert das Schrott-Recycling und damit der reduzierte Gasbedarf einen wesentlichen Einfluss hat. Insgesamt stellt für die Dekarbonisierungsstrategie über CO₂-neutrale Gase der Einsatz von Biomethan gegenüber den Wasserstoffrouten die am wenigsten kostenintensive Option in Bezug auf die Investitionen dar.

Im THG-intensiven Sektor **Steine & Erden, Glas** ist der identifizierte Investitionsbedarf zur Umsetzung der Dekarbonisierungsstrategien vergleichsweise gering. Für die Carbon Capture Optionen Aminwäsche sowie Oxyfuel-Verbrennung liegt das ermittelte Investitionsvolumen bei etwa 370–620 Mio.€. Bei diesen Beträgen sind allerdings nur die direkten Investitionskosten für die CO₂-Abtrennung berücksichtigt. Kosten für weiterführende Prozesse wie Speicherung (CCS) oder Verwertung (CCU) werden dafür noch zusätzlich anfallen. Zusätzlich stellt der Kreislaufwirtschafts-Ansatz mit dem vermehrten Einsatz von Recycling-Beton neben der Ressourceneffizienz eine Option mit geringer Kostenintensität dar.

Darüber hinaus zeigt sich, dass insbesondere in den nicht-energieintensiven Sektoren für die Dekarbonisierung von Raumheizung und Klimaanlage sowie von Prozesswärme < 200 °C die größten Investitionen zu erwarten sind. Insgesamt sind für die Anwendungsbereiche für Temperaturen bis 200 °C über alle Sektoren hinweg Gesamtinvestitionen von etwa 1,3–2,6 Mrd.€, je nach umgesetzter Dekarbonisierungsstrategie, zu erwarten. Wobei hier wiederum, neben dem Kostenaspekt weitere Faktoren, wie Exergie- und Ressourceneffizienz, zugehörige Vorketten und verfügbare Ressourcenpotenziale in der Auswahl der Technologie berücksichtigt werden müssen.

Während in der vorliegenden Studie in erster Linie reine Investitionskosten für die jeweils erhobenen Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Industrie betrachtet werden, sind für eine ganzheitliche techno-ökonomische Bewertung – und Auswahl zwischen Alternativoptionen – ganz wesentlich auch die Kosten des Betriebs zu berücksichtigen. Dennoch zeigen die Ergebnisse einen signifikanten Investitionsaufwand für die Umsetzung der einzelnen Dekarbonisierungsmaßnahmen und bieten damit auch eine potenzielle Entscheidungshilfe für etwaige Förderungen einzelner Maßnahmen in Abhängigkeit von deren Dekarbonisierungspotential.

Schlussfolgerungen

Aus den im Bericht erläuterten und oben zusammengefassten Ergebnissen ist somit festzuhalten:

- Die Dekarbonisierung der österreichischen Industrie ist mithilfe verschiedener Technologien möglich, die auf den Dekarbonisierungsstrategien *Elektrifizierung*, *Einsatz CO₂-neutraler Gase*, *Carbon Capture*, und *Kreislaufwirtschaft* beruhen. Deren Umsetzung bedarf einer balancierten gesamtsystemischen Analyse und einer daraus abgeleiteten Kette von Maßnahmen, die die Herausforderungen und Fragestellungen der Sektoren hinsichtlich Ressourcenwirtschaft, vorherrschende Industrieprozesse und regionale Raumplanung berücksichtigen.
- Die Minimierung der prozessbezogenen Emissionen stellt einen besonders wichtigen Hebel auf dem Weg zur Dekarbonisierung der österreichischen Industrie dar. Dies betrifft einerseits die Etablierung der Direktreduktionsroute in der Primär-Stahlerzeugung und andererseits die Vermeidung geogener Emissionen durch Austreibungsprozesse im Sektor Steine & Erden, Glas.
- Die Diskussion von Carbon Capture Technologien zur Verringerung der THG-Emissionen muss jedenfalls auch die weiterführende Verwendung oder Speicherung zum Inhalt haben. In diesem Zusammenhang sind geeignete Rahmenbedingungen, die die intersektorale Zusammenarbeit ermöglichen, unerlässlich und geeignet, den Industriestandort Österreich zu stärken.
- Die dargelegte Dekarbonisierung der österreichischen Industrie erfordert signifikante Investitionen, die durch einen Mix an Maßnahmen auf regulatorisch/energiepolitischer Ebene unterstützt werden müssen (z.B. Preissignale für CO₂, regulatorische Maßnahmen, neue Technologien, Information und Bewusstseinsbildung).

2 EINLEITUNG

2.1 Motivation

Die österreichische Bundesregierung verfolgt in ihrem aktuellen Regierungsprogramm das ambitionierte Ziel einer vollständigen Dekarbonisierung des Energie- bzw. gesamten Wirtschaftssystems bis zum Jahr 2040. Auch die Europäische Kommission hat im Juli 2021 ihre Klimaziele verschärft und strebt nun eine Reduktion der Netto-THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55% im Vergleich zu 1990 an. Mit diesem Zwischenziel soll Europa bis 2050 der erste klimaneutrale Kontinent der Welt werden.

Einen wesentlichen Beitrag auf diesem Weg zur Klimaneutralität wird die österreichische Industrie leisten, auf die, gemeinsam mit dem Energiesektor, derzeit etwa 37% der nationalen Treibhausgas(THG)-Emissionen entfallen. Innerhalb der Bilanzgrenze um alle Anlagen und Prozesse der österreichischen Industriestandorte werden jährlich 110 TWh Energie benötigt. Dies entspricht rund 27% des Bruttoinlandverbrauchs. Wie in Abbildung 1 ersichtlich, betragen die klimarelevanten THG-Emissionen der Industrie in 2019 27,1 Mt CO_{2e}. Im Vergleich zum Basisjahr 1990 bedeutet dies einen Anstieg von 15,8%. Somit müssen die Emissionen, bezogen auf 2019, bis 2030 um 61% reduziert werden, um das Sektorziel von 10,5 Mt CO_{2e}¹ zu erreichen.

Andererseits darf nicht vergessen werden, dass die österreichische Industrie und die ihr zugerechneten Dienstleistungen über 75 Mrd. € zur österreichischen Bruttowertschöpfung beitragen (Statistik Austria, 2021). Dies entspricht 34% der gesamten Wertschöpfung in Österreich. Die Industrie, inklusive der ihr zugerechneten Dienstleistungen bietet über 960 000 Beschäftigten einen Arbeitsplatz, womit fast jeder dritte Beschäftigte in Österreich in diesem Sektor tätig ist. Diese wesentlichen Beiträge der Industrie zum Wohlstand Österreichs zeigen, dass eine Dekarbonisierung durch Abwanderung der Industriebetriebe keine zielführende Lösung sein kann. Somit müssen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die eine kosteneffiziente Dekarbonisierung der Betriebe erlauben und so eine potentielle Abwanderung vermeiden können.

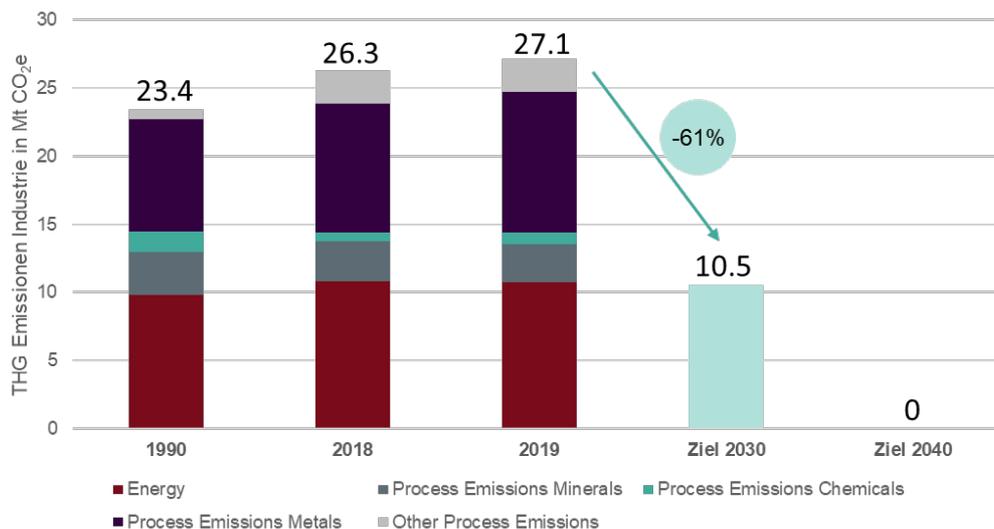


Abbildung 1: Entwicklung der THG-Emissionen und THG-Ziele der österreichischen Industrie für 2030 und 2040. Eigene Darstellung basierend auf (Umweltbundesamt, 2021).

Das AIT Austrian Institute of Technology wurde beauftragt, in dieser wissenschaftlichen Begleitstudie aufzuzeigen, wie grün Österreichs Industrie bereits heute ist und wie österreichische Unternehmen bei der Transformation bzw. bei der Umsetzung von innovativen Transformationstechnologien unterstützt werden können. Die inhaltliche Bearbeitung dieser Studie erfolgte gemeinsam mit der Montanuniversität Leoben, dem Energieinstitut an der Johannes-Kepler-Universität Linz und der Österreichischen Energieagentur. Das AIT brachte in dieser Kooperation Wissen sowohl aus dem Center for Energy als auch aus dem Center for Innovation Systems and Policy ein. Schwerpunkte der Arbeit bildeten neben den Aufgaben der Projektleitung die technologische Betrachtung der nicht-energieintensiven Industriesektoren, sowie die Aufbereitung des wirtschaftlichen und emissionsbilanziellen Status Quo der österreichischen Industrie inklusive eines

¹ Dieses Ziel gilt unter der Annahme, dass die Industrie das -55% Ziel exakt erfüllen muss und es keine Verschiebungen zwischen den einzelnen Sektoren, wie z.B. Landwirtschaft und Verkehr, kommt.

internationalen Vergleichs. Die Analyse der energieintensiven Industriesektoren Eisen- & Stahlerzeugung, Papier & Druck, sowie Steine & Erden, Glas wurde an der Montanuniversität durchgeführt. Zudem wurde die Potentialmethodik, sowie große Teile der strukturellen Arbeit dieses Berichts erbracht. Die Österreichische Energieagentur sowie das Energieinstitut an der JKU Linz erarbeiteten die mit den ausgewiesenen Dekarbonisierungspotentialen verbundenen Investitionskosten.

In der vorliegenden Studie werden verschiedene Zukunftstechnologien in Bezug auf THG-Reduktionspotential, Investitionskosten und ihren Einfluss auf das österreichische Energiesystem untersucht. Somit können die Transformationspotentiale der untersuchten Technologien identifiziert werden. Ziel ist die Bereitstellung einer umfangreichen Datenbasis, die dem Auftraggeber die Auswahl zielgerichteter politischer Maßnahmen ermöglichen soll.

2.2 Methodik

2.2.1 Klassifizierung der Industrie

In der vorliegenden Studie werden die THG-Emissionen der gesamten österreichischen Wirtschaft auf Basis der Luftemissionsdaten von EUROSTAT (EUROSTAT, 2018) und der Input-Output-Tabelle 2017 (EUROSTAT, kein Datum) in der Klassifizierung nach ÖNACE bzw. CPA² analysiert. Dabei werden sowohl direkte als auch indirekte Emissionen, die ein Sektor verursacht, analysiert und Österreich mit anderen Ländern verglichen. Zusätzlich werden Emissionen, die durch Importe verursacht werden, erfasst (Kapitel 3.3 – 3.3).

Anschließend werden die 13 Sektoren der österreichischen Industrie, nach den in der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria (Statistik Austria, 2020) ausgewiesenen IEA Sektoren³ (Statistik Austria, 2013) detailliert hinsichtlich ihres technischen Dekarbonisierungspotentials und ihrer Dekarbonisierungsoptionen (Kapitel 4.1) und der dazugehörigen Investitionskosten untersucht (Kapitel 5). Für diese Untersuchungen ist die Bilanzgrenze der österreichischen Industrie grundlegend.

Hinweis: Die Nutzenergieanalyse weist den Konnex der eingesetzten Energieträger zu den jeweiligen Nutzenergiekategorien aus. Somit können Anwendungs-spezifische Dekarbonisierungsoptionen berechnet werden. Die Nutzenergieanalyse weist jedoch lediglich die tatsächliche im Produktionsprozess eingesetzten Energiemengen aus und berücksichtigt Verluste, die innerhalb der industriellen Bilanzgrenze entstehen nicht. Im Rahmen dieser Studie wird die eingesetzte Nutzenergie mit Energieträger-spezifischen Emissionsfaktoren in CO₂-äquivalente Emissionen umgerechnet. Um in den statistischen Daten nicht berücksichtigten Verluste so gut wie möglich in die Berechnungen zu integrieren, werden Nutzenergiekategorie-spezifische Wirkungsgrade verwendet und bei der Berechnung der THG-Emissionen pro Energieträger und Nutzenergiekategorie berücksichtigt. Dennoch kommt es durch diesen Modellansatz zu Abweichungen zu den im National Inventory Report (Umweltbundesamt, 2021) ausgewiesenen Emissionen. Die Emissionswerte aus dem National Inventory Report sind als die offiziellen Zahlen zu werten.

2.2.2 Bilanzgrenze der Industrie

Im industriellen Energiesystem werden Energiebedarf und THG-Emissionen sowohl durch die endenergiekonsumierenden Aggregate zur Versorgung der Nutzenergiekategorien nach der Nutzenergieanalyse von Statistik Austria, als auch durch industrielle Energieumwandlungseinheiten sowie das Einbringen von CO₂-verursachenden Mineralstoffen ausgelöst.

² Die Emissionen nach Gütern werden nach CPA Klassifizierung berechnet. CPA ist auf der Ebene von 2-Stellern vollständig kompatibel mit NACE. So entspricht etwa CPA 17, Papier und Pappe, der Aktivität NACE 17, Erzeugung von Papier und Pappe.

³ Die IEA Sektoren korrespondieren weitgehend mit ÖNACE. Detaillierte Zusammenhänge sind in der Vollversion der Studie dargestellt.



Abbildung 2: Darstellung der industriellen Bilanzgrenze nach (Nagovnak, Kienberger, Geyer, & Hainoun, 2021). CO₂-Intensität im europäischen Strommix 2040 nach (European Commission, 2020)

Die in Abbildung 2 dargestellte Bilanzgrenze der Industrie wurde um die Anlagen und Prozesse aller österreichischen Industriestandorte gelegt. Dabei ist zu beachten, dass die vorgelagerte Erzeugung der dafür benötigten Energieträger und Mineralstoffe ebenfalls Emissionen verursachen kann. Je nach Unternehmensstrategie können diese Erzeugungs- oder Umwandlungsanlagen (z.B. Elektrolyseure) sowohl innerhalb als auch außerhalb der festgelegten industriellen Bilanzgrenze liegen. Dies kann die direkt der Industrie zuzurechnende Energie- und Emissionsbilanz sowohl in ihrer Zusammensetzung (nach Energieträger), als auch deren Höhe beeinflussen. In Abstimmung mit dem Auftraggeber werden die durch elektrische Erzeugungsanlagen außerhalb der Bilanzgrenze ausgelösten THG-Emissionen in vorliegender Studie jedenfalls ausgewiesen. Dafür wird das Impact Assessment der Europäischen Kommission verwendet, welche im Szenario MIX unter Einhaltung des Zwischenziels von -55% THG-Emissionen im Jahr 2030 gegenüber 1990 einen spezifischen THG-Ausstoß im europäischen Strommix von 56 g/kWh im Jahr 2040 annehmen lässt (European Commission, 2020).

Die betrachteten THG-Emissionen setzen sich aus energiebedingten, und prozessbedingten Emissionen zusammen, welche in Tabelle 1 beschrieben werden:

Tabelle 1: Beschreibung energie- bzw. prozessbedingter Emissionen

Energiebedingte Emissionen	Emissionen, die aus den in der Nutzenergieanalyse erhobenen Nutzenergiekategorien bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern entstehen.
Prozessbedingte Emissionen	Emissionen, die in industriellen Umwandlungsprozessen (bspw. Hochofen) oder durch für die Produktion notwendige eingebrachte Mineralstoffe verursacht werden.

In vorliegender Arbeit werden die Dekarbonisierungsstrategien *Elektrifizierung*, *Einsatz CO₂-neutraler Gase*, *Carbon Capture*, sowie *Kreislaufwirtschaft* auf deren jeweiliges technisches Dekarbonisierungspotential für die österreichische Industrie untersucht. Darunter wird jener Wert (THG-Emissionen, bzw. Energieeinsatz gemäß industrieller Bilanzgrenze) verstanden, der nach heutigem bzw. dem für das gewählte Zieljahr absehbaren Stand der Technik maximal erreicht werden kann (Deublein & Steinhauser, 2008), (Stanzer, et al., 2010), (Kaltschmitt, Hartmann, & Hofbauer, 2016), (Streicher, et al., 2010). Während die Rentabilität der damit in Verbindung stehenden technischen Veränderungen unberücksichtigt bleibt, besteht die Prämisse, dass Marktpositionierung (produzierte Mengen) und Produktqualität erhalten bleiben müssen.

In vorliegender Arbeit wird ausschließlich das technische Dekarbonisierungspotential des Status Quo der österreichischen Produktionsprozesse ermittelt. Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dabei keine möglichen Umstellungen der Geschäftsfelder oder Produktionsmengen untersucht werden und auch wirtschaftliche Überlegungen auf dieser Potentialebene nicht berücksichtigt sind.

Während in der vorliegenden Studie direkte Investitionskosten für die jeweils erhobenen Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Industrie betrachtet werden, sind für eine ganzheitliche techno-

ökonomische Bewertung und Auswahl zwischen Alternativoptionen ganz wesentlich auch die Kosten des Betriebs zu berücksichtigen.

Diese gesamtheitliche Betrachtung von Investitions- und Betriebskosten über die gesamte Lebensdauer der Technologien bedarf gesonderter ausführlicher Analysen, die eine gesamtwirtschaftliche Berechnung in Szenarien sowie die Einbindung der relevanten Stakeholder (z.B. zur Identifizierung typischer Investitionszyklen) enthält.

3 DIE ÖSTERREICHISCHE INDUSTRIE IM DETAIL – STATUS QUO

3.1 THG-Emissionen der österreichischen Wirtschaft

Die Analyse berücksichtigt zunächst die direkten oder produktionsbasierten Emissionen. Insgesamt betrug 2018 der gesamte THG-Ausstoß der heimischen Wirtschaft lt. EUROSTAT 60,1 Mt CO_{2e}. Davon entfallen 9 Mt CO_{2e} auf die Landwirtschaft, 26 Mt CO_{2e} auf die Industrie (Sachgüterproduktion) und etwa 25 Mt CO_{2e} auf die verschiedenen Teile des Dienstleistungssektors inklusive Bauwirtschaft, Transport, Energie und Entsorgung. Innerhalb des Dienstleistungssektors verursacht die Energieversorgung 10,3 Mt CO_{2e} an THG-Emissionen, 6,3 Mt CO_{2e} entfallen auf verschiedene Transportdienstleistungen und 1,5 Mt CO_{2e} auf den Handel. Für 2019 schätzt das WIFO einen leichten Anstieg der Emissionen, während für 2020 krisenbedingt ein Rückgang um mehr als sieben Prozent wahrscheinlich ist (Sommer, Sinabell, & Streicher, 2021).

Die folgende Abbildung zeigt die Emissionen pro Mio. Euro Output bzw. Mio. Euro Wertschöpfung⁴. Dabei wird nur die Produktion der Industrie auf der Ebene dargestellt, da der Fokus dieser Studie auf ebendiesen liegt.

Die Daten zeigen, dass die Emissionen sehr ungleich verteilt sind. Die Erzeugung von Mineralölprodukten und Metallen, Glas, Keramik, Steine und Erden sowie Papier und Pappe verursacht deutlich höhere Emissionen, sowohl bezogen auf die Wertschöpfung als auch auf den Output.

Am anderen Ende der Verteilung zeigen der Fahrzeugbau und die Erzeugung pharmazeutischer Erzeugnisse einen deutlich geringeren Fußabdruck; Branchen mit einer geringen Emissionsintensität⁵ wurden in eine Grafik innerhalb der Abbildung 3 aufgenommen, um mit einer anderen Skalierung die Lesbarkeit zu erhöhen. Insgesamt ist die Produktion von Sachgütern allerdings wesentlich THG-intensiver als Dienstleistungen: für eine Mio. Euro Wertschöpfung werden bei der Produktion von Sachgütern durchschnittlich 500 t emittiert, bei der Erbringung von Dienstleistungen nur 88 t.

⁴ Der Output besteht aus allen erforderlichen Inputs anderer Güter die für die Produktion eines Guts benötigt werden plus der Wertschöpfung. Die Wertschöpfung wiederum ist die Summe aller Löhne, Gehälter, Zinsen, Dividenden und des Gewinns der der Produktion eines Gutes zuordenbar ist.

⁵ Die Emissionsintensität einer Branche beschreibt die THG-Emissionen in Tonnen pro Mio. Euro Wertschöpfung.

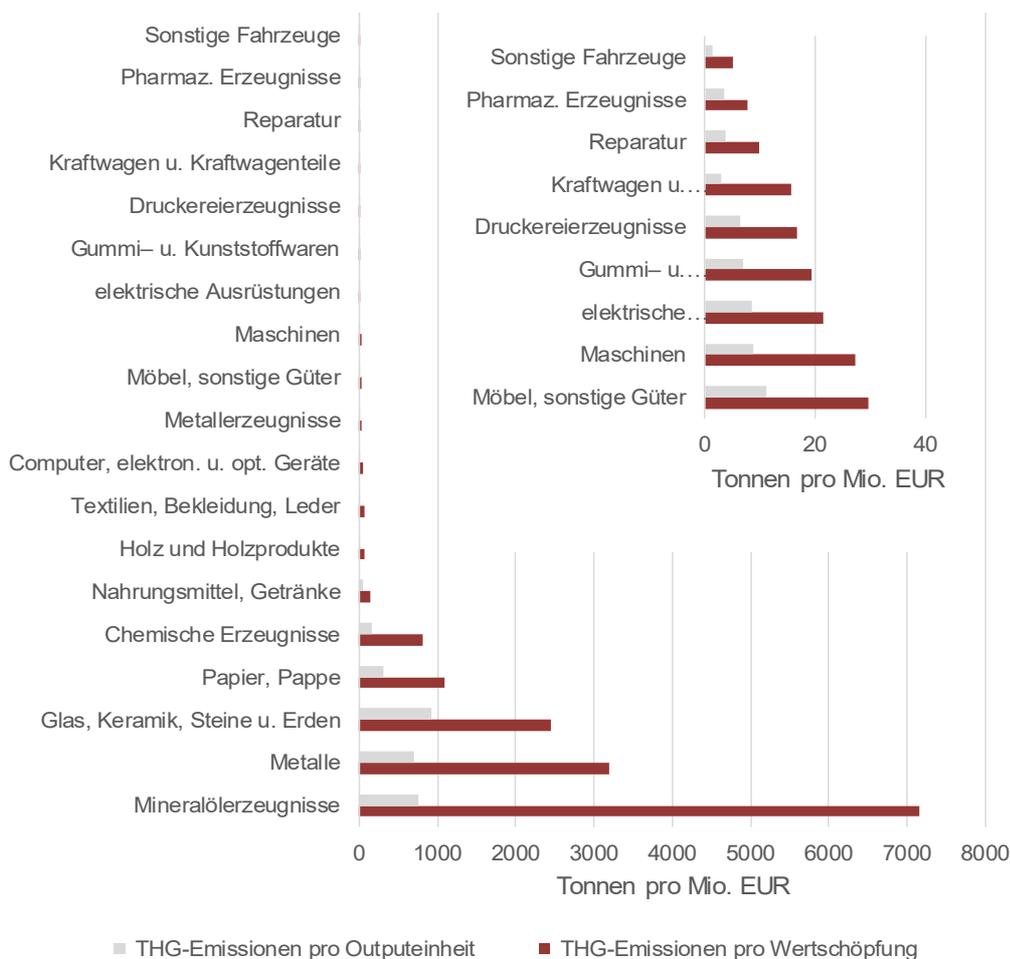


Abbildung 3: THG-Emissionen relativ zum Output und zur Wertschöpfung, 2018. Eigene Darstellung nach (EUROSTAT, 2018), (Statistik Austria, 2020), sowie eigenen Berechnungen

Zusätzlich muss bei der Bewertung der Emissionsintensitäten berücksichtigt werden, dass ein großer Teil der erzeugten Güter nicht direkt verbraucht, sondern exportiert oder als Vorprodukte für die Erzeugung anderer Güter verwendet wird. Von den rund 60 Mt CO₂e, die die heimische Wirtschaft verursacht, können 10,5 Mt CO₂e dem Endverbrauch und 30,7 Mt CO₂e der Produktion von Vorprodukten für die heimische Wirtschaft zugerechnet werden. 18,7 Mt CO₂e entstehen bei der Bereitstellung von Produkten und Dienstleistung für Kunden außerhalb Österreichs und gehen somit in den Export, siehe Abbildung 4.

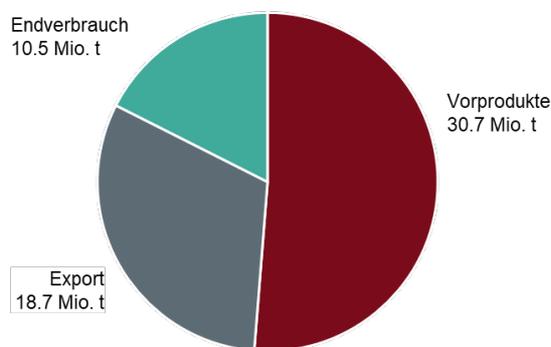


Abbildung 4: Verteilung der THG-Emissionen der österreichischen Wirtschaft nach Destination, 2018. Eigene Darstellung nach (EUROSTAT, 2018), (Statistik Austria, 2020), sowie eigenen Berechnungen

Betrachtet man lediglich die THG-Emissionen der österreichischen Industrie, siehe Abbildung 5, so sieht man, dass von den ca. 26 Mt CO₂e 1,7 Mt CO₂e dem Endverbrauch und 9,4 Mt CO₂e der Herstellung von Vorprodukten angerechnet werden können. 15 Mt CO₂e werden für die Produktion von Exportgütern emittiert.

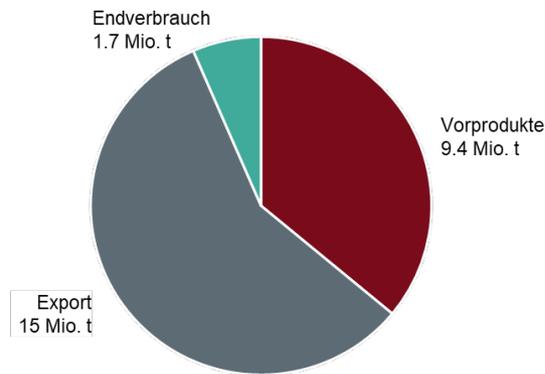


Abbildung 5: Verteilung der THG-Emissionen der österreichischen Industrie nach Destination, 2018. Eigene Darstellung nach (EUROSTAT, 2018), (Statistik Austria, 2020), sowie eigenen Berechnungen

3.2 Die österreichische Industrie im internationalen Vergleich

Durch die enge Verzahnung der österreichischen Wirtschaft mit internationalen Märkten stellt sich die Frage, wie viele THG die verschiedenen Sektoren im internationalen Vergleich emittieren. Abbildung 7 versucht, diese Frage mit Daten von Eurostat (EUROSTAT, 2018) zu beantworten. Österreich rangiert etwa im Mittelfeld der Länder. Die österreichische Industrie ist im Durchschnitt emissionsintensiver als jene Deutschlands, der nordischen Länder oder der Haupthandelspartner Italien und Schweiz.

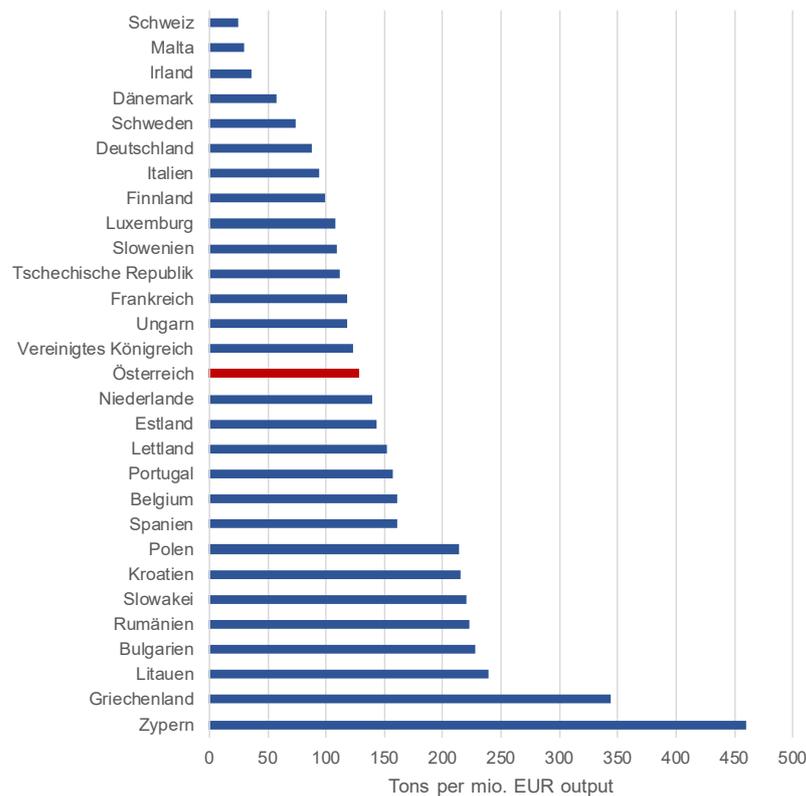


Abbildung 6: THG-Emissionen der Industrie in Tonnen pro Mio. Euro Output in verschiedenen europäischen Ländern, 2018 Quelle: EUROSTAT (EUROSTAT, 2018)

Vergleiche auf der Ebene der gesamten Industrie sind jedoch nur bedingt aussagekräftig, da sie die Branchenstruktur der einzelnen Länder nicht berücksichtigen. Ein Land mit einer großen Stahlindustrie kann deutlich höhere Emissionsintensitäten aufweisen, auch wenn die Stahlindustrie dieses Landes deutlich emissionseffizienter als jene in anderen Ländern produziert.

Abbildung 7 vergleicht die Emissionen verschiedener Länder auf der Ebene einzelner Branchen auf Grundlage der Emissionen pro Euro Output. Die Vergleichsdaten dieser Länder sind auf die Emissionsintensität der österreichischen Vergleichsbranche standardisiert. Wenn im Diagramm der Wert eines Vergleichslandes kleiner als eins ist, so ist die jeweilige Branche in Österreich emissionsintensiver als im Vergleichsland.

Insgesamt liegt die Emissionsintensität der österreichischen Wirtschaft bei der Mineralölverarbeitung, bei der Erzeugung von Papier und Pappe sowie bei der Metallherzeugung über der anderer Länder, während die Emissionsintensität bei der Erzeugung von Glas, Keramik und Waren aus Steinen und Erden, in der chemischen und in der Lebensmittelindustrie in Österreich deutlich niedriger ist.

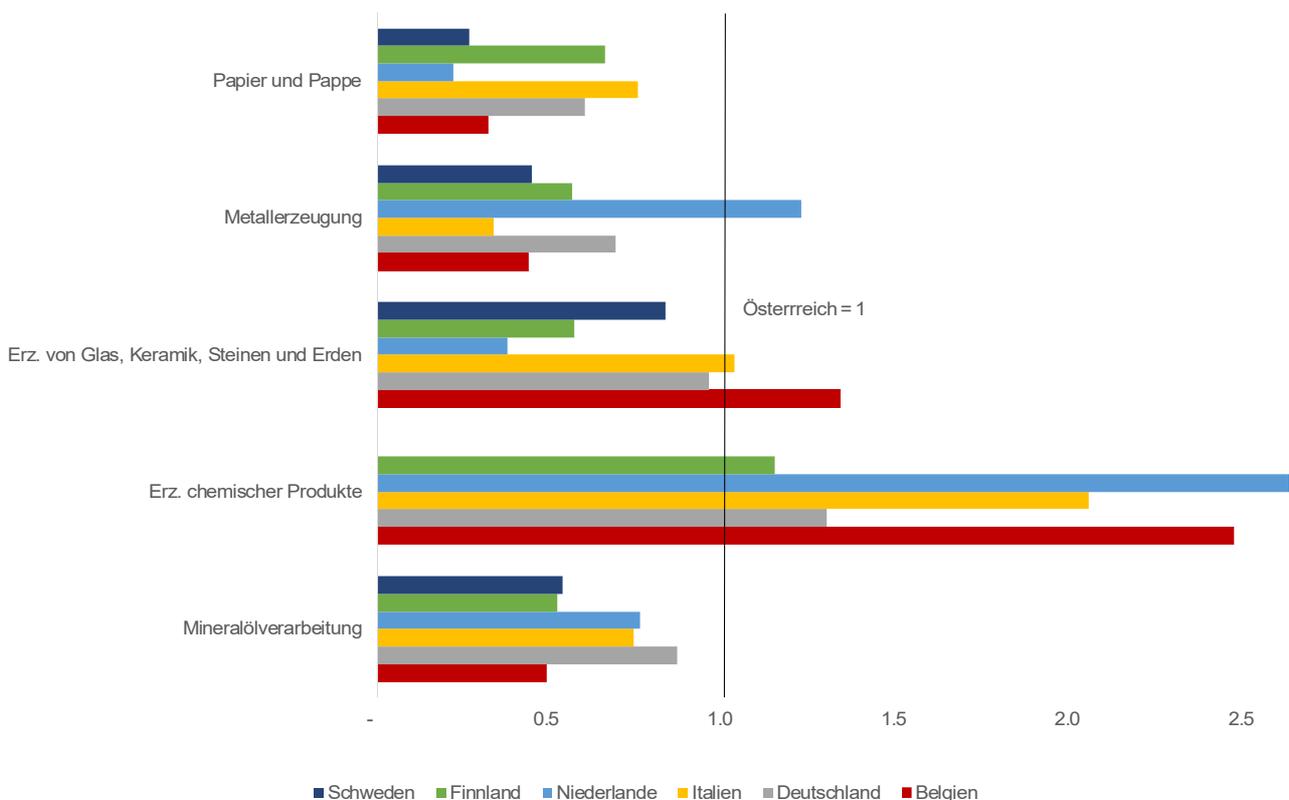


Abbildung 7: Emissionsintensität verschiedener Branchen im Ländervergleich, 2018. Quelle: EUROSTAT (EUROSTAT, 2018)

Bei einem Vergleich der industriellen Prozesse mit den BAT reference documents (BREFs) der Europäischen Union⁶ zeigt sich, dass die in der Primärproduktion eingesetzten Prozesse durchwegs den Best-Available-Technologies entsprechen. Die Produktion in China, Indien und Korea ist dagegen deutlich emissionsintensiver als in Österreich. Höhere Importe aus diesen Ländern würden den gesamten THG-Fußabdruck der heimischen Industrie und damit der gesamten Wirtschaft vergrößern.

3.3 Der Emissionsgehalt der österreichischen Importe

Österreich importiert als hochgradig internationalisierte Wirtschaft viele Vorprodukte und Güter für den Konsum aus dem Ausland. Die höchsten Anteile von Importen am gesamten Güterangebot finden sich – wie zu erwarten – bei Textilien und Bekleidung, Treibstoffen, Fahrzeugen, chemischen Produkten oder Computern, Elektronik und elektrische Ausrüstungen, während die Importanteile bei Dienstleistungen im Durchschnitt unter jenem der Sachgüter liegen. Es gibt gute Gründe, die Emissionen, die die Produktion dieser Importe verursacht hat, zum THG-Fußabdruck der österreichischen Wirtschaft zu addieren. Diese Emissionen wären ohne die Nachfrage österreichischer Firmen oder Konsumenten vielleicht nicht entstanden; außerdem werden sie, genauso wie Vorprodukte aus österreichischer Erzeugung, in der Produktion verwendet und letztere wurden ebenfalls zum THG-Fußabdruck addiert.

Die bei weitem höchsten importierten Emissionen finden sich in der Erzeugung von Metallen (5,3 Mio. t), chemischen Produkten (2,4 Mio. t) sowie bei Glas, Keramik, Steinen und Erden (2,2 Mio. t). Bei einigen Gütern sind die importierten Emissionen größer als die inländischen Emissionen. Beispiele sind hier Textilien und Bekleidung, chemische Produkte, Maschinen sowie Kraftwagen und -teile. Unter den Handelspartnern entfällt der größte Teil der importierten Emissionen auf Deutschland (etwa 5 Mio. t), die Slowakei (1,5 Mio. t) und

⁶ <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>

China (1,3 Mio. t.). Der hohe Wert der Slowakei ergibt sich vor allem aus dem Import von Metallen und der hohen Emissionsintensität der Erzeugung in diesem Land.

3.4 Sektorale Betrachtung der österreichischen Industrie

Tabelle 2 zeigt einen Ausschnitt der wesentlichen Struktur- und Leistungsdaten der betrachteten 13 Industriesektoren in Bezug auf die Anzahl der Unternehmen und Anzahl der Beschäftigten pro Sektor, deren Bruttowertschöpfung sowie die Anzahl der bedeutenden Einzelemittenten und deren THG-Emissionen für das Jahr 2019. Die Anzahl der im ETS-gelisteten Unternehmen ist in den einzelnen Sektoren stark unterschiedlich. Man erkennt jedoch gut, dass die reine Anzahl keinesfalls ein Indikator für die im ETS-erfassten THG-Emissionsmengen eines Sektors ist. Während beispielsweise 19 Unternehmen der Papierindustrie rund 1 400 kt CO₂e verursachen, trägt die Eisen- und Stahlerzeugung mit nur 3 Unternehmen rund 12 000 kt bei und ist damit der größte THG-Emittent in der österreichischen Industrie.

Tabelle 2: Kennzahlen der österreichischen Industriesektoren 2019 (Statistik Austria, 2021)

Sektor	Unternehmen	bedeutende Einzelemittenten ⁷	Ausstoß der Einzelemittenten in kt CO ₂ e	Beschäftigte	Bruttowertschöpfung in Mio. €
Bau	37 923	0	-	318 776	19 183
Bergbau ⁸	318	2	264	ca. 6 000	ca. 627
Chemie und Petrochemie	520	10	1 631	35 051	4 791
Druck	819	0	-	10 832	755
Eisen- und Stahlerzeugung	52	3	12 016	24 642	2 757
Fahrzeugbau	333	2	24	51 695	4 897
Holzverarbeitung	2 667	0	-	34 259	2 742
Maschinenbau	6 349	2	43	240 209	21 519
Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	4 078	2	257	88 036	6 396
Nichteisenmetalle	85	2	132	13 480	1 328
Papier, Pappe	138	19	1 432	16 626	2 036
Sonst. produzierender Bereich	5 843	1	16	77 128	4 910
Steine und Erden, Glas	1 329	33	4 118	31 355	2 538

Die 10 größten industriellen Emittenten sind Abbildung 8 zu entnehmen und zeichnen sich durch ihre Zugehörigkeit zu den Sektoren Eisen- und Stahlerzeugung, Steine und Erden, Glas, sowie Papier und Druck aus.

⁷ Bedeutende Einzelemittenten sind hier jene Betriebe, die im ETS aufscheinen. Tochterunternehmen von Konzernen wurden zusammengefasst.

⁸ Daten für den Subsektor Erzbergbau (NACE 07) werden aufgrund der geringen Anzahl an Unternehmen nicht veröffentlicht. Die Werte für die 3 Unternehmen in diesem Sektor wurden auf Basis einer Eigenrecherche und Hochrechnung inkludiert.

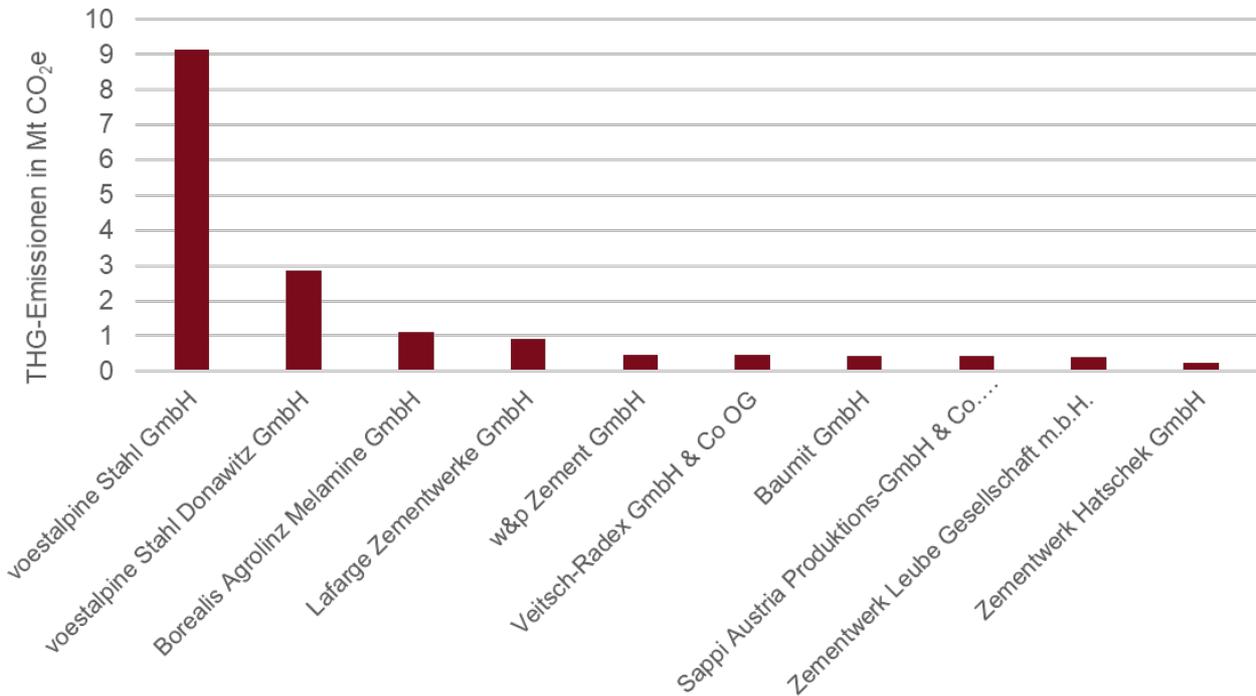


Abbildung 8: Die zehn größten Emittenten der österreichischen Industrie gemäß ETS-Datenbank 2019 (European Commission, 2020)

Abbildung 9 schlüsselt die THG-Emissionen der 13 Sektoren nach den verursachenden Energieträgern auf. Der Einsatz von Kohle und Koks im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung sticht mit ca. 9,6 Mt CO₂e hervor. Auch geogene CO₂ (prozessbedingte) Emissionen des Sektors Steine und Erden, Glas tragen als Einzelposten mit 2,9 Mt CO₂e wesentlich zu den THG-Emissionen der österreichischen Industrie bei. Über Erdgas bereitgestellte Endenergie führt in Summe zu Emissionen von 7 Mt CO₂e. Der Einsatz elektrischer Energie in der Industrie führt zu indirekten Emissionen von 7 Mt CO₂e. Diese Emissionen werden jedoch in offiziellen Publikationen des Umweltbundesamts oder der Statistik Austria dem Sektor Energie und nicht der Industrie angerechnet.

Abbildung 10 schlüsselt die THG-Emissionen nach Nutzenergiekategorien auf. Transformationsprozesse sind hier mit ca. 12,5 Mt CO₂e mit Abstand die größte THG-Quelle. Vergleicht man dies nun mit Abbildung 9, so ist zu erkennen, dass hierfür vor allem der Einsatz von Kohle und Koks im Eisen- und Stahlsektor als Reduktionsmittel für Eisenerz, geogene Emissionen im Sektor Steine und Erden, Glas verantwortlich sind. Im Sektor Chemie und Petrochemie wird Erdgas als Rohstoff für Folgeprodukte eingesetzt, wodurch auch in diesem Sektor THG-Emissionen durch Transformationsprozesse entstehen. Die für die Bereitstellung von Prozesswärme über 200 °C benötigte Endenergie ist für Emissionen von ca. 7,3 Mt CO₂e verantwortlich. Die für den Betrieb von Standmotoren eingesetzte Endenergie verursacht Emissionen von 5,8 Mt CO₂e, wobei hier bereits 86% der benötigten Endenergie durch Strom bereitgestellt werden. Somit verursacht diese Nutzenergiekategorie im Wesentlichen indirekte Emissionen im Sektor Energie. Prozesswärme unter 200 °C verursacht Emissionen von 3,0 Mt CO₂e.

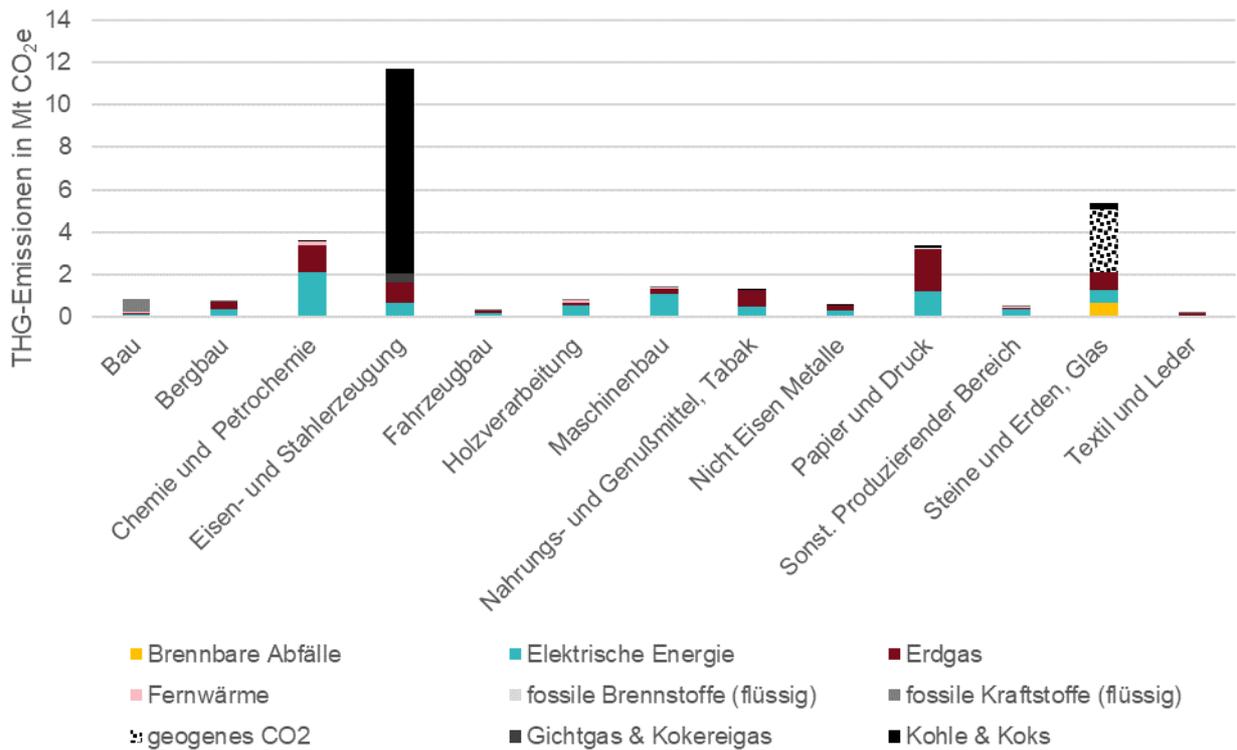


Abbildung 9: THG-Emissionen der 13 IEA Sektoren nach Energieträger, 2019. Eigene Darstellung basierend auf (Statistik Austria, 2020), (Umweltbundesamt, 2021) und eigenen Berechnungen.

Im Folgenden werden nun die energieintensiven Sektoren Eisen & Stahlerzeugung, Steine & Erden, Glas, Chemie & Petrochemie, und Papier & Druck im Detail beschrieben. Für eine vollständige Beschreibung aller 13 österreichischen Industriesektoren wird auf die Langfassung dieser Studie verwiesen.

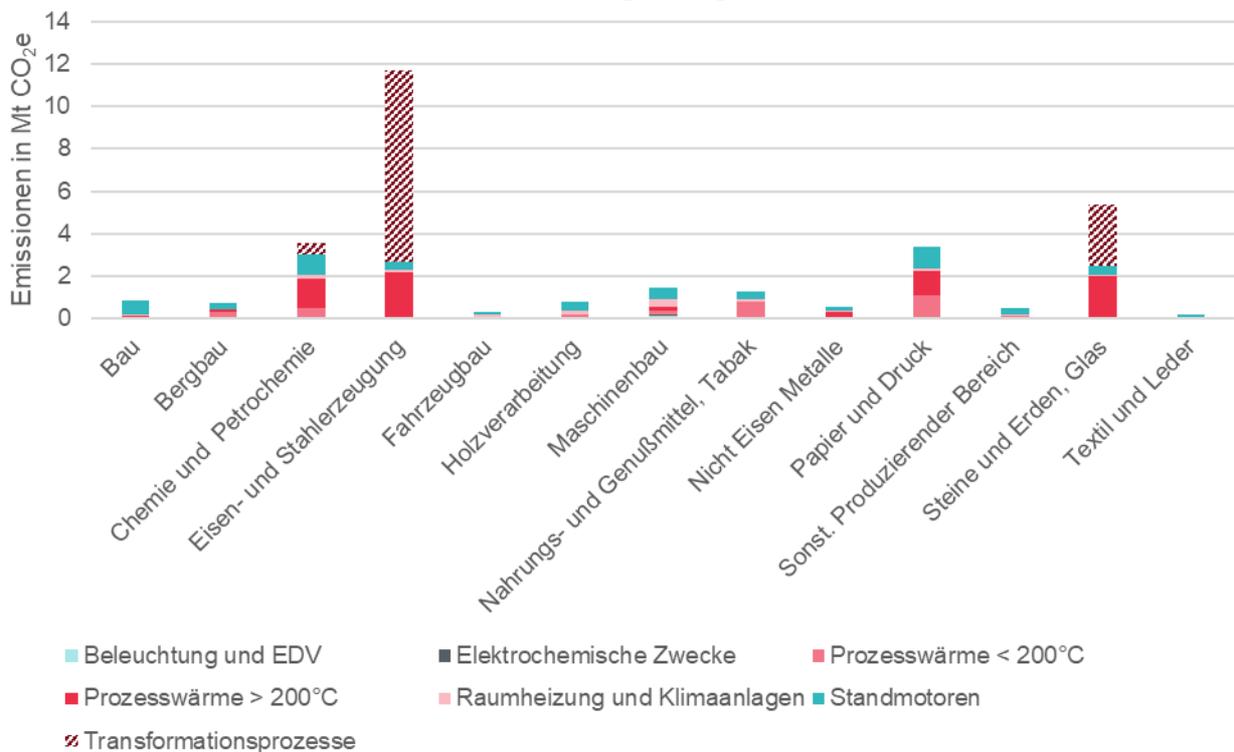


Abbildung 10: THG-Emissionen der 13 IEA Sektoren nach Nutzenergiekategorie, 2019. Eigene Darstellung basierend auf (Statistik Austria, 2020), (Umweltbundesamt, 2021) und eigenen Berechnungen.

3.4.1 Eisen- & Stahlerzeugung

Der Sektor Eisen- & Stahlerzeugung konzentriert sich in Österreich auf 52 Unternehmen, die in Summe 24 642 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 2,8 Mrd.€. Der Sektor Eisen- & Stahlerzeugung ist mit rund 12 Mt CO₂e und einem Gesamtenergiebedarf 2018 von rund 33 TWh der emissions- und energieintensivste Industriesektor Österreichs. Im Wesentlichen sind sämtliche Emissionen des Sektors im ETS enthalten. Die Emissionen werden von 3 Unternehmen verursacht, wobei hier die Voestalpine AG mit ihren Tochterfirmen für über 99% der Emissionen verantwortlich ist.

Anzahl Unternehmen	52
Beschäftigte	24 642
Wertschöpfung in Mio.€	2 757
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	11,9
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	46,0%

Der Sektor kann weiters in die Bereiche Primär-Stahlerzeugung und Sekundär-Stahlerzeugung aufgeteilt werden. Seine Energieflüsse sind im Sankey-Diagramm in Abbildung 12 dargestellt. Für die jährliche Erzeugung von 6 bis 7 Mt Stahl über die Hochofenroute (heute in Österreich die einzig angewendete Primärstahlroute) werden mehr als 25 TWh Kohle bzw. Koks benötigt. Um im Hochofen das in Sauerstoff-Verbindungen als Fe_xO_y gebundene Eisen gewinnen zu können, wird der darin enthaltene Kohlenstoff als Reduktionsmittel eingesetzt. Durch die Reaktion des ursprünglich im Eisenerz vorliegenden Sauerstoffs mit dem eingebrachten Kohlenstoff entsteht nach Ablauf aller relevanten Reaktionen das Treibhausgas CO₂.

Gemeinsam mit dem Einsatz fossiler Energieträger in Höhe von 7 TWh für die Deckung des Endenergiebedarfs der in Abbildung 11 dargestellten Nutzenergiekategorien trug die Primär-Stahlerzeugung im Jahr 2018 mit über 11,4 Mt CO₂e zur österreichischen THG-Bilanz bei. Der größte Anteil von 9,4 Mt wurde dabei prozessbedingt durch den oben beschriebenen Reduktionsvorgang verursacht.

In der Sekundär-Stahlerzeugung wird mithilfe von Elektrolichtbogenöfen und einigen wenigen gasbetriebenen Schmelzwannen jährlich etwa 1 Mt bereits als Stahlschrott eingebrachter Stahl eingeschmolzen und sekundärmetallurgisch aufbereitet. Bei dem hierbei entstehenden Energiebedarf sowie den verursachten CO₂-Emissionen handelt es sich um Parameter, die ausschließlich den Endenergiebedarfen der in Abbildung 11 dargestellten Nutzenergiekategorien zuzuordnen sind. Der energetische Endverbrauch sowie die daraus resultierenden THG-Emissionen der Sekundär-Stahlerzeugung sind in untenstehendem Diagramm als Teil des Gesamtsektors enthalten.

Analog zu den anderen Sektoren zeigt Abbildung 11 den Endenergieeinsatz und die dazugehörigen THG-Emissionen des Sektors. Aufgrund des vergleichsweise hohen stofflichen Einsatzes von Kohle und Koks zur Reduktion von Eisenerz ist dieses jedoch für diesen Sektor deutlich weniger aussagekräftig. Man sieht jedoch auch in Abbildung 11, dass in der Eisen- und Stahlerzeugung Endenergie in erster Linie für die Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme eingesetzt wird.

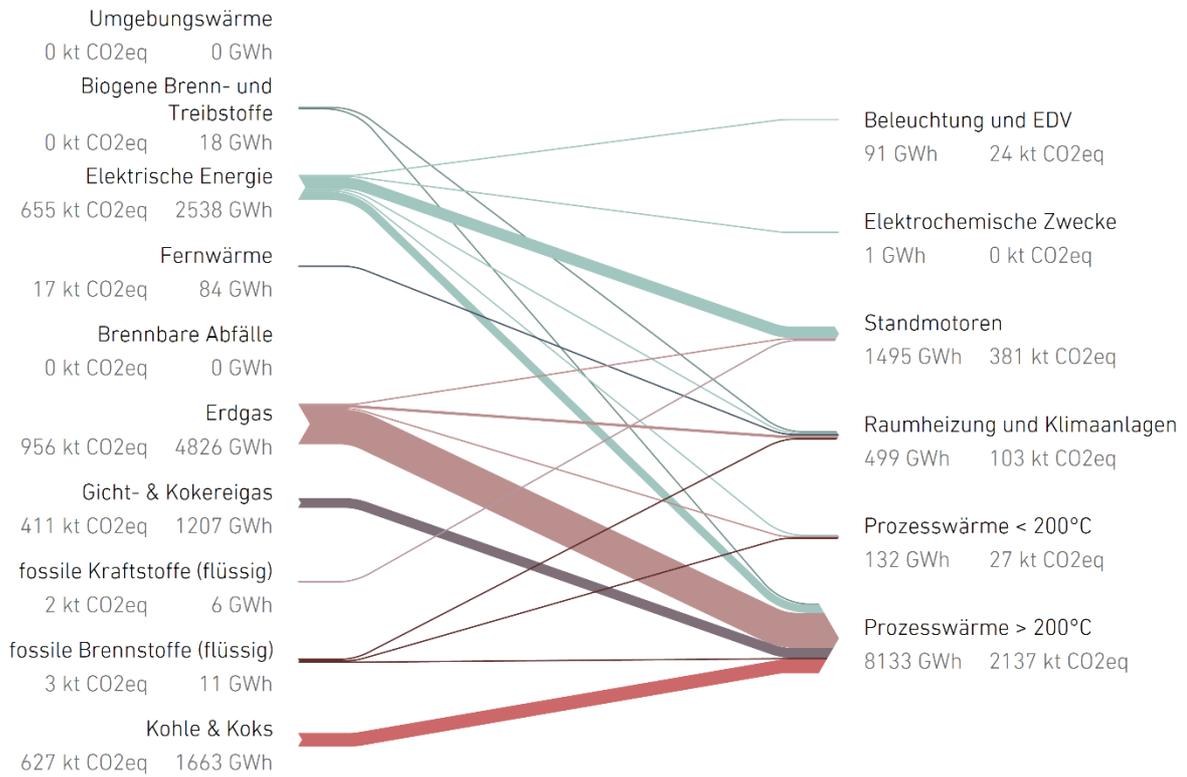


Abbildung 11: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Eisen- & Stahlerzeugung“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach (Statistik Austria, 2020), (Sejkora, Kühberger, Radner, Trattner, & Kienberger, 2020))

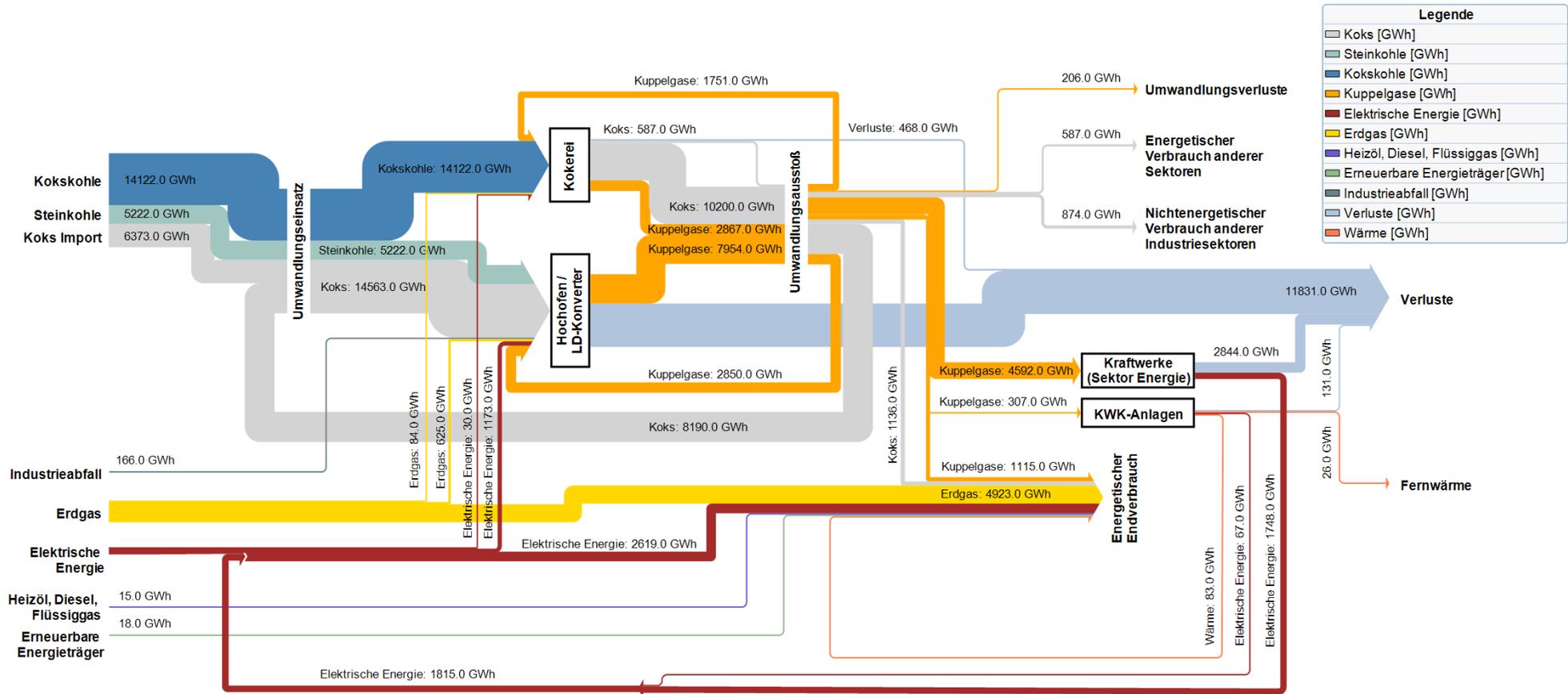


Abbildung 12: Energieflussdiagramm der Eisen- & Stahlerzeugung

3.4.2 Steine & Erden, Glas

Der Sektor Steine & Erden, Glas umfasst in Österreich 1 329 Unternehmen, die in Summe über 31 355 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 2,5 Mrd.€. Der Sektor Steine und Erden, Glas ist in Summe für 5,3 Mt CO_{2e} klimarelevanter THG-Emissionen verantwortlich und weist mit einem Anteil von 20% an den industriellen Gesamtemissionen in Österreich die zweithöchsten Sektoremissionen auf. 33 Unternehmen

Anzahl Unternehmen	1 329
Beschäftigte	31 355
Wertschöpfung in Mio.€	2 538
THG-Emissionen in Mt CO _{2e}	5,27
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	20,4%

des Sektors sind im ETS gelistet, welche gemeinsam für Emissionen von 4,1 Mt CO_{2e} verantwortlich sind. Über 60% der im ETS angeführten Emissionen sind der Herstellung von Zement zuzurechnen.

63% der Emissionen des Sektors ergeben sich aus prozessbedingten Emissionen, die aus der Umwandlung der eingesetzten mineralischen Rohstoffe entstehen (z.B. Umwandlung von Kalkstein CaCO₃ zu Branntkalk CaO und CO₂). Der Sektor stellt aus diesem Grund eine besondere Herausforderung bei der Dekarbonisierung der österreichischen Industrie dar. Der Sektor wird im National Inventory Report, wie in Tabelle 3 dargestellt, in 7 Subsektoren aufgeteilt, von denen die Zementindustrie mit wiederum 63% den Hauptteil der prozessbedingten Emissionen verursacht und deshalb untenstehend beispielhaft für den gesamten Sektor herangezogen wird (Umweltbundesamt, 2021).

Tabelle 3: Prozessbedingte THG-Emissionen im Sektor Steine & Erden, Glas, sowie seinen Subsektoren (Anderl, et al., 2020)

2018	Zemen t	Kalk	Magne sit	Glas	Ziegel	Dolomi t	Na ₂ CO ₃	Sektor Gesam t
Prozessemissionen in kt CO _{2e}	1827	544	365	38	105	19	10	2908
% der sektoralen Prozessemissionen	63 %	19%	13%	1%	4%	<1%	<0.5%	100%

Die neben den oben erläuterten prozessbedingten Emissionen entstehenden energiebedingten Emissionen der Zementindustrie betragen 2018 904 kt CO_{2e}. Sie sind damit für nur rund 1/3 der Gesamtemissionen des Subsektors verantwortlich. Wie in Abbildung 13 ersichtlich, zeichnet sich der Subsektor Zement durch einen europaweit im Spitzenfeld liegenden Anteil an Ersatzbrennstoffen im Energieträgermix aus, wobei vor allem der thermischen Verwertung von Kunststoffen und Altreifen besondere Bedeutung zukommt.

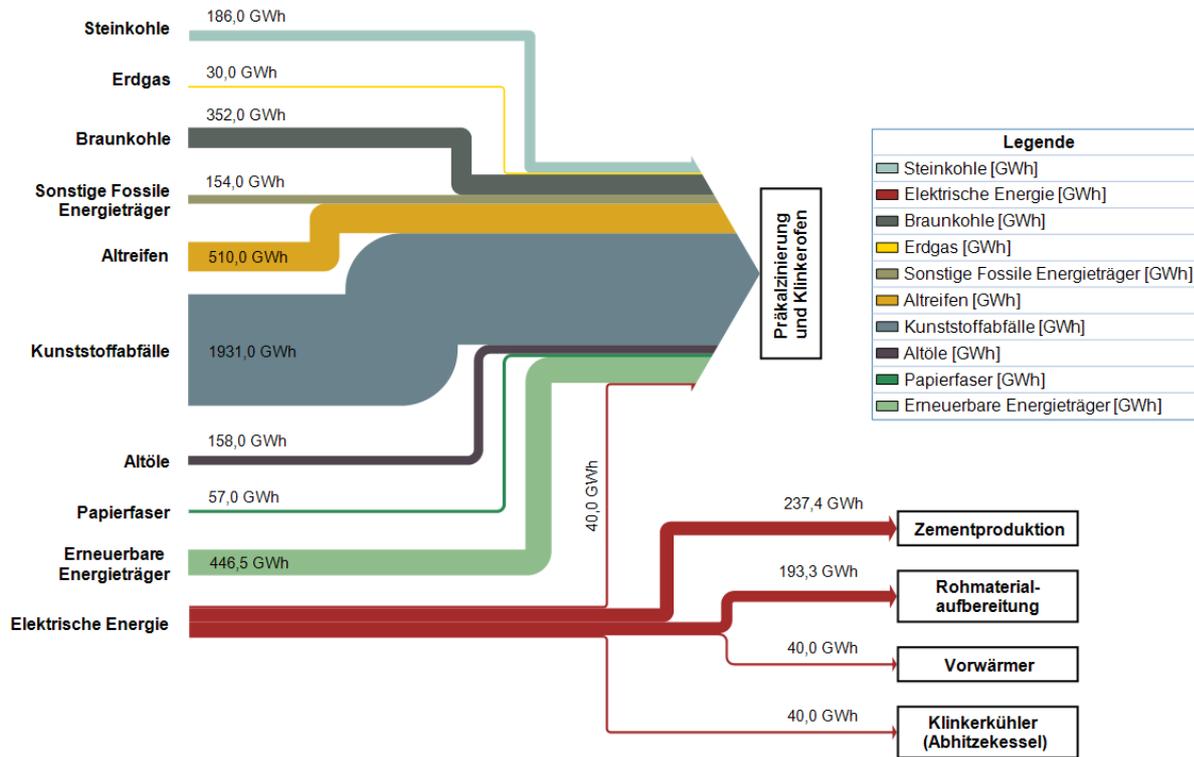


Abbildung 13: Energieflussdiagramm der Zementindustrie

Diese finden insbesondere in der Klinkerherstellung im Drehrohrofen bei Temperaturen über 1200 °C Anwendung. Hier wird das im Rohstoff Kalziumcarbonat (CaCO_3) enthaltene (geogene) Kohlendioxid durch die hohen Temperaturen ausgetrieben und das für die Zementproduktion benötigte CaO gewonnen. Das ausgetriebene CO_2 entweicht danach aus dem Ofen.

Auch die Prozessemissionen in den meisten anderen oben angeführten Subsektoren des Sektors Steine & Erden, Glas entstehen durch diesen temperaturabhängigen Austreibeprozess von im Ausgangsmaterial gebundenem (geogenem) CO_2 . Die energiebedingten Emissionen, sowie der zugrundeliegende Energiebedarf nach Energieträger und Nutzenergiekategorie können Abbildung 14 entnommen werden. Hier sieht man, dass vor allem die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme einen wesentlichen Anteil am gesamten Endenergiebedarf hat. Als Energieträger kommen hierfür Erdgas, brennbare Abfälle sowie Kohle und Koks zum Einsatz. All diese Energieträger führen zu klimarelevanten THG-Emissionen, ein Ersatz der derzeit eingesetzten Ersatzbrennstoffe hätte jedoch auch zur Folge, dass über eine anderweitige Verwertung oder Entsorgung entschieden werden müsste.

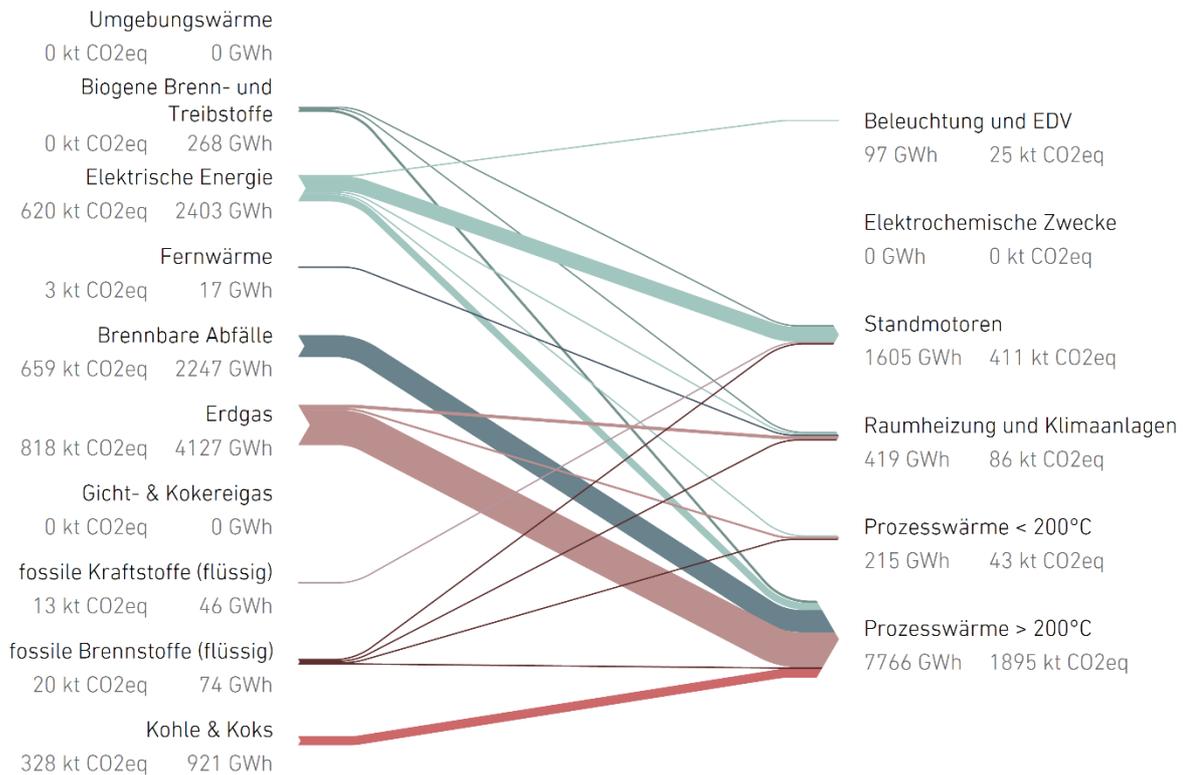


Abbildung 14: Endenergie - und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Steine und Erden, Glas“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach (Statistik Austria, 2020), (Sejkora, Kühberger, Radner, Trattner, & Kienberger, 2020))

3.4.3 Chemie- & Petrochemie

Der Sektor Chemie- und Petrochemie umfasst 520 Unternehmen, die in Summe 35 000 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 4,8 Mrd.€. Zehn Unternehmen der chemischen Industrie sind im ETS gelistet und emittieren gemeinsam ca. 1,8 Mt CO₂e.. Somit liegt dieser Sektor im Vergleich mit den anderen an dritter Stelle. Über 60% der im ETS gelisteten Emissionen (1,1 Mt CO₂e) entfallen auf die Produktion von Düngemittel und Stickstoffverbindungen.

Anzahl Unternehmen	520
Beschäftigte	35 051
Wertschöpfung in Mio.€	4 791
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	2,17
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	8,4%

An dieser Stelle sei explizit hervorgehoben, dass die Mineralölverarbeitung (z.B. Raffinerie Schwechat) laut internationaler Definition nicht im Sektor Chemie- und Petrochemie beinhaltet ist, sondern dem Sektor Energie zugeordnet wird.

Abbildung 15 zeigt den Endenergieeinsatz und die dazugehörigen THG-Emissionen des Sektors „Chemie- und Petrochemie“. In diesem Sektor wird vor allem für die Bereitstellung von Prozesswärme über 200 °C Endenergie benötigt, wobei hier bereits zu einem großen Anteil elektrische Energie verwendet wird. Auch die Standmotoren sind bereits größtenteils elektrifiziert. Mit 3,5 TWh ist Erdgas der bedeutendste fossile Energieträger, der in erster Linie für die Wärmebereitstellung eingesetzt wird. Zusätzlich werden 2,8 TWh Erdgas als Rohstoff für Transformationsprozesse eingesetzt. Diese stoffliche Nutzung ist im Endenergiefluss Diagramm nicht dargestellt. Wie auch in Abbildung 1 dargestellt, betragen die prozessbedingten Emissionen des Sektors im Jahr 2019 851 kt CO₂e.

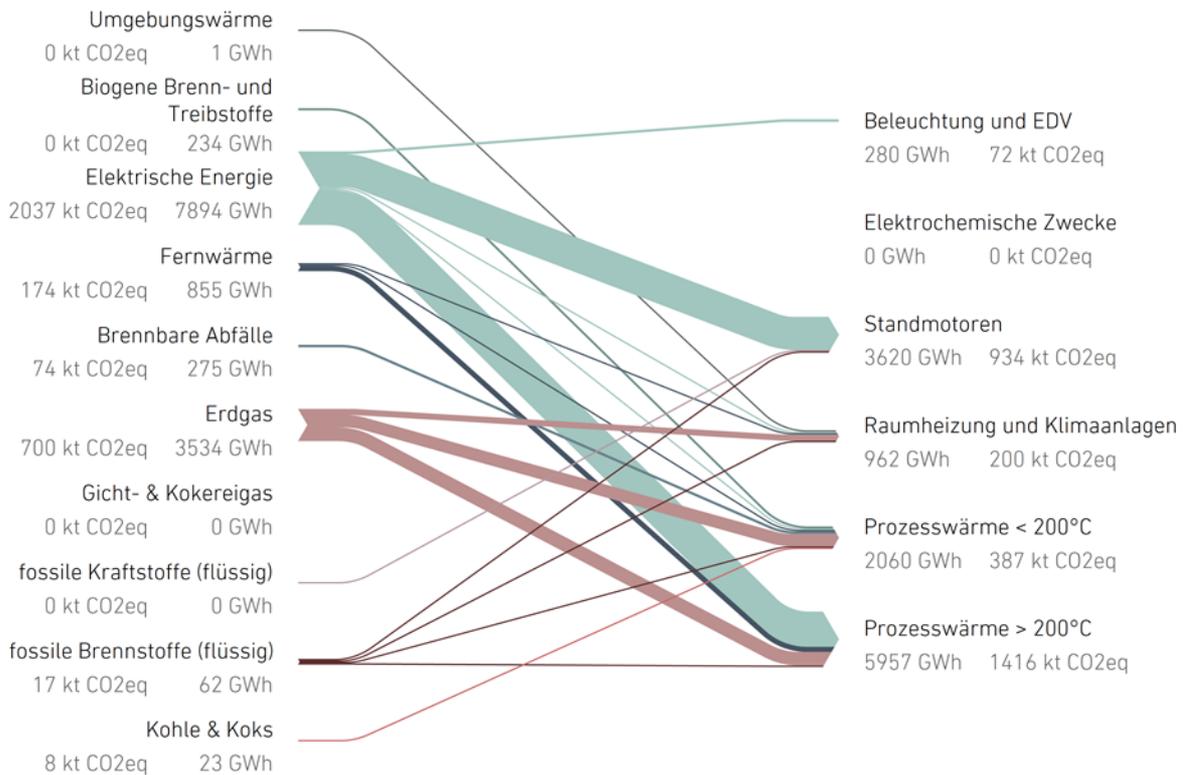


Abbildung 15: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Chemie- und Petrochemie“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach (Statistik Austria, 2020), (Sejkora, Kühberger, Radner, Trattner, & Kienberger, 2020))

3.4.4 Papier & Druck

Im Sektor Papier & Druck wird die Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus sowie die Herstellung von Druckerzeugnissen zusammengefasst, wobei die Herstellung von Papier und Pappe für 99,9% der fossilen THG-Emissionen verantwortlich ist (Statistik Austria, 2020). Die Produktion von Papier und Pappe umfasst 138 Unternehmen, die 31 355 ArbeitnehmerInnen beschäftigen und eine Bruttowertschöpfung von 2 Mrd.€ haben. 19 Unternehmen des Sektors sind im ETS gelistet und emittieren gemeinsam über 1,4 Mt CO_{2e}.

Anzahl Unternehmen	957
Beschäftigte	27 458
Wertschöpfung in Mio.€	2 791
THG-Emissionen in Mt CO _{2e}	1,98
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	7,7%

Der Sektor Papier & Druck ist in Summe für rund 2 Mt CO_{2e} verantwortlich und stellt daher mit einem Anteil von 7,7% an den industriellen Gesamtemissionen den viert-intensivsten Sektor dar.

Darüber hinaus ist dieser Sektor mit einem Gesamtenergiebedarf von über 22 TWh der zweitenergieintensivste Industriesektor Österreichs. Obwohl alle THG-Emissionen im Sektor Papier & Druck energiebedingt sind, nimmt der Sektor eine Sonderstellung bei der Betrachtung der THG-Emissionen ein, weil durch den chemischen Aufschluss von Holz der Energieträger Schwarzlauge im Sinne der Energiestatistik erst innerhalb der Sektorgrenze als Abfall anfällt und zum Energieträger wird. Dieser wird in weiterer Folge in unternehmenseigenen KWK-Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Diese aus Abbildung 17 abzulesende Eigenheit des Sektors, welche derzeit erhebliche Mengen von zugekauften Energieträgern spart, muss bei allen Dekarbonisierungsüberlegungen miteinbezogen werden.

Von den im Jahr 2018 rund 22 300 GWh Gesamtenergiebedarf des Sektors konnten mehr als die Hälfte durch die oben angesprochene Schwarzlauge innerhalb der sektoralen Bilanzgrenze gedeckt werden. Klimarelevante, energiebedingte THG-Emissionen in Höhe von rund 1 700 kt CO_{2e} rühren, wie aus den folgenden sektoralen Sankey-Diagrammen in Abbildung 17 und Abbildung 16 zu erkennen, hauptsächlich von der Verbrennung fossilen Erdgases her. In den statistischen Erhebungen derzeit noch angeführte Kohle wurde bzw. wird laut Unternehmensangaben des bisher größten Verbrauchers Sappi Gratkorn im Zeitraum 2020/2021 durch einen Mix aus Biomasse und CH₄ ersetzt.

Weiters ist zu beachten, dass die statistische Erhebung zwischen dem Brennstoffeinsatz in KWK-Anlagen für die Dampferzeugung und für die Stromerzeugung unterscheidet. Für die Untersuchung der Dekarbonisierungsstrategien wird die in der KWK-Anlage eigentlich gemeinsam erfolgte Wärme- und

Stromerzeugung getrennt voneinander betrachtet, um den stark unterschiedlichen Anforderungen an die Elektrizitäts-, bzw. Dampferzeugung Rechnung tragen zu können. Aufgrund der angesprochenen Methodik bei der statistischen Erhebung kann in der in Abbildung 16 dargestellten Nutzenergieanalyse nur der Energieträgereinsatz für die Dampferzeugung abgelesen werden (welche die Dampferzeugung in der KWK-Anlage beinhaltet), nicht jedoch der Energieeinsatz, welcher für die Stromerzeugung benötigt wird. Die in den unternehmenseigenen Anlagen gewonnene elektrische Energie ist in der Nutzenergieanalyse lediglich implizit durch einen verringerten Strombedarf ersichtlich.

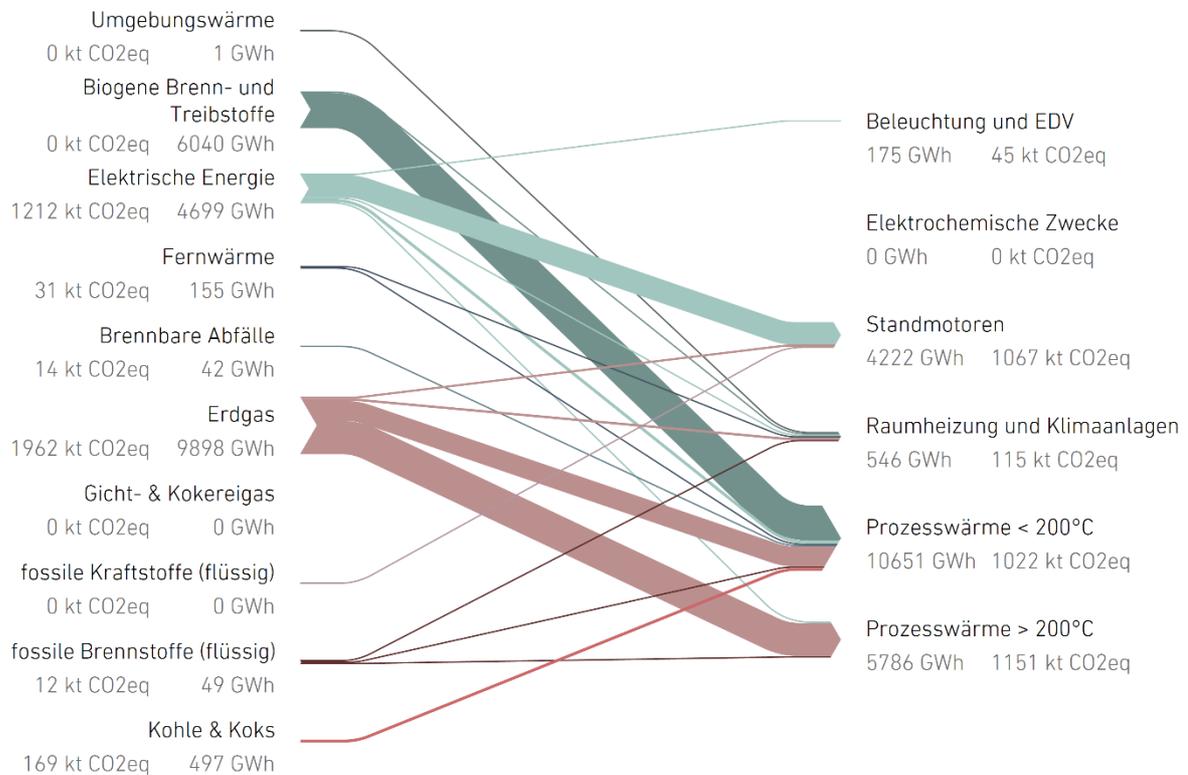
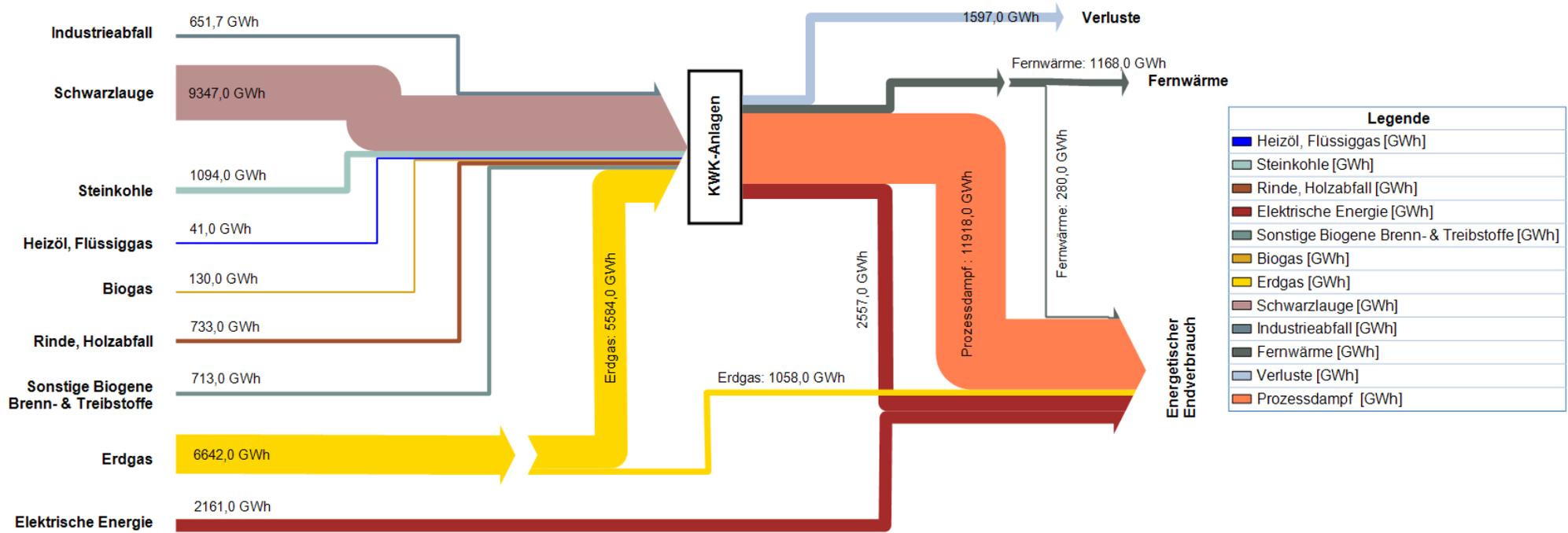


Abbildung 16: Endenergie - und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Papier & Druck“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach (Statistik Austria, 2020), (Sejkora, Kühberger, Radner, Trattner, & Kienberger, 2020))



Legende	
■	Heizöl, Flüssiggas [GWh]
■	Steinkohle [GWh]
■	Rinde, Holzabfall [GWh]
■	Elektrische Energie [GWh]
■	Sonstige Biogene Brenn- & Treibstoffe [GWh]
■	Biogas [GWh]
■	Erdgas [GWh]
■	Schwarzlauge [GWh]
■	Industrieabfall [GWh]
■	Fernwärme [GWh]
■	Verluste [GWh]
■	Prozessdampf [GWh]

Abbildung 17: Energieflussdiagramm des Sektors Papier & Druck. Eigene Darstellung

4 TECHNISCHES DEKARBONISIERUNGSPOTENTIAL

Im Folgenden werden die ermittelten technischen Dekarbonisierungspotentiale der oben beschriebenen 4 Sektoren mit den höchsten THG-Emissionen im Detail behandelt. Eine vollständige Analyse aller 13 Sektoren ist in der Langfassung dieser Studie zu finden.

Um die vollständige Dekarbonisierung der österreichischen Industrie zu unterstützen und Dekarbonisierungsstrategien aufzuzeigen, wird im Folgenden das technische Dekarbonisierungspotential der Sektoren nach vier, untenstehend gelisteten, Dekarbonisierungsstrategien aufgezeigt:

- **Elektrifizierung**
 - Wärmepumpen für Raumheizung und Klimaanlage (COP 3), und Prozesswärme kleiner 200 °C (COP 2,5)
 - Elektrisch angetriebene Standmotoren
- **CO₂-neutrale Gase**
 - Wasserstoff (aus Elektrolyse oder Methanpyrolyse) sowie Bio-CH₄ für Raumheizung und Klimaanlage, und Prozesswärme kleiner, bzw. größer als 200 °C sowie sektorspezifische Technologien nach Prozessbedarf
- **Carbon Capture**
 - Sektorspezifische Technologien
- **Kreislaufwirtschaft** (für ausgewählte emissionsintensive Sektoren)
 - Vermehrter Einsatz von End-of-Life-Produkten in sektorspezifischen Produktionsprozessen

4.1 Technische Dekarbonisierungspotentiale der Sektoren

4.1.1 Eisen- & Stahlerzeugung

In der Eisen- & Stahlerzeugung liegt allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von sowohl energiebedingten als auch prozessbedingten Emissionen zu Grunde. Der Einsatz von Carbon Capture-Technologien, um vollständige Dekarbonisierung zu erreichen, ist in diesem Sektor aufgrund der heute schon bestehenden Alternativtechnologie Direktreduktion/Elektrolichtbogenofen (abgekürzt DRI/EAF; in Tabelle 4 mit roter Umrahmung markiert) in dieser Studie hintanzustellen.

Die Dekarbonisierung der Nutzenergiekategorien, wie sie in Tabelle 4 dargestellt ist, weist bei Elektrifizierung einen mittleren Umstellungsaufwand auf, während der Einsatz CO₂-neutraler Gase einen geringen Aufwand innerhalb des betrachteten Bilanzrahmens mit sich bringt. Technologien wie Direktreduktion von Eisenerz in Kombination mit Elektrolichtbogenofen erfordern eine grundlegende Veränderung des Produktionsprozesses und werden mit hohem Umstellungsaufwand bewertet.

Tabelle 4: Übersicht der Dekarbonisierungsstrategien im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung

Dekarbonisierungsstrategie	Emissionsursprung		Technologie	Anwendungsbereiche
Elektrifizierung	Energiebedingte Emissionen		Einsatz von (Hochtemperatur)-Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme < 200 °C
	Energiebedingte Emissionen		Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren
	In Verbindung mit DR-Route bzw. vermehrtem Schrotteinsatz		Elektrolichtbogenofen (EBO)	Stahlerzeugung in Verbindung mit Schrotteinsatz und Eisen aus Direktreduktion
CO ₂ -neutrales Gas	Prozessbedingte Emissionen		Direktreduktion von Eisenerz mit CO ₂ -neutralen, grünen Gasen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen
	Energiebedingte Emissionen		H ₂ (aus Elektrolyse oder Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C
	Energiebedingte Emissionen		H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C
	Energiebedingte Emissionen		Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C
Carbon Capture				
Kreislaufwirtschaft	Prozessbedingte Emissionen		<u>mittels</u> Elektrolichtbogenofen	Vermehrter Einsatz von Schrott im EBO zur Stahlherstellung

 Niedriger Umstellungsaufwand

 Mittlerer Umstellungsaufwand

 Großer Umstellungsaufwand

 Keine Option

Die Dekarbonisierung der Nutzenergieprozesse Raumklima und Warmwasser, sowie Prozesswärme < 200 °C durch Wärmepumpen kann eine energiebedingte THG-Reduktion von bis zu 85 kt CO₂e erreichen. Für Prozesstemperaturen über 200 °C ist der Einsatz von CO₂-neutralen Gasen notwendig. Werden alle Temperaturniveaus sowie die Standmotoren über CO₂-neutrale Gase gedeckt, wäre eine Reduktion energiebedingter Emissionen in Höhe von maximal 1 989 kt CO₂e möglich.

Durch die Einbeziehung der Vorketten bei der Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse oder Pyrolyse ergeben sich, wie in Tabelle 5 dargestellt, Verringerungen im Einsparungspotential von bis zu 500 kt CO₂e. Der Einsatz von Elektrolichtbogenöfen, obwohl auf Basis von elektrischer Energie, wird im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung in Verbindung mit der Direktreduktion betrachtet, und scheint deshalb nicht in Tabelle 5, sondern in Tabelle 6 bei der Diskussion der prozessbedingten Emissionen auf.

Neben der oben ausgeführten Vermeidung energiebedingter Emissionen, nehmen die Elektrifizierung und der Einsatz CO₂-neutraler Gase vor allem bei der Vermeidung der Prozessemissionen (Tabelle 6) eine besonders wichtige Rolle ein. Durch den Ersatz der traditionellen Hochofenroute mit LD-Konverter durch H₂- oder CH₄-basierte Direktreduktion in Verbindung mit Elektrolichtbogenöfen können so im Betrieb mit CO₂-neutralen Gasen bis zu 10 Mt CO₂e eingespart werden, wobei auch hier die Berücksichtigung der Vorkette bei der Erzeugung des ggf. zum Einsatz kommenden Wasserstoffs eine gewichtige Rolle einnimmt. Wird der oben dargelegte EU-Strommix mit einer CO₂-Intensität von 56 g CO₂/kWh Strom der Wasserstoff-Herstellung mittels Elektrolyseurs zugrunde gelegt, reduziert sich der angegebene Wert nämlich bereits um 1430 kt CO₂e. Im Fall der H₂-Erzeugung mittels Methanpyrolyse beträgt dieser Wert immerhin noch knapp 300 kt CO₂e.

Tabelle 5: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung

Reduktion der energiebedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 339 Elektr. Energie: + 100	- 62
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 127 Elektr. Energie: + 42	- 23
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 94 Elektr. Energie: + 44	- 17
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 339 H ₂ : + 305 dafür el. Energie: + 427	- 44
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: -127 H ₂ : +114 dafür el. Energie: +160	- 16
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 7154 H ₂ : + 6438 dafür el. Energie: + 9014	- 1382
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 339 H ₂ : + 305 dafür CH ₄ : + 570 dafür el. Energie: +87	- 61
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 127 H ₂ : + 114 dafür CH ₄ : +213 dafür el. Energie: + 33	- 23
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 7154 H ₂ : + 6438 dafür CH ₄ : + 12040 dafür el. Energie: + 1837	- 1666
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 339 Bio-CH ₄ : + 339	- 68
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 127 Bio-CH ₄ : + 127	- 25
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 7154 Bio-CH ₄ : + 7154	- 1887

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

In Bezug auf den vermehrten Einsatz von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen ist in Tabelle 6 zu sehen, dass im Betrieb des Direktreduktionsprozesses mit vollständig CO₂-neutralem Gas die CO₂-Neutralität des Prozesses weitgehend erhalten bleibt und sich lediglich die Energiebilanz verändert. Die ausgewiesene, geringfügige Erhöhung der THG-Emissionen ist auf einen erhöhten Strombedarf bei der Sekundärmetallurgie zurückzuführen. Diese geringe Verschlechterung muss jedoch in jedem Fall im Kontext der Energie- und Ressourceneinsparung beim vermehrten Einsatz von Schrottreycling gesehen werden. So bedeutet eine Erhöhung des Schrotteinsatzes um 50% in der DRI/EAF-Route Primärenergieeinsparungen von 15 bis 30 TWh pro Jahr. Die Höhe der Einsparungen richtet sich wiederum nach der zugrunde gelegten Vorkette bei der Erzeugung des Wasserstoffs.

Tabelle 6: Technische Potentiale zur Verringerung der prozessbedingten Emissionen im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung

Reduktion der prozessbedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
CO ₂ -neutrales Gas	Direktreduktion von Eisenerz mittels Bio-CH ₄ in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	Kohle/Koks: - 26777 Bio-CH ₄ : + 31062 Elektr. Energie: + 3983	- 9977
	Direktreduktion von Eisenerz mittels H ₂ (Elektrolyse) in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 18235 dafür el. Energie: 25530 Bio-CH ₄ : + 3726 Elektr. Energie: + 3985	- 8547
	Direktreduktion von Eisenerz mittels H ₂ (Pyrolyse) in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 18235 dafür CH ₄ : + 34100 dafür el. Energie: + 5197 Bio-CH ₄ : + 3726 Elektr. Energie: + 3985	- 9686
Kreislaufwirtschaft	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von Bio-CH ₄	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	Kohle/Koks: - 26777 Bio-CH ₄ : + 15531 Elektr. Energie: + 4497	- 9948
	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von H ₂ (Elektrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 9118 dafür el. Energie: +12765 Bio-CH ₄ : + 1863 Elektr. Energie: + 4499	- 9233
	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von H ₂ (Pyrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 9118 dafür CH ₄ : + 17050 dafür el. Energie: + 2599 Bio-CH ₄ : + 1863 Elektr. Energie: + 4499	- 9803

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

Aus den oben gezeigten Berechnungen ist zu schließen, dass die Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlerzeugung insbesondere über den Einsatz CO₂-neutraler Gase (gesamt rund 9 bis 11 Mt CO₂e) realisiert werden kann. Deren Bedarf kann durch den Einsatz von Elektrifizierungsmaßnahmen im unteren Temperaturbereich und erhöhte Recyclingraten jedoch signifikant verringert werden. Hervorzuheben ist, dass der erhöhte Einsatz von Schrott im Elektrolichtbogenofen im Vergleich zum aus Direktreduktion gewonnenen Eisenschwamm hauptsächlich Einfluss auf die Energieintensität der Stahlherstellung nimmt, während die Klimaneutralität bereits durch die Direktreduktion mit CO₂-neutralen Gasen gegeben ist.

4.1.2 Steine & Erden, Glas

Im Sektor Steine und Erden, Glas kommt aufgrund der Notwendigkeit, CO₂-verursachende Mineralstoffe in den Produktionsprozess einbringen zu müssen, der Vermeidung prozessbedingter Emissionen mittels Carbon Capture eine besondere Rolle zu. Neben der Betrachtung der anderen Dekarbonisierungsstrategien werden in Bezug auf Carbon Capture in diesem Bericht zwei der aussichtsreichsten Technologien untersucht.

Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, kann die Dekarbonisierung der Nutzenergieprozesse Raumheizung und Klimaanlage, sowie Prozesswärme <200 °C eine energiebedingte THG-Reduktion von 100 – 110 kt CO₂e erreichen. Das Einsparungspotential durch die Elektrifizierung der industriellen Standmotoren im Sektor Steine und Erden, Glas beträgt lediglich 11 kt CO₂e. Aufgrund der in Abbildung 13 dargestellten Prozesse, ist zur Dekarbonisierung von Prozesstemperaturen über 200 °C der Einsatz von CO₂-neutralen Gasen notwendig. Dadurch wäre, je nach Technologie, eine Reduktion energiebedingter Emissionen zwischen 1714 und 1233 kt CO₂e möglich.

Tabelle 7: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Steine & Erden, Glas

Reduktion der energiebedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 346 Elektr. Energie: + 102	- 63
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 209 Elektr. Energie: + 69	- 38
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 47 Elektr. Energie: + 22	- 11
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 346 H ₂ : + 311 dafür el. Energie: + 436	- 45
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 209 H ₂ : + 188 dafür el. Energie: + 263	- 27
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 6813 H ₂ : + 6131 dafür el. Energie: + 8584	- 1233
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 346 H ₂ : + 312 dafür CH ₄ : + 582 dafür el. Energie: + 89	- 62
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 209 H ₂ : + 188 dafür CH ₄ : + 352 dafür el. Energie: + 54	- 37
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 6813 H ₂ : + 6131 dafür CH ₄ : + 11466 dafür el. Energie: + 1749	- 1568
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: -346 Bio-CH ₄ : - 346	- 69
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: -209 Bio-CH ₄ : - 209	- 41
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 6813 Bio-CH ₄ : + 6813	- 1714

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie
Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

Um eine möglichst vollständige Dekarbonisierung zu erreichen, ist die Emissionsreduktion mittels Carbon Capture in diesem Sektor alternativlos (Tabelle 8). Die meisten derzeit in Frage kommenden Technologien weisen Abscheidungsraten für CO₂ von 90-95% auf, wobei auch energiebedingte CO₂-Emissionen die bei der Bereitstellung der für die Austreibung notwendigen Temperaturen anfallen, gebunden werden könnten (Anantharaman, et al., 2018). Größere Unterschiede gibt es jedoch neben ihrer bereits erwähnten grundsätzlichen Systemeinbindung (integriert, mit der Möglichkeit, Systemeffizienzen zu verbessern, oder dem Prozess nachgestellt (End-of-pipe)) und dem dafür notwendigen Umstellungsaufwand in ihren jeweiligen Energieintensitäten. So benötigt beispielsweise die dem traditionellen Kalzinierungsprozess im Drehrohrföfen nachgeschaltete Aminwäsche mehr als die doppelte Menge elektrischer Energie als die Oxyfuel-Technologie, die zusätzliches Systemoptimierungspotential in Bezug auf Sauerstoffproduktion und -verwendung im Betrieb bietet. Dadurch ergibt sich bei Zugrundelegung des EU-Strommix aus (European Commission, 2020) ein verringertes CO₂-Reduktionspotential von etwa 40 kt. Bei der Betrachtung von Dekarbonisierungspotentialen durch Carbon Capture ist es wichtig zu betonen, dass in vorliegender Studie die Verwertung des in weiterer Folge abgeschiedenen Treibhausgases nicht untersucht wurde. Diese kann gegebenenfalls Energiebedarfe und THG-Emissionen in anderen Wirtschaftssektoren oder Nationen verursachen und zusätzliche Kosten verursachen.

Prozessbedingte THG-Emissionen können im Subsektor Zementerzeugung zudem durch den vermehrten Einsatz von rezykliertem Beton verringert werden. Bei der Berechnung des technischen Recyclingpotentials wurde dabei basierend auf (Müller, 2006) angenommen, dass im Jahr 2040 ausreichend Beton am Ende seiner Lebenszeit zur Verfügung steht, um eine Reduktion des benötigten Primärzements von rund 28% zu ermöglichen (Nusselder, et al., 2015). Unter Zugrundelegung des derzeitigen Energieträgermix (dargestellt in

Abbildung 13) für die benötigte Trocknung des Rezyklats nach (Sousa & Bogas, 2021) kann lediglich eine Einsparung von bis zu 90 kt CO_{2e} erreicht werden. Wird dieser Mix jedoch entsprechend einer Verwendung von reinem Bio-CH₄ für die Trocknung verändert, erhöht sich das Einsparungspotential auf bis zu 804 kt CO_{2e}. Anders als im Sektor Eisen & Stahl, bringt im Sektor Zement der erhöhte Einsatz von Rezyklat in jedem Fall eine Einsparung von prozessbedingten Emissionen durch den Wegfall eines Teils des ansonsten notwendigen Kalziumkarbonats im Produktionsprozess ersetzt werden kann, welcher ohne Carbon Capture-Technologien auch beim Einsatz überwiegend treibhausgasneutraler Energieträger Emissionen in diesem Sektor verursacht.

Tabelle 8: Technische Potentiale zur Verringerung der prozessbedingten Emissionen im Sektor Steine & Erden, Glas

Reduktion der prozessbedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO _{2e}
Carbon Capture	Oxyfuel-Verbrennung	Erzeugungsprozess	Elektr. Energie: + 676	- 2490
	Aminwäsche mit Wärmepumpe	Erzeugungsprozess	Elektr. Energie: + 1421	- 2449
Kreislaufwirtschaft	Recyclingeinsatz von Beton mit derzeitigem Fuel-Mix	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	CH ₄ : + 47 Abfall: + 1131 Kohle: +260 Heizöl: +9 Biogene: +19	- 90
	Recyclingeinsatz von Beton mit Einsatz Bio-CH ₄	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	Bio-CH ₄ : + 1466	- 827
	Recyclingeinsatz von Beton mit Einsatz H ₂ (Elektrolyse)	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	H ₂ : + 1466 dafür el. Energie: + 2052	- 712
	Recyclingeinsatz von Beton mit Einsatz H ₂ (Pyrolyse)	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	H ₂ : +1466 dafür CH ₄ : + 2741 dafür el. Energie: + 418	- 804

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

Wie gezeigt ist neben der Verringerung der energiebedingten Emissionen insbesondere die Dekarbonisierung des Herstellungsprozesses und dessen prozessbedingter Emissionen der Schlüssel zum Erfolg im Sektor Steine und Erden, Glas.

Die Dekarbonisierung basiert deshalb wie bereits ausgeführt zum größten Teil auf der Anwendung einer der Carbon Capture-Strategie zuzuordnenden Technologie, beispielsweise Oxyfuel oder Aminwäsche, wobei auch das Potential zu schließender Stoffkreisläufe ob des zu erwartenden Gesamtbeitrags zur Ressourcenschonung als durchaus wesentlich einzustufen ist.

4.1.3 Chemie- & Petrochemie

Auch dem Sektor Chemie- und Petrochemie liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Die Dekarbonisierungspotentiale werden aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt und sind in Tabelle 9 angeführt.

Wie in Kapitel 3.4.3 aufgezeigt, werden in diesem Sektor Emissionen in erster Linie durch die Bereitstellung von Prozesswärme verursacht, wobei die Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme bereits mehrheitlich elektrifiziert ist. Eine Umstellung der Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme auf CO₂-neutrale Gase bringt ein Einsparungspotential zwischen 237 und 204 kt CO_{2e} mit sich. Der Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen für die Bereitstellung von Niedertemperaturprozesswärme ermöglicht eine THG-Reduktion von 323 kt CO_{2e}. Durch den Einsatz erneuerbarer Gase lassen sich bis zu 354 kt CO_{2e} einsparen. Durch den hohen Elektrifizierungsgrad der Standmotoren ist in dieser Nutzenergiekategorie kaum mehr Reduktionspotential vorhanden.

Tabelle 9: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Chemie- und Petrochemie

Reduktion der energiebedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 705 Elektr. Energie: 208	- 130
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 1666 Elektr. Energie: + 553	- 323
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 0,4 Elektr. Energie: + 0,2	- 0,1
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 705 H ₂ : + 634 dafür el. Energie: + 94	- 92
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 1666 H ₂ : + 1499 dafür el. Energie: + 2099	- 181
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1523 H ₂ : + 1371 dafür el. Energie: + 1919	- 237
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 705 H ₂ : + 634 dafür CH ₄ : + 1186 dafür el. Energie: + 181	- 126
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 1666 H ₂ : + 1499 dafür CH ₄ : + 2804 dafür el. Energie: + 428	- 319
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1523 H ₂ : + 1371 dafür CH ₄ : + 2564 dafür el. Energie: + 391	- 271
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 705 Bio-CH ₄ : + 705	- 141
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 1666 Bio-CH ₄ : + 1666	- 354
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1523 Bio-CH ₄ : + 1523	- 304

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

Der Sektor Chemie nutzt aktuell bedeutende Mengen an fossilen Grundstoffen zur Produktion chemischer Produkte. Hier kommt es einerseits direkt bei den Herstellungsprozessen zu prozessbedingten Emissionen. Andererseits wird bei der Entsorgung und Verbrennung chemischer Produkte, die aus fossilen Rohstoffen erzeugt wurden, in Folge fossiles, und damit klimarelevantes, CO₂ freigesetzt. Da diese THG-Emissionen erst bei der thermischen Verwertung der Produkte entstehen, werden die Emissionen dem Sektor zugewiesen der die Verbrennung durchführt (z.B. Abfallwirtschaft).

Geht man nun davon aus, dass auch diese klimarelevanten Emissionen vermieden werden sollen, hat dies einen signifikanten Einfluss auf die Produktionsprozesse der chemischen Industrie. Daher wird im Folgenden der Einfluss alternativer Produktionsprozesse der chemischen Industrie für die wichtigsten chemischen Grundstoffe analysiert. Für eine detaillierte und umfassende Analyse zur Dekarbonisierung der chemischen Industrie wird auf (Andreas Windsperger, 2018) verwiesen.

4.1.3.1 Methanol aus grünem Wasserstoff

Derzeit werden in Österreich 28,7 kt Methanol produziert (Andreas Windsperger, 2018), die zu THG Emissionen von ca. 15 kt CO₂e führen⁹. Zur Produktion des Methanols wird Erdgas als Ausgangsstoff mit einem

⁹ eigene Berechnung auf Basis der in Österreich angewandten Produktionsprozessen.

äquivalenten Energiegehalt von 80 GWh stofflich verwendet. Dies erfolgt in erster Linie in Steamreformern, die aus Erdgas Wasserstoff und CO sowie CO₂ erzeugen.

Zur Dekarbonisierung der Methanolproduktion hat DECHEMA (DECHEMA, 2019) eine Produktionsroute über grünen Wasserstoff für Deutschland analysiert. Skaliert man diese Analyse für die österreichischen Produktionsvolumina, so würden für die Herstellung von klimaneutralem Methanol 5,4 kt Wasserstoff mit einem Energiegehalt von 180 GWh benötigt werden. Wird dieser Wasserstoff mittels Elektrolyse produziert, wäre elektrische Energie im Ausmaß von 252 GWh erforderlich.

4.1.3.2 Olefine aus grünem Methanol (Methanol-to-Olefine)

Olefine werden unter anderem als Ausgangsstoffe für die Kunststoffproduktion benötigt. Aktuell werde Olefine in Raffinerien aus Erdöl gewonnen. In Österreich werden derzeit 1290 kt Olefine pro Jahr produziert (Umweltbundesamt, 2021). Alternativ können Olefine aus Methanol, welches wiederum u.a. aus grünem Wasserstoff produziert werden kann, hergestellt werden. DECHEMA (DECHEMA, 2019) hat diese sogenannte Methanol-to-Olefine Route für Deutschland analysiert. Skaliert man diese Technologie auf die österreichischen Produktionsvolumina, so wären ca. 29 TWh elektrischer Energie notwendig um einerseits den benötigten Wasserstoff mittels Elektrolyse herzustellen und andererseits um den Produktionsprozess zu betreiben.

4.1.3.3 Ammoniak aus grünem Wasserstoff

Ammoniak dient als Ausgangsstoff für die Produktion von Düngemitteln, Salpetersäure, Melamin und anderen Stickstoffverbindungen und ist eine bedeutende THG-Quelle in der chemischen Industrie. Einen wesentlichen Anteil an den hohen THG-Emissionen der Ammoniakproduktion ist Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas. Dabei Erdgas (im Wesentlichen CH₄) in Wasserstoff (H₂) und CO₂ aufgespalten.

In Österreich werden aktuell 553 kt Ammoniak hergestellt. Um diese Menge klimaneutral produzieren zu können wären 98,2 kt Wasserstoff notwendig¹⁰. Dies entspricht einem Energiegehalt von 3,3 TWh. Berücksichtigt man nun die Verluste der Elektrolyse, so wären 4,6 TWh elektrische Energie notwendig.

4.1.4 Papier & Druck

Das technische Dekarbonisierungspotential im Sektor Papier und Druck basiert auf der Vermeidung der in diesem Sektor anfallenden energiebedingten Emissionen. Der Einsatz von Carbon Capture-Technologien um vollständige Dekarbonisierung zu erreichen ist in diesem Sektor aufgrund der heute schon bestehenden Alternativtechnologien in dieser Studie hintanzustellen. In Bezug auf den vermehrten Einsatz von Altpapier in der österreichischen Papierindustrie können zum derzeitigen Stand aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen Produktpalette und Faserlebensdauer über mehrere Produktionszyklen keine quantitativen Aussagen gemacht werden.

Tabelle 10 zeigt, dass die Dekarbonisierung der Nutzenergieprozesse Raumheizung und Klimaanlage, sowie die Elektrifizierung der Standmotoren je rund 70 kt CO₂e-Reduktion erreichen können. Weitaus höher liegt das Potential jedoch im Prozesswärmebedarf bis 200 °C, bei dem, je nach Energieträger und dafür benötigter Vorkette beinahe 800 kt CO₂e eingespart werden können. Im Temperaturbereich über 200 °C liegt das Einsparungspotential dank der CO₂-neutralen Gase Bio-CH₄ und H₂ zwischen 1140 und 735 kt CO₂e. Für den Ersatz der für die Stromerzeugung notwendigen, energetisch höherwertigen Energieträger, die bisher in den betriebseigenen KWK-Anlagen eingesetzt wurden, liegt das technische Dekarbonisierungspotential aufgrund derselben Unterschiede in der Produktions-Vorkette bei 270 bis 383 kt CO₂e.

Die Dekarbonisierung im Sektor Papier und Druck erfolgt über die Verringerung der energiebedingten Emissionen. Dafür stehen über ein breites Anwendungsfeld sowohl Elektrifizierung als auch CO₂-neutrale Gase zur Verfügung. Für Prozesse über 200 °C können ausschließlich CO₂-neutrale Gase eingesetzt werden. Für alle alternativen Energieträger muss auch hier beachtet werden, dass die dafür notwendigen Vorketten für deren Bereitstellung untersucht und angeboten werden müssen.

¹⁰ eigene Berechnung auf Basis der in Österreich angewandten Produktionsprozessen

Tabelle 10: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Papier & Druck

Reduktion der energiebedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 412 Elektr. Energie: + 122	- 75
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 3965 Elektr. Energie: + 123	- 789
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 363 Elektr. Energie: + 171	- 62
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: -412 H ₂ : + 372 dafür el. Energie: + 520	- 53
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 3965 H ₂ : + 3569 dafür el. Energie: + 4996	- 583
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 5745 H ₂ : + 5170 dafür el. Energie: + 7238	- 735
		Stromerzeugung	Ind. Abfälle: - 718 Fossiles CH ₄ : - 725 H ₂ : + 1443 dafür el. Energie.:+ 2020	- 270
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: -412 H ₂ : + 372 dafür CH ₄ : + 694 dafür el. Energie: + 106	-73
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 3965 H ₂ : + 3569 dafür CH ₄ : + 6674 dafür el. Energie: + 1018	- 778
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 5745 H ₂ : + 5170 dafür CH ₄ : + 9669 dafür el. Energie: + 1475	- 1017
		Stromerzeugung	Ind. Abfälle: - 718 Fossiles CH ₄ : - 725 H ₂ : + 1443 dafür CH ₄ : + 2698 dafür el. Energie: + 411	- 360
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: -412 Bio-CH ₄ : + 412	- 82
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: -3965 Bio-CH ₄ : + 3965	- 863
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 6813 Bio-CH ₄ : + 6813	- 1140
		Stromerzeugung	Ind. Abfälle: - 718 Fossiles CH ₄ : - 725 Bio-CH ₄ : + 1443	- 383

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

4.2 Zusammenfassung des technischen Dekarbonisierungspotentials

Fasst man nun sämtliche Dekarbonisierungspotentiale der österreichischen Industrie zusammen, so erhält man die in Tabelle 11 (energiebedingte Emissionen) und in Tabelle 12 (prozessbedingte Emissionen) ausgewiesenen Werte.

Das mit Abstand größte einzelne Dekarbonisierungspotential kann durch eine Umstellung der Hochöfen auf CO₂-neutrale Gase realisiert werden. Hier können annähernd 10 Mt CO_{2e} an THG-Emissionen vermieden werden. Dies entspricht in etwa 37% der industriellen Gesamtemissionen in Österreich. Der Einsatz von Carbon Capture Technologien im Sektor Steine und Erden, Glas weist ein Dekarbonisierungspotential von ca. 2,5 Mt CO_{2e} auf. Hier ist darauf hinzuweisen, dass dieses Reduktionspotential in einem einzigen Sektor realisiert werden kann.

Eine Dekarbonisierung der Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme weist in Österreich ein THG-Reduktionspotential zwischen 3,8 und 5,5 Mt CO_{2e} auf. Im Gegensatz zu den zwei bereits genannt Dekarbonisierungspotentialen, verteilt sich dieses jedoch über alle Sektoren und verlangt demnach nach vergleichsweise kleinteiligen Maßnahmen. Durch eine Dekarbonisierung der Niedertemperaturbereitstellung lassen sich in Österreich, je nach Technologie, zwischen 1,6 und 2,4 Mt CO_{2e} an THG-Emissionen einsparen. Das Emissionsreduktionspotential im Bereich der Raumheizung und Kältebereitstellung liegt zwischen 0,6 und 0,9 Mt CO_{2e}. Eine Elektrifizierung der ortsfesten Standmotoren kann die industriellen THG-Emissionen um ca. 0,2 Mt CO_{2e} verringern. Eine Dekarbonisierung der im Sektor Bau eingesetzten mobilen Baumaschinen reduziert die industriellen THG-Emissionen im ca. 0,5 Mt CO_{2e}.

Tabelle 11: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen der österreichischen Industrie

Reduktion der energiebedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 4 604 Elektr. Energie: + 1 359	- 827
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 11 603 Elektr. Energie: + 3 853	- 2 189
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 891 Elektr. Energie: + 419	- 172
		Batteriebetriebene Baumaschinen	Fossile ET: - 2 271 Elektr. Energie: + 768	- 572
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 4 604 H ₂ : + 4 144 dafür el. Energie: + 5 801	- 579
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 11 604 H ₂ : + 10 443 dafür el. Energie: + 14 621	- 1 586
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 23 555 H ₂ : + 21 200 dafür el. Energie: + 29 679	- 3 854
		Standmotoren (Baumaschinen mit Brennstoffzellen)	Fossile ET: - 2 271 H ₂ : + 1 161 dafür el. Energie: + 1 625	- 524
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 4 604 H ₂ : + 4 144 dafür CH ₄ : + 7 749 dafür el. Energie: + 1 182	- 805
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 11 604 H ₂ : + 10 443 dafür CH ₄ : + 19 529 dafür el. Energie: + 2 979	- 2 156
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 23 555 H ₂ : + 21 200 dafür CH ₄ : + 39 645 dafür el. Energie: + 6 048	- 5 012
		Standmotoren (Baumaschinen mit Brennstoffzellen)	Fossile ET: - 2271 H ₂ : + 1161 dafür CH ₄ : + 2170 dafür el. Energie: + 331	- 587
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 4 604 Bio-CH ₄ : + 4 604	- 903
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 11 604 Bio-CH ₄ : + 11 604	- 2 404
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 23 555 Bio-CH ₄ : + 23 555	- 5 516

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

Tabelle 12: Technische Potentiale zur Verringerung der prozessbedingten Emissionen der österreichischen Industrie

Reduktion der prozessbedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
CO ₂ -neutrales Gas	Direktreduktion von Eisenerz mittels Bio-CH ₄ in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	Kohle/Koks: - 26777 Bio-CH ₄ : + 31062 Elektr. Energie: + 3983	- 9977
	Direktreduktion von Eisenerz mittels H ₂ (Elektrolyse) in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 18235 dafür el. Energie: 25530 Bio-CH ₄ : + 3726 Elektr. Energie: + 3985	- 8547
	Direktreduktion von Eisenerz mittels H ₂ (Pyrolyse) in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 18235 dafür CH ₄ : + 34100 dafür el. Energie: + 5197 Bio-CH ₄ : + 3726 Elektr. Energie: + 3985	- 9686
Kreislaufwirtschaft	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von Bio-CH ₄	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	Kohle/Koks: - 26777 Bio-CH ₄ : + 15531 Elektr. Energie: + 4497	- 9948
	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von H ₂ (Elektrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 9118 dafür el. Energie: +12765 Bio-CH ₄ : + 1863 Elektr. Energie: + 4499	- 9233
	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von H ₂ (Pyrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	Kohle/Koks: - 26777 H ₂ : + 9118 dafür CH ₄ : + 17050 dafür el. Energie: + 2599 Bio-CH ₄ : + 1863 Elektr. Energie: + 4499	- 9803
	Recyclingeinsatz von Beton mit derzeitigem Fuel-Mix	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	CH ₄ : + 47 Abfall: + 1131 Kohle: +260 Heizöl: +9 Biogene: +19	- 90
	Recyclingeinsatz von Beton mit Einsatz Bio-CH ₄	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	Bio-CH ₄ : + 1466	- 827
	Recyclingeinsatz von Beton mit Einsatz H ₂ (Elektrolyse)	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	H ₂ : + 1466 dafür el. Energie: + 2052	- 712
	Recyclingeinsatz von Beton mit Einsatz H ₂ (Pyrolyse)	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der <u>Zementindustrie</u>	H ₂ : +1466 dafür CH ₄ : + 2741 dafür el. Energie: + 418	- 804
Carbon Capture	Oxyfuel-Verbrennung	Erzeugungsprozesse <u>Stein & Erden, Glas</u>	Elektr. Energie: + 676	- 2490
	Aminwäsche mit Wärmepumpe	Erzeugungsprozesse <u>Stein & Erden, Glas</u>	Elektr. Energie: + 1421	- 2449

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

4.3 Auswirkungen auf das österreichische Energiesystem

Wie bereits in den Tabellen zu den technischen Potentialen (siehe Kapitel 4.1) ersichtlich, wird die Dekarbonisierung der österreichischen Industrie einen signifikanten Einfluss auf das Energiesystem haben. Durch den Umstieg auf CO₂-neutrale Gase und deren Produktion wird beispielsweise im Fall der Wasserstoffelektrolyse der Bedarf an elektrischer Energie ansteigen. Der Einsatz von Methanpyrolyse zur Bereitstellung von CO₂-neutralem Wasserstoff aus Erdgas erfordert neben Erdgas als Wasserstoffträger auch elektrische Energie zum Betrieb der Pyrolyseanlagen (DECHEMA, 2019).

In den folgenden Abbildungen werden die theoretischen Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen der untersuchten Dekarbonisierungsstrategie unter der Annahme, dass jede Maßnahme zu 100% umgesetzt wird, dargestellt. Bei der Entwicklung möglicher Zukunftsszenarien ist darauf zu achten, dass es bei der Kombination verschiedener Maßnahmen zu keinen Doppelzählungen der vermiedenen THG-Emissionen kommt. Es sollte darauf geachtet werden, dass der Umsetzungsgrad der einzelnen Maßnahmen pro Nutzenergiekategorie kleiner oder gleich 100% ist. So ist es beispielsweise möglich, die Elektrifizierung der Raumheizungen mit Wärmepumpen zu 60% umzusetzen und zusätzlich die Maßnahme Raumheizung mit Biogas zu 40%. Somit werden in Summe 100% des Dekarbonisierungspotentials genutzt. Es können jedoch nicht beide Maßnahmen zu je 60% berücksichtigt werden, da dies das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential überschreiten würde.

Abbildung 18 zeigt nun die Auswirkungen auf das Energiesystem der Maßnahmen aus der Dekarbonisierungsstrategie CO₂-neutrales Gas. Zusätzlich ist bei jeder Maßnahme das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential über den Balken angegeben. Vergleicht man die Auswirkung der Wasserstoffbereitstellung über Elektrolyse bzw. Pyrolyse, so erkennt man, dass für die Bereitstellung der erforderlichen Wasserstoffmengen im Fall der Pyrolyse in Summe deutlich mehr Energie notwendig ist als bei der Elektrolyse. Der benötigte Anteil elektrischer Energie ist im Fall der Pyrolyse jedoch deutlich niedriger als für die Elektrolyse, da Erdgas als Wasserstoffquelle anstatt Wasser verwendet wird und damit der Energiebedarf zur Abspaltung des Wasserstoffs deutlich niedriger ist.

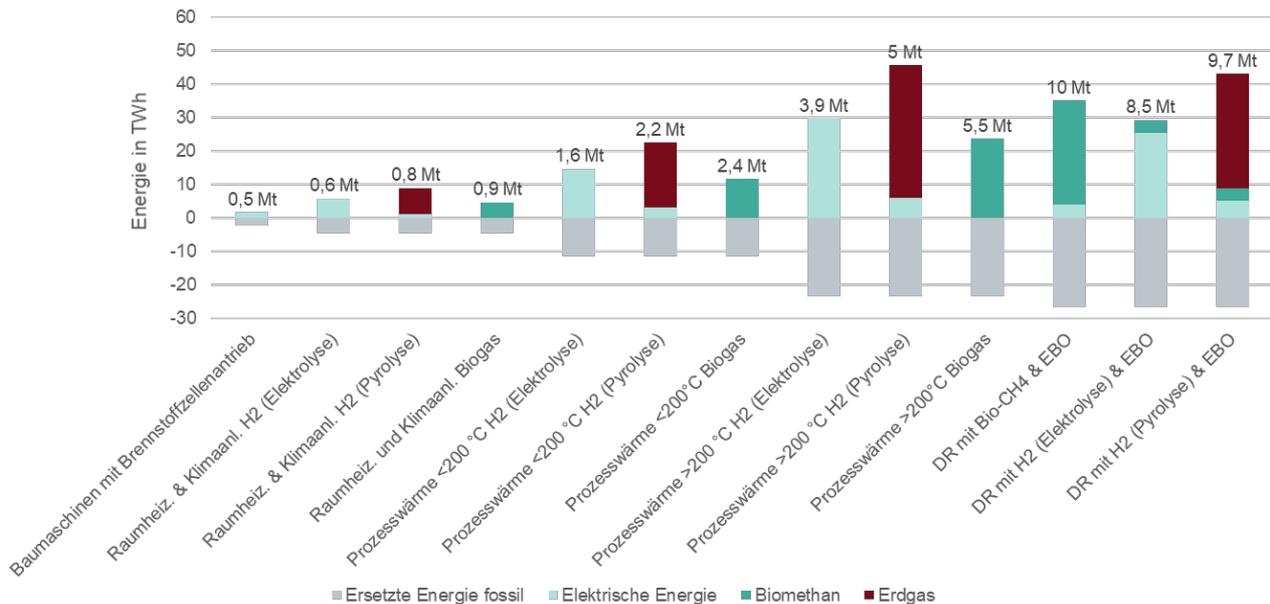


Abbildung 18: Auswirkung der Dekarbonisierungsstrategie CO₂-neutrale Gase auf das Energiesystem bei vollständiger Implementierung der Maßnahmen. Das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential in Mt CO₂e ist über dem betreffenden Balken angegeben.

Abbildung 19 zeigt die Auswirkungen auf das Energiesystem der Maßnahmen aus der Dekarbonisierungsstrategie Elektrifizierung. Durch den Einsatz von effizienten Wärmepumpen bzw. elektrischen Antrieben für Baumaschinen kann die benötigte Nutzenergie mit deutlich weniger Energie bereitgestellt werden als mit den aktuellen Anlagen, die mit fossilen Brenn- und Treibstoffen betrieben werden.



Abbildung 19: Auswirkung der Dekarbonisierungsstrategie Elektrifizierung auf das Energiesystem bei vollständiger Implementierung der Maßnahmen. Das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential ist über dem betreffenden Balken angegeben.

Abbildung 20 zeigt die Auswirkungen der Dekarbonisierungsstrategie Kreislaufwirtschaft. Vergleicht man hier beispielsweise die Auswirkungen des Einsatzes von Direktreduktion mit Wasserstoff aus Elektrolyse, so erkennt man, dass der Einsatz von 50% Schrott den Strombedarf, und damit die Auswirkungen auf das elektrische Netz, um ca. ein Drittel reduziert. Dies ist auf den verringerten Elektrolysebedarf zurückzuführen, da bei erhöhtem Einsatz von Schrott weniger Eisenerz in der Direktreduktionsanlage reduziert werden muss.

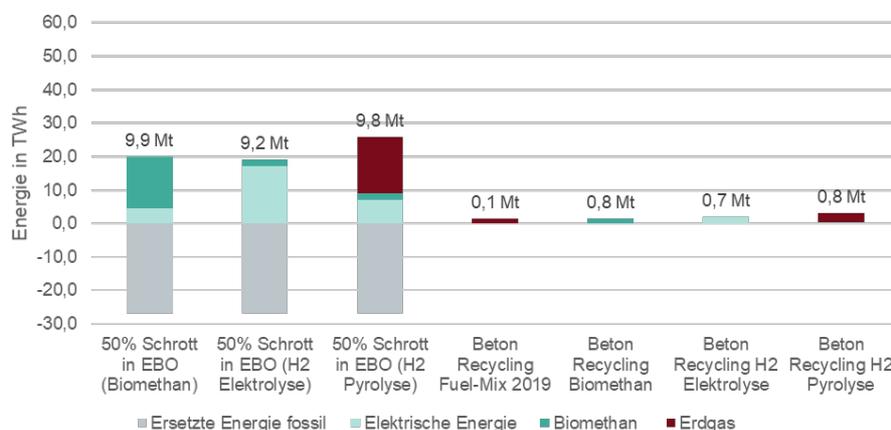


Abbildung 20: Auswirkung der Dekarbonisierungsstrategie Kreislaufwirtschaft auf das Energiesystem bei vollständiger Implementierung der Maßnahmen. Das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential jeder Maßnahme ist über dem betreffenden Balken angegeben.

5 KOSTEN DER TRANSFORMATION

In diesem Berichtsteil werden auf Basis der Literatur zu den Kosten von Dekarbonisierungsoptionen Abschätzungen zu den Investitionskosten sowie, soweit vorhanden, zu den spezifischen CO₂-Reduktionskosten der Dekarbonisierung der österreichischen Industrie getroffen.

Der Europäischen Kommission zufolge werden zum jetzigen Zeitpunkt 2% des BIP der EU in das Energiesystem und die damit zusammenhängende Infrastruktur investiert. Zur Erreichung einer THG-neutralen Wirtschaft wird davon ausgegangen, dass dieser Anteil auf jährlich 2,8%, also etwa 520–575 Mrd.€ steigen muss (Europäische Kommission, 2019). Die Investitionskosten in Technologien und Prozesse, um bis 2050 eine Dekarbonisierung der EU zu erreichen, schätzt (McKinsey & Company, 2020) deutlich höher, auf insgesamt 28 Billionen Euro. Davon entfallen zwischen 1 und 2% auf die Industriesektoren, was in etwa 410 Milliarden Euro insgesamt entspricht. Die zu erwartenden Investitionskosten für die österreichische Industrie, die sich aus den betrachteten Dekarbonisierungsstrategien ergeben, werden analog im Folgenden analysiert.

Unter Wahrung der Konsistenz mit den Ausführungen im vorherigen Kapitel können die Investitionskosten der einzelnen Dekarbonisierungsoptionen in den folgenden Abbildungen nicht addiert werden um die Gesamtkosten zu erhalten. Die Zahlen geben vielmehr eine Orientierung, welche Investitionskosten die einzelnen Optionen in den Industriesektoren auslösen.

Während in der vorliegenden Studie direkte Investitionskosten für die jeweils erhobenen Maßnahmen zur Dekarbonisierung der Industrie betrachtet werden, sind für eine ganzheitliche techno-ökonomische Bewertung und Auswahl zwischen Alternativoptionen ganz wesentlich auch die Kosten des Betriebs zu berücksichtigen.

Diese gesamtheitliche Betrachtung von Investitions- und Betriebskosten über die gesamte Lebensdauer der Technologien bedarf gesonderter ausführlicher Analysen, die eine gesamtwirtschaftliche Berechnung in Szenarien sowie die Einbindung der relevanten Stakeholder (z.B. zur Identifizierung typischer Investitionszyklen) enthält.

5.1 Kosten der Querschnittstechnologien

Die Technologien zur Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen werden wie in Kapitel 4 beschrieben in mehreren – teilweise auch allen – Sektoren eingesetzt. In den nachfolgenden Unterkapiteln zu den einzelnen Sektoren werden die mit diesen Maßnahmen im jeweiligen Sektor in Verbindung stehenden Kosten dargestellt. Bei den dargestellten Kosten handelt es sich dabei um Realkostenschätzungen für das Jahr 2040 auf Basis des aktuell verfügbaren Wissensstands.

Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Umstellung auf Wärmepumpen der Einsatz CO₂-neutraler Gase nicht zwingend zu einem Wechsel der Technologie selbst führt. Die Investitionskosten umfassen im Fall der CO₂-neutralen Gase die Kosten für die Produktion der Gase. Die Technologie zur Bereitstellung der Wärme bleibt unberücksichtigt. Das führt unter anderem in den folgenden Kapiteln zu vergleichsweise höheren Investitionskosten der Wärmepumpe.

Weiters wird darauf hingewiesen, dass der Kostenabschätzung keine vertiefte Analyse des betroffenen Gebäudebestands zugrunde liegt. Damit kann auch keine detaillierte Aussage über die tatsächliche Implementierbarkeit bzw. den notwendigen Gesamtaufwand gemacht werden.

5.2 Investitionskosten der Dekarbonisierung in den Industriesektoren

5.2.1 Eisen- & Stahlerzeugung

Für die im Sektor *Eisen- & Stahlerzeugung* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 5 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 13 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Darüber hinaus spielen im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung die prozessbedingten Emissionen eine besonders wichtige Rolle. Die Kosten für die verschiedenen Dekarbonisierungsstrategien zur Vermeidung der prozessbedingten Emissionen sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 13: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung¹¹

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	136
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	9
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	42
		Prozesswärme < 200 °C	16
		Prozesswärme > 200 °C	881
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	32
		Prozesswärme < 200 °C	12
		Prozesswärme > 200 °C	677
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	28
		Prozesswärme < 200 °C	10
		Prozesswärme > 200 °C	513

Tabelle 14: Investitionskosten zur Reduktion prozessbedingter Emissionen im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung

Kosten der Dekarbonisierung – prozessbedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
CO ₂ -neutrales Gas	Direktreduktion von Eisenerz mittels Bio-CH ₄ in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	2226 DRI-CS
			2524 Bio-CH ₄
	Direktreduktion von Eisenerz mittels H ₂ (Elektrolyse) in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	2226 DRI-CS
			2523 H ₂ (Elektrolyse)
	Direktreduktion von Eisenerz mittels H ₂ (Pyrolyse) in Kombination mit Elektrolichtbogenofen	Stahlerzeugung in Verbindung mit Elektrolichtbogenofen	2226 DRI-CS
			1917 H ₂ (Pyrolyse)
Kreislaufwirtschaft	Einsatz in EBO Einsparung von Bio-CH ₄	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	1607 DRI-CS
			1262 Bio-CH ₄
	Einsatz in EBO Einsparung von H ₂ (Elektrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	1607 DRI-CS
			1248 H ₂ (Elektrolyse)
	Einsatz in EBO Einsparung von H ₂ (Pyrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	1607 DRI-CS
			958 Pyrolyse

¹¹ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

Die folgenden zwei Abbildungen fassen die Informationen zu den CO₂-Reduktionspotentialen in der Eisen- und Stahlerzeugung und zu den Investitionskosten der einzelnen Maßnahmen zusammen – differenziert nach energiebedingten und prozessbedingten Emissionen. Aus den nachfolgenden Abbildungen wird deutlich, dass der vermehrte Einsatz von Schrott die Investitionskosten bei praktisch gleichbleibender CO₂-Reduktion signifikant reduzieren kann.

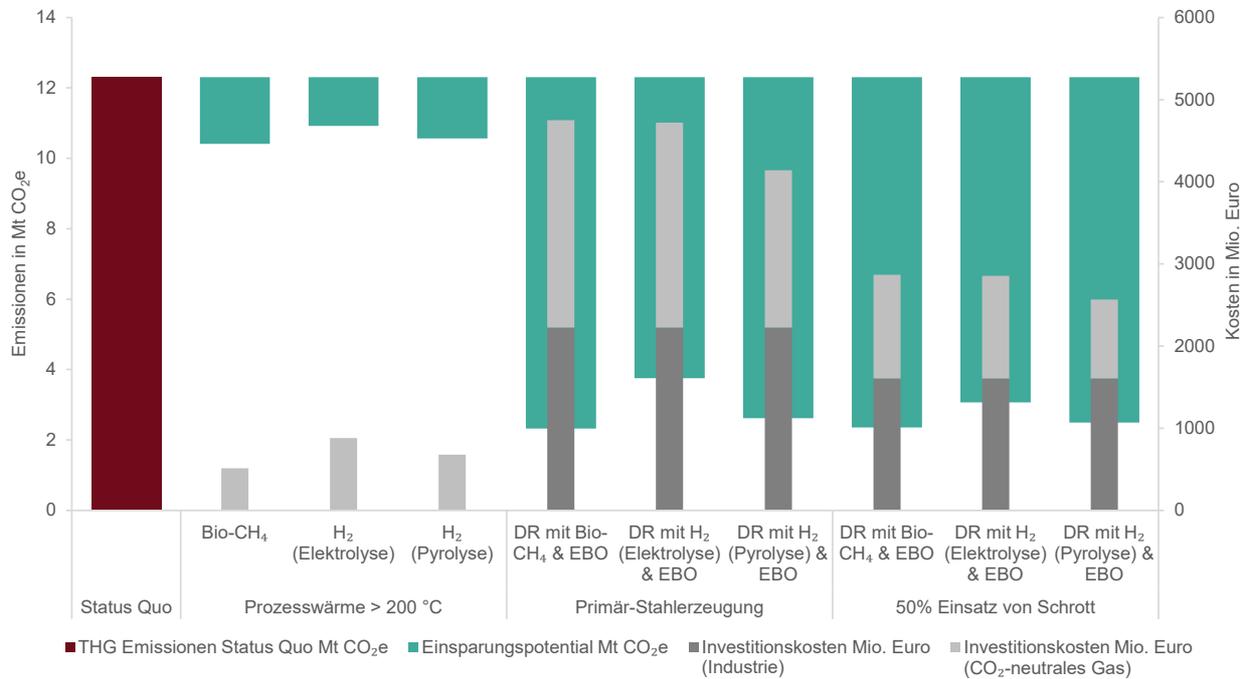


Abbildung 21: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung für die Anwendungsbereiche Prozesswärme > 200 °C und Stahlerzeugung

5.2.2 Steine & Erden, Glas

Für die im Sektor *Steine & Erden, Glas* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich die in Tabelle 15 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 15: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Steine & Erden, Glas¹²

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	139
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	14
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	43
		Prozesswärme < 200°C	26
		Prozesswärme > 200 °C	839
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	33
		Prozesswärme < 200°C	20
		Prozesswärme > 200 °C	644
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	28
		Prozesswärme < 200°C	17
		Prozesswärme > 200 °C	488

Die Kosten zur Vermeidung der prozessbedingten Emissionen sind in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Investitionskosten für Technologien zur Reduktion prozessbedingter Emissionen im Sektor Steine & Erden, Glas

Kosten der Dekarbonisierung – prozessbedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Carbon Capture	Oxyfuel-Verbrennung	Erzeugungsprozess	619
	Aminwäsche mit Wärmepumpe	Erzeugungsprozess	369
Kreislaufwirtschaft	Recyclingeinsatz von Beton mit derzeitigem Fuel-Mix	Vermehrter Einsatz von R-Beton in der Zementindustrie	35

In diesem Sektor verursacht die Umstellung der Prozesswärme über 200 °C die höchsten Investitionskosten, vorausgesetzt die Kosten für die Produktion der Energieträger fallen im Industriesektor an. Als verhältnismäßig kosteneffizient stellen sich die zwei Maßnahmen zur Carbon Capture dar [22].

¹² Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

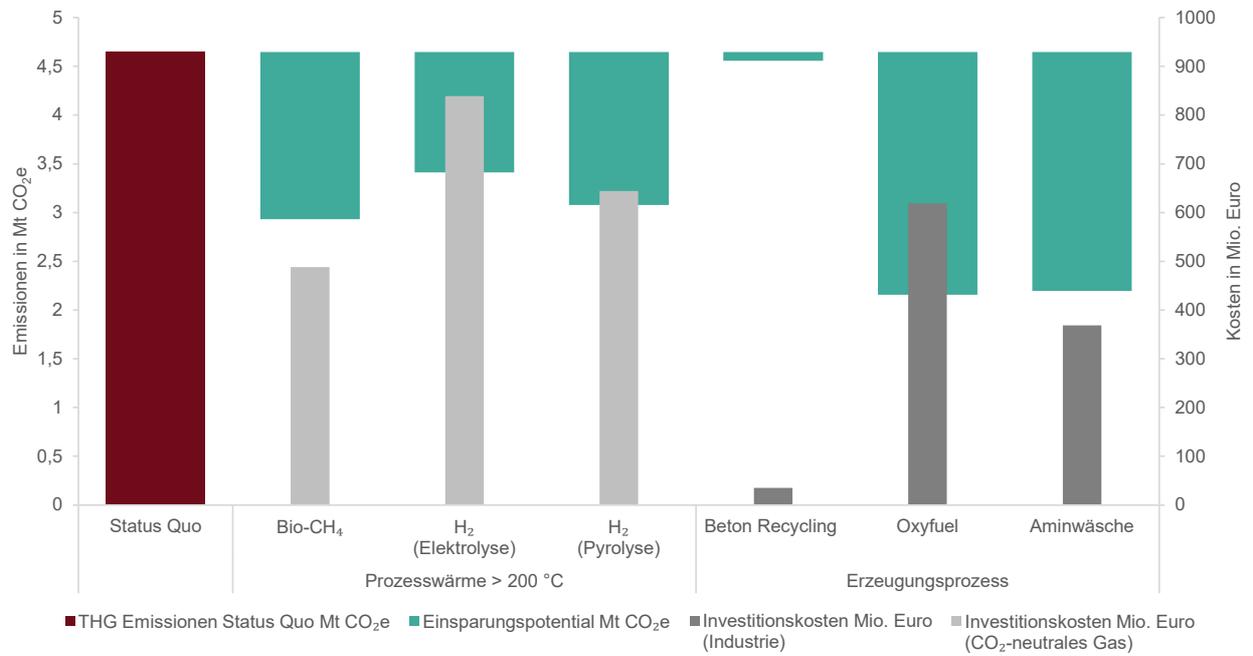


Abbildung 23: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Steine & Erden, Glas für die Anwendungsbereiche Prozesswärme > 200 °C und Erzeugungsprozess

5.2.3 Chemie- & Petrochemie

Für die im Sektor *Chemie- und Petrochemie* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich die in Tabelle 17 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 17: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Chemie- und Petrochemie¹³

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	284
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	112
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	87
		Prozesswärme < 200°C	205
		Prozesswärme > 200 °C	188
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	67
		Prozesswärme < 200°C	158
		Prozesswärme > 200 °C	144
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	57
		Prozesswärme < 200°C	135
		Prozesswärme > 200 °C	109

Die Herleitung der Kosten für die im vorherigen Kapitel beschriebenen spezifischen Optionen im Sektor Chemie und Petrochemie wird im Folgenden beschrieben. Die Kosten für die Bereitstellung des benötigten Kohlenstoffs in Form von CO₂ zur Herstellung der synthetischen Kohlenwasserstoffe (Methanol, Olefine) sind hier nicht enthalten. Da die potenziellen Quellen für das verwendete CO₂ grundsätzlich sehr vielfältig sein können, ist eine Zuordnung zu einem einzelnen Industriesektor bzw. der Industrie im Allgemeinen kaum möglich. Mögliche Anlagen zur CO₂-Abscheidung können dazu eigens errichtet werden, wie z.B. Direktabscheidung aus der Luft (Direct Air Capture, DAC), bereits Teil von Maßnahmen in anderen Sektoren sein, wie z.B. Biomethanproduktion oder Carbon Capture, oder als Nebenprodukt aus nicht betrachteten Prozessen, wie z.B. der Bioethanolherstellung, anfallen. Eine Übersicht über unterschiedliche CO₂-Quellen und damit verbundenen Abscheideeffizienzen und -kosten ist in einschlägiger Literatur (Rodin, Lindorfer, Böhm, & Vieira, 2020) zu finden.

5.2.3.1 Methanol aus grünem Wasserstoff

Für die Produktion von Methanol (MeOH) mittels grünen Wasserstoffes weisen sowohl DECHEMA (DECHEMA, 2019) als auch IEA (IEA, 2020) entsprechende Investitionskosten aus. Diese Abschätzungen gehen jeweils von einer Elektrolyse am Industriestandort aus und inkludieren daher die Kosten für die entsprechende Elektrolyseanlage. Beide Quellen zeigen aber deutliche Unterschiede, wenngleich in der Langzeitbetrachtung ähnliche Kostenreduktionen erwartet werden (untere Kostengrenze). Für die Abschätzung der gesamten Investitionskosten werden, auch aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den

¹³ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

anderen Wasserstoff-basierten Anwendungen, die Daten der IEA herangezogen. Unter der Annahme einer jährlichen Produktionsmenge von 28,7 kt Methanol ist bis 2040 mit Investitionskosten von **11,9 Mio. Euro** zu rechnen.

5.2.3.2 Olefine aus grünem Methanol (Methanol-to-Olefine)

Für die Abschätzung der Investitionen für die Methanol-to-Olefine-Route werden zur Herstellung des erneuerbaren Methanols als Ausgangsstoff die im vorigen Abschnitt 5.2.3.1 diskutierten Grundkosten übernommen. Zusätzlich fallen Kosten für die Methanol-to-Olefine-Anlage an. Dies resultiert in gesamten spezifischen Investitionskosten von rund 1.130 €/t Olefine. Unter der Annahme einer jährlichen Produktionsmenge von 1.290 kt Olefinen ist bis 2040 mit Investitionskosten von **1.458 Mio. Euro** zu rechnen.

5.2.3.3 Ammoniak aus grünem Wasserstoff

Für die Erzeugung von Ammoniak (NH₃) aus erneuerbarem Wasserstoff sind in Studien der DECHEMA (DECHEMA, 2019) und der IEA (IEA, 2020) entsprechende Kosten ausgewiesen. Zwar gehen beide Studien von einer Elektrolyse am Industriestandort aus und inkludieren daher die Kosten für die entsprechende Elektrolyseanlage, machen aber sonst keine Angabe zur Systemgrenze und sind daher nur schwer vergleichbar. Für die Abschätzung der gesamten Investitionskosten werden wiederum die Kostenprognosen des IEA Reports herangezogen. Unter der Annahme einer jährlichen Produktionsmenge von 553 kt Ammoniak ist bis 2040 mit Investitionskosten von **343 Mio. Euro** zu rechnen.

5.2.4 Papier & Druck

Für die im Sektor *Papier & Druck* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 5 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 18 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 18: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Papier & Druck¹⁴

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	166
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	267
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	51
		Prozesswärme < 200°C	488
		Prozesswärme > 200 °C	708
		Stromerzeugung	197
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	39
		Prozesswärme < 200°C	375
		Prozesswärme > 200 °C	543
		Stromerzeugung	152
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	34
		Prozesswärme < 200°C	322
		Prozesswärme > 200 °C	412
		Stromerzeugung	117

In diesem Sektor verursacht die Umstellung der Prozesswärme über 200 °C die höchsten Investitionskosten, vorausgesetzt, dass die Kosten für die Produktion der Energieträger im Industriesektor anfallen.

Die Investitionskosten für die Umrüstung der industrieeigenen KWK auf CO₂-neutrale Gase liegen zwischen 117 und 197 Mio. Euro.

¹⁴ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

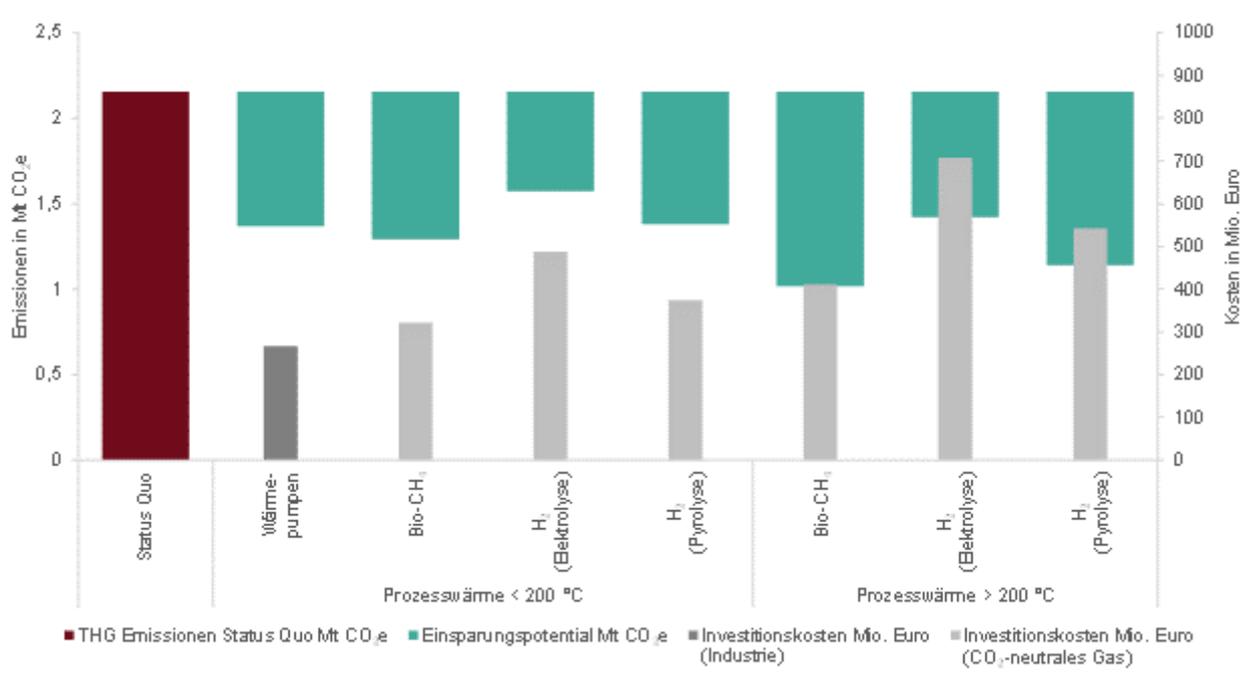


Abbildung 24: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Papier und Druck¹⁵

5.3 Zusammenfassende Darstellung der Investitionskosten

Unter Betrachtung der energiebedingten THG-Emissionen, die vor allem in den nicht-energieintensiven Sektoren eine wesentliche Rolle spielen, zeigt sich, dass die Umstellung von Raumheizung und Klimaanlage sowie die Umstellung der Prozesswärme < 200 °C signifikante Investitionen auslösen. Während sich hier für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage der Einsatz von CO₂-neutralen Gasen als vermeintlich günstigste Variante darstellt, ist hier abermals darauf hingewiesen, dass hierzu neben der reinen Kosteneffizienz weitere Faktoren, wie Ressourceneffizienz, zugehörige Vorketten und verfügbare Ressourcenpotenziale in der Auswahl der Dekarbonisierungsstrategie zu berücksichtigen sind. Für die Anwendung von Hochtemperatur-Wärmepumpen für Prozesswärme < 200 °C relativiert sich dieser Kostenvorteil durch die erwartete Kosteneffizienz von großtechnischen Anlagen (im Gegensatz zu eher kleinteiligen Installationen im Raumwärmebereich).

Die folgende Abbildung zeigt die minimalen sowie maximalen Kosten der einzelnen Dekarbonisierungsstrategie für die gesamte Industrie. Die Darstellung zeigt jeweils die Gesamtkosten einer vollständigen Umsetzung der jeweiligen Dekarbonisierungsstrategie. Folglich sind einzelne Anwendungsbereiche und die damit verbundenen Kosten teilweise in mehr als einer Strategie inkludiert und die einzelnen Kategorien daher nicht zu addieren. Es wird außerdem darauf hingewiesen, dass die zukünftigen Investitionskosten mit Unsicherheiten behaftet sind. Die in diesem Bericht ausgewiesenen Werte können daher nur als Orientierung über den Investitionsbedarf bis 2040 interpretiert werden.

¹⁵ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 5.1 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

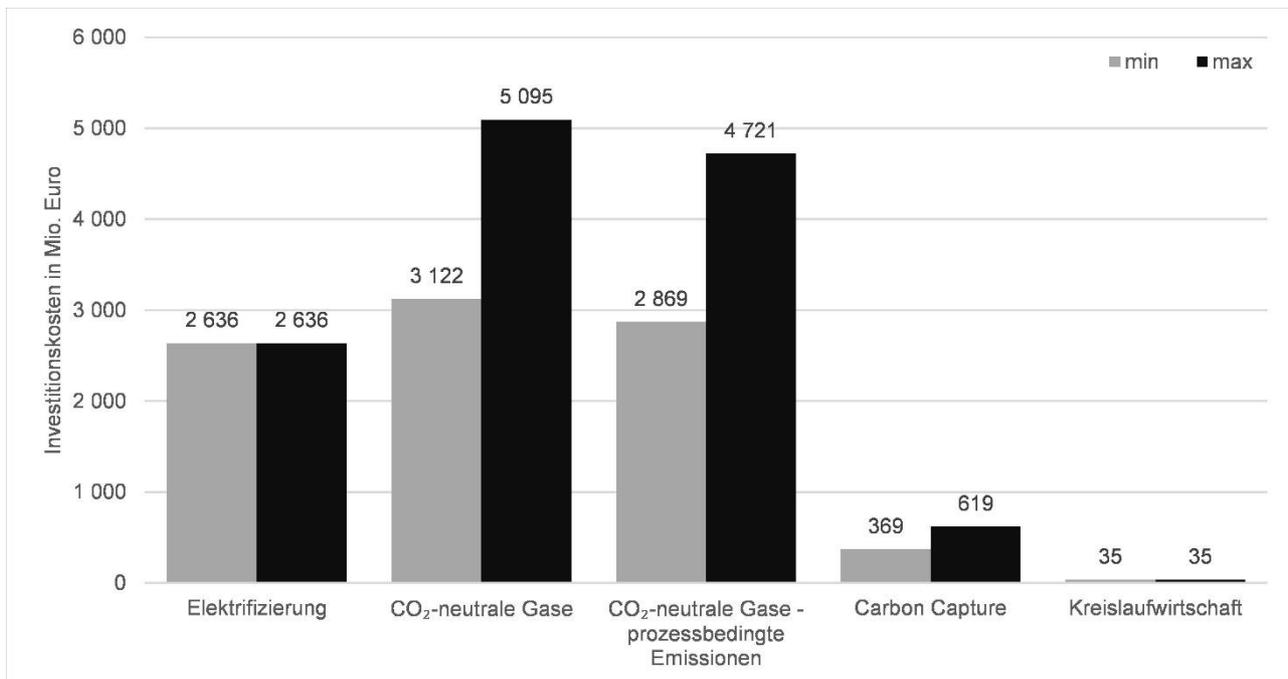


Abbildung 25: Wertebereiche der Investitionskosten je Dekarbonisierungsstrategie

Im Bereich der Elektrifizierung löst die Umstellung der Raumwärme und der Klimaanlage Investitionskosten von 1 853 Mio. € aus, die Umstellung der Prozesswärme unter 200 °C 783 Mio. €. Da innerhalb der Strategie der *Elektrifizierung* keine konkurrierenden Technologien betrachtet werden, sind die entsprechenden Minimal- und Maximalkosten ident. Selbiges gilt für die Kategorie *Kreislaufwirtschaft*, die den Einsatz von R-Beton als einzigen Anwendungsbereich beinhaltet. Für die Dekarbonisierungsstrategien *CO₂-neutrale Gase* sind die gezeigten Minimalkosten jeweils durch die Variante basierend auf Bio-CH₄ bedingt, die Maximalkosten durch jene mit H₂ aus Elektrolyse. In der Dekarbonisierungsstrategie *Carbon Capture* stellt die Technologie der Aminwäsche den Minimalwert dar, die Implementierung von Oxyfuel-Verbrennung den Maximalwert. In der Kategorie *CO₂-neutrales Gas – prozessbedingte Emissionen* lässt sich die große Schwankungsbreite der Werte durch die Optionen mit 50% Schrotteinsatz in der Stahlindustrie erklären, die die Investitionskosten signifikant reduzieren.

Große Schwankungsbreiten je nach eingesetzter Technologie weisen auch die Investitionskosten für *CO₂-neutrales Gas* und für die Reduktion prozessbedingter Emissionen aus. Die Investitionskosten für *CO₂-neutrales Gas* werden in der folgenden Abbildung in niedrigerer Auflösung dargestellt.

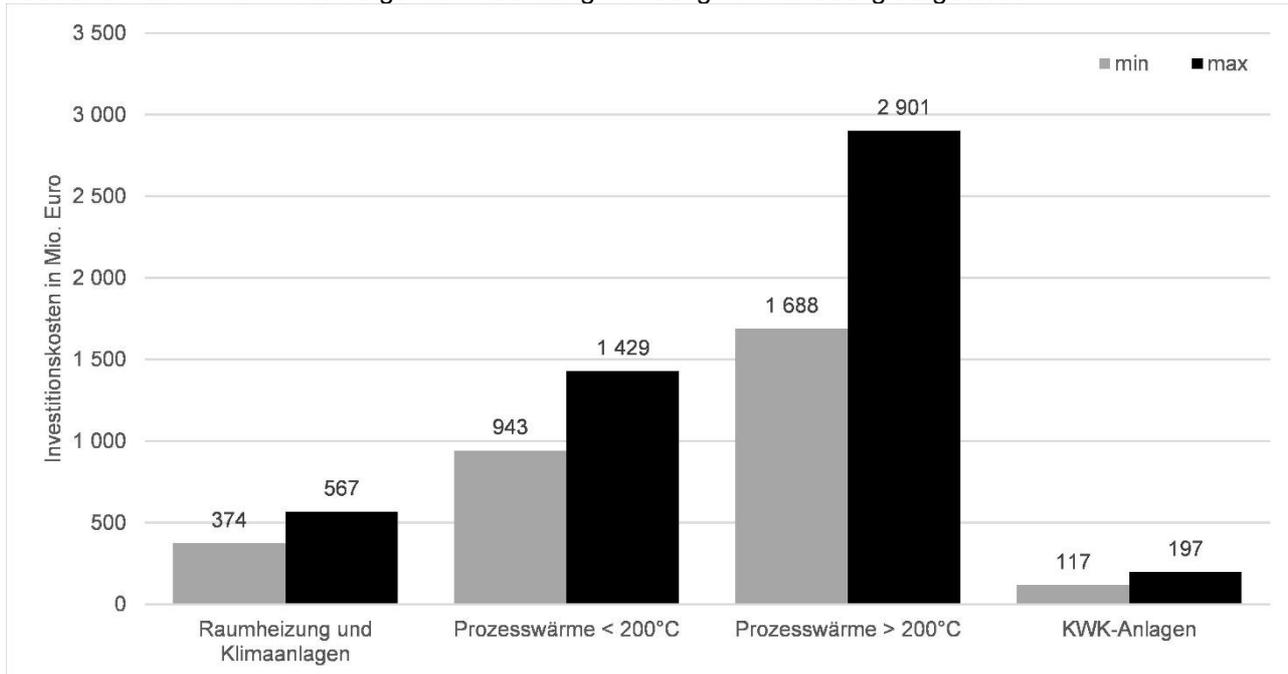


Abbildung 26: Wertebereiche der Investitionskosten für Dekarbonisierungsstrategie CO₂-neutrale Gase

Die gesamten Investitionskosten für die dargestellten Dekarbonisierungsoptionen liegen je nach gewählten Technologien bis 2040 zwischen 6,2 und 11,2 Mrd. Euro (exkl. Betriebskosten). Die Unterschiede erklären sich daraus, welche Optionen für den konkreten Anwendungsfall gewählt werden.

Knapp die Hälfte der maximalen 11,2 Mrd. Euro sind Investitionskosten für die Produktion von Wasserstoff, die entweder direkt im Industriesektor oder im Sektor Energie stattfindet. Ein großer Teil der maximal 11,2 Mrd. Euro fallen im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung an. Darin sind die Investitionskosten für die Produktion des eigenen Wasserstoffs inkludiert.

Die vorliegende Studie beschränkt sich auf die Abschätzung der Kosten der Transformation basierend auf bestehender Literatur. Eine vollständige Abschätzung der Gesamtkosten – inklusive der Betriebskosten – sowie der optimalen Kombination der einzelnen Maßnahmen war nicht Inhalt dieser Arbeit und würde weitere Untersuchungen erfordern.

5.4 Instrumente

Welcher Anteil der in den vorherigen Kapiteln ausgewiesenen Investitionskosten einer zusätzlichen Förderung bedarf kann im Rahmen dieser Studie nicht seriös abgeschätzt werden. Die Wirtschaftlichkeit der Dekarbonisierungsmaßnahmen hängt von den Betriebskosten (v.a. für Energie) sowie von weiteren Rahmenbedingungen (z.B. Steuern, CO₂-Preis) ab. Je niedriger die Kosten für CO₂-freie Elektrizität, Biogas und CO₂-freien Wasserstoff, desto besser stellt sich die Wirtschaftlichkeit der Optionen dar.

Dieses Kapitel liefert daher eine Übersicht von Instrumenten, um die Transformation in der Industrie zu beschleunigen.

Die OECD (OECD, IEA, NEA, & ITF, 2015) identifiziert vier Policy-Säulen für eine treibhausgasneutrale Zukunft, wobei vor allem die Kombination von verschiedenen Instrumenten aus allen Säulen die größte Effektivität aufweist (siehe Tabelle 19).

- a) Preissignale für CO₂
- b) Regulatorische Maßnahmen
- c) FTI-Policies für neue Technologien
- d) Information und Bewusstseinsbildung

Tabelle 19: Policy-Säulen für eine treibhausgasneutrale Zukunft

	Preissignale für CO ₂	Regulatorische Maßnahmen	FTI-Policies für neue Technologien	Information und Bewusstseinsbildung
Einsatzgebiet	Grundsätzlich global, EU-weit (in der Regel mit Ausnahmen)	Dort wo Preis- und Marktsignale aufgrund von Markthürden und Transaktionskosten nicht effektiv sind	Innovation, Forschung und Entwicklung, Breakthrough-Technologien	Fokus auf Konsumenten und Konsument*innen (zielgruppenorientiert)
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> • EU-ETS und andere Handelssysteme • Direkte CO₂-Steuern • Indirekte CO₂-Steuern (z.B. auf Treibstoffe oder andere Energieträger) • Subventionen für Emissionsminderungen • Carbon Border Adjustments • Carbon Contract for Difference 	<ul style="list-style-type: none"> • Meldeverpflichtung • Flottenstandards • Technologiestandards • Verbote • Raumplanung • Marktdesign 	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte und indirekte F&E-Förderung • Innovationsorientierte öffentliche Beschaffung • Grüne Zertifikate • Subventionen (z.B. Einspeisetarife) • Investitionsförderung • Regulatorische Experimentierräume („Sandboxes“) 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationskampagnen • Labelling im Rahmen von Lebenszyklusanalysen • Aus- und Weiterbildung • Zertifizierungs- und Auszeichnungsprogramme
Herausforderung	<ul style="list-style-type: none"> • Verteilungseffekte • Akzeptanz <p>Bei nationalen oder europäischen Alleingängen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Carbon Leakage • Einfluss auf Wettbewerbsfähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Notwendige Verbindlichkeit zu garantieren, um allen Stakeholdern eine langfristige Planung zu ermöglichen • Akzeptanz 	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherstellung der Fördereffektivität • Umsetzung technologischer Entwicklungen in marktfähige Innovationen • Technology choice, Lock-In 	<ul style="list-style-type: none"> • Wirksamkeit bzw. Messbarkeit der Auswirkungen von Maßnahmen • Rebound-Effekte z.B. Verlagerung monetärer Einsparungen auf CO₂-intensiveren Konsum

6 LITERATUR

- [1] Statistik Austria, „Hauptergebnisse der Leistungs- und Strukturstatistik 2019 nach Klassen (4-Stellern) der ÖNACE 2008,“ 2021. [Online]. Available: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/wirtschaft/unternehmen_arbeitsstaetten/leistungs_und_strukturdaten/.
- [2] Umweltbundesamt, „Austria's National Inventory Report 2021,“ Vienna, 2021.
- [3] EUROSTAT, „Greenhouse gas emission statistics - emission inventories,“ 2018.
- [4] EUROSTAT, „ESA-supply, use and input-output tables,“ [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/esa-supply-use-input-tables/data/database>.
- [5] Statistik Austria, „Nutzenergieanalyse 2019,“ STATISTIK AUSTRIA - Bundesanstalt Statistik Österreich, 2020. [Online]. Available: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html. [Zugriff am 21 Januar 2019].
- [6] Statistik Austria, „Standard-Dokumentation Metainformationen (Definitionen, Erläuterungen, Methoden, Qualität) zu den Nutzenergieanalysen,“ Wien, 2013.
- [7] P. Nagovnak, T. Kienberger, R. Geyer und A. Hainoun, „Dekarbonisierungsszenarien für das industrielle Energiesystem in Österreich,“ Elektrotechnik und Informationstechnik, 2021.
- [8] European Commission, „Stepping up Europe's 2030 climate ambition: Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people,“ Brüssel, 2020.
- [9] D. Deublein und A. Steinhauser, „Biogas from waste and renewable resources: An introduction,“ Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
- [10] G. Stanzer, S. Novak, H. Dumke, S. Plha, H. Schaffer, J. Breinesberger, M. Kirtz, P. Biermayer und C. Spanring, „Regionale Szenarien erneuerbarer Energiepotenziale in den Jahren 2012/2020,“ REGIO Energy, 2010.
- [11] M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer, „Energie aus Biomasse,“ Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [12] W. Streicher, H. Schnitzer, M. Titz, F. Tatzber, R. Heimrath, I. Wetz, S. Hausberger, R. Haas, G. Kalt, A. Damm, K. Steiniger und S. Oblasser, „Energieautarkie für Österreich 2050: Feasibility Study,“ 2010.
- [13] M. Sommer, F. Sinabell und G. Streicher, „Ein Ausblick auf die Treibhausgasemissionen in Österreich 2021 und 2022,“ WIFO Working papers 628/2021, Wien, 2021.
- [14] Statistik Austria, „Luftemissionsrechnung 2018,“ 2020. [Online]. Available: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/umwelt/luftemissionsrechnung/.
- [15] European Commission, „EU Emission Trading System - Union Registry,“ 2020. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/registry_en#tab-0-1. [Zugriff am 04 05 2021].
- [16] C. Sejkora, L. Kühberger, F. Radner, A. Trattner und T. Kienberger, „Exergy as Criteria for Efficient Energy Systems—A Spatially Resolved Comparison of the Current Exergy Consumption, the Current Useful Exergy Demand and Renewable Exergy Potential,“ Energies, Bd. 13, Nr. 843, 2020.
- [17] M. Anderl, A. Friedrich, M. Gangl, S. Haider, T. Köther, M. Kriech, V. Kuschel, C. Lampert, N. Mandl, B. Matthews, K. Pazdernik, M. Pinterits, S. Poupa, M. Purzner, W. Schieder, C. Schmid, G. Schmidt, B. Schodl, E. Schwaiger, B. Schwarzl, M. Titz, P. Weiss, M. Wieser und A. Zechmeister, „Austria's National Inventory Report 2020,“ Umweltbundesamt, Wien, 2020.
- [18] R. Anantharaman, D. Berstad, E. De Lena, C. Fu, S. Gardasottir, A. Jamali, J.-F. Perez-Calvo, M. Roman, S. Roussanaly, J. Ruppert, O. Stallmann, D. Sutter und M. Voldsund, „CEMCAP Publishable Summary Period 1,“ 2018.
- [19] D. B. Müller, „Stock dynamics for forecasting material flows - Case study for housing in The Netherlands,“ Ecological Economics, Bd. 59, Nr. 1, pp. 142-156, 2006.
- [20] S. Nusselder, A. S. Maqbool, R. Deen, G. Blake, J. Bouwens und R. T. Fauzi, „Closed-loop Economy: Case of Concrete in the Netherlands,“ 2015.
- [21] V. Sousa und J. A. Bogas, „Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production,“ Journal of Cleaner Production, 2021.
- [22] M. S. B. W. Andreas Windsperger, „Perspektiven der Dekarbonisierung für die chemische Industrie in Österreich,“ Institut für industrielle Ökologie, St. Pölten, 2018.
- [23] F. DECHEMA, „Roadmap Chemie 2050, Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland,“ 2019.

- [24] Europäische Kommission, „Going climate neutral by 2050, A strategic long-term vision, a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy,“ 2019.
- [25] McKinsey & Company, „Net-Zero Europa, Decarbonization pathways and socioeconomic implications,“ 2020.
- [26] V. Rodin, J. Lindorfer, H. Böhm und L. Vieira, „Assessing the potential of carbon dioxide valorisation in Europe with focus on biogenic CO₂,“ Journal of CO₂ Utilization, p. 101219, 2020.
- [27] IEA, „IEA G20 Hydrogen report: Assumptions,“ 2020.
- [28] OECD, IEA, NEA und ITF, „Aligning Policies for a Low-carbon Economy,“ OECD Publishing, Paris, 2015.

AIT AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY GMBH

Giefinggasse 2 | 1210 Vienna | Austria

www.ait.ac.at

Fax +43 50550-6679

Dr. Christian Diendorfer

Research Engineer

Integrated Energy Systems

Center for Energy

+43 50550-6448

christian.diendorfer@ait.ac.at

Dr. Bernhard Gahleitner

Business Manager

Center for Energy

+43 50550-3614

bernhard.gahleitner@ait.ac.at