

STUDIE

KLIMANEUTRALITÄT ÖSTERREICHS BIS 2040

BEITRAG DER ÖSTERREICHISCHEN INDUSTRIE



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	Einleitung	4
1.1	Motivation	4
1.2	Methodik und Definitionen	6
1.2.1	Einteilung der österreichischen Industrie in 13 Sektoren	6
1.2.2	Bilanzgrenze der Industrie	7
1.2.3	Das technische Dekarbonisierungspotential	8
1.3	Die Bedeutung der österreichischen Industrie	9
2	Die Österreichische Industrie im Detail – Status Quo	11
2.1	THG-Emissionen der österreichischen Wirtschaft	11
2.2	Die österreichische Industrie im internationalen Vergleich	15
2.3	Die Messung konsumbasierter Emissionen	19
2.4	Der Emissionsgehalt der österreichischen Importe	22
2.5	Sektorale Betrachtung der österreichischen Industrie	24
2.5.1	Bau	28
2.5.2	Bergbau	29
2.5.3	Chemie- und Petrochemie	30
2.5.4	Eisen- & Stahlerzeugung	32
2.5.5	Fahrzeugbau	36
2.5.6	Holzverarbeitung	37
2.5.7	Maschinenbau	38
2.5.8	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	39
2.5.9	Steine & Erden, Glas	40
2.5.10	Papier & Druck	44
2.5.11	Nichteisen-Metalle	48
2.5.12	Textil und Leder	50
2.5.13	Sonstiger produzierender Bereich	51
3	Technisches Dekarbonisierungspotential	52
3.1	Grundlagen und Erläuterungen zu Berechnung und Darstellung	52
3.2	Technische Dekarbonisierungspotentiale der Sektoren	57
3.2.1	Bau	57
3.2.2	Bergbau	58
3.2.3	Chemie- und Petrochemie	60
3.2.4	Eisen- & Stahlerzeugung	62
3.2.5	Fahrzeugbau	65

3.2.6	Holzverarbeitung.....	66
3.2.7	Maschinenbau	67
3.2.8	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak	69
3.2.9	Steine & Erden, Glas	70
3.2.10	Papier & Druck.....	74
3.2.11	Nicht-Eisen Metalle	76
3.2.12	Textil und Leder	77
3.1.13	Sonstiger Produzierender Bereich.....	78
3.3	Zusammenfassung des technischen Dekarbonisierungspotentials	80
3.4	Auswirkungen auf das österreichische Energiesystem.....	83
4	Kosten der Transformation.....	86
4.1	Einschränkungen in der Kostenbewertung	86
4.2	Kosten der Querschnittstechnologien	87
4.2.1	Wärmepumpen	88
4.2.2	CO ₂ -neutrale Gase für energiebedingte Emissionen	88
4.2.3	Elektrifizierung Standmotoren.....	89
4.3	Investitionskosten der Dekarbonisierung in den Industriesektoren.....	90
4.3.1	Bau	90
4.3.2	Bergbau	91
4.3.3	Chemie- und Petrochemie	92
4.3.4	Eisen- & Stahlerzeugung	94
4.3.5	Fahrzeugbau.....	98
4.3.6	Holzverarbeitung.....	99
4.3.7	Maschinenbau	100
4.3.8	Nahrungs- und Genussmittel, Tabak.....	101
4.3.9	Steine & Erden, Glas	102
4.3.10	Papier & Druck.....	104
4.3.11	Nichteisen-Metallurgie	106
4.3.12	Textil und Leder	107
4.3.13	Sonstiger Produzierender Bereich	108
4.4	Zusammenfassende Darstellung der Investitionskosten.....	109
4.5	Instrumente.....	111
5	Zusammenfassung.....	113
6	Literatur	117

1 EINLEITUNG

1.1 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 CO₂e. 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 CO₂e¹ zu erreichen.

Andererseits darf nicht vergessen werden, dass die österreichische Industrie und die ihr zugerechneten Dienstleistungen über 75 Mrd. € zur österreichischen Bruttowertschöpfung beitragen [1]. Dies entspricht 34% der gesamten Wertschöpfung in Österreich. Der Industrie inklusiver der ihr zugerechneten Dienstleistungen bieten 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.

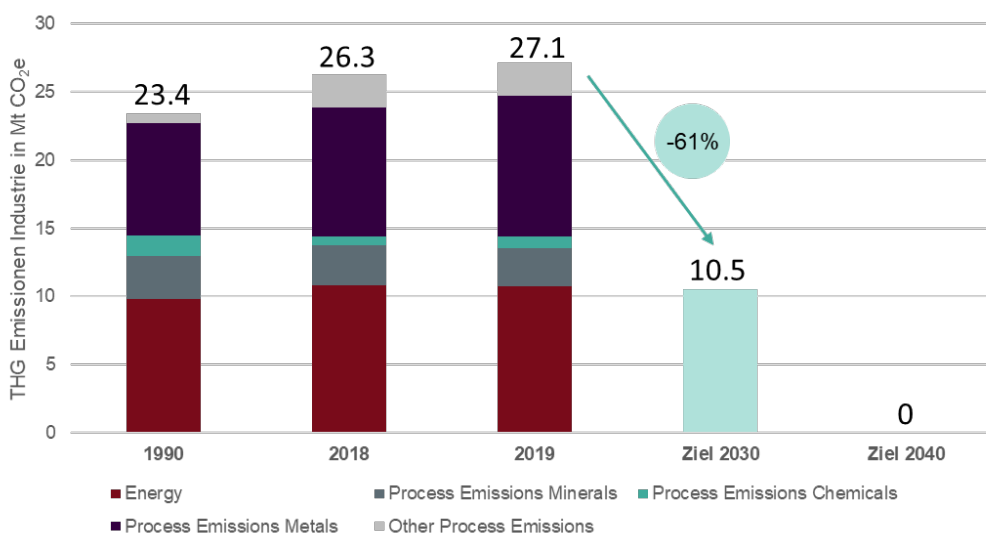


Abbildung 1: Entwicklung der THG-Emissionen und THG-Ziele der österreichischen Industrie für 2030 und 2040. Eigene Darstellung basierend auf [2].

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. Für den ETS-Sektor gelten gesonderte Regelungen auf europäischer Ebene.

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 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.

In weiterer Folge wird in Kapitel 1 die der Arbeit zugrundeliegende Struktur sowie wesentliche Definitionen erläutert und die Bedeutung der Industrie für die österreichische Volkswirtschaft beschrieben. In Kapitel 2 wird ein aktueller Überblick über den Status Quo der THG-Emissionen in Verbindung mit den betreffenden wirtschaftlichen Kennzahlen der hauptursächlichen Prozesse der österreichischen Industrie gegeben. Kapitel 3 beschreibt die technischen Dekarbonisierungspotentiale der wesentlichsten und aussichtsreichsten Technologieoptionen und bildet die Grundlage für die in Kapitel 4 dokumentierte Kostenbewertung dieser Potentiale.

1.2 Methodik und Definitionen

In der vorliegenden Studie werden die THG-Emissionen der gesamten österreichischen Wirtschaft auf Basis der Luftemissionsdaten von EUROSTAT [3] und der Input-Output-Tabelle 2017 [4] 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 2.4). Anschließend werden die 13 Sektoren der österreichischen Industrie detailliert hinsichtlich ihres Dekarbonisierungspotentials und ihrer Dekarbonisierungsoptionen (Kapitel 3.2) und der dazugehörigen Investitionskosten untersucht (Kapitel 4). Für diese Untersuchungen ist die Bilanzgrenze der österreichischen Industrie, welche in Kapitel 1.2.2 erläutert wird, grundlegend.

Zur detaillierten Untersuchung der einzelnen Sektoren wird die Nutzenergieanalyse der Statistik Austria [5] herangezogen. 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 [2] ausgewiesenen Emissionen. Die Emissionswerte aus dem National Inventory Report sind als die offiziellen Zahlen zu werten.

1.2.1 Einteilung der österreichischen Industrie in 13 Sektoren

Die Betrachtung der österreichischen Industrie richtet sich in dieser Studie nach den in der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria ausgewiesenen IEA-Sektoren I 1 bis I 13 [6]. Deren Einteilung und korrespondierenden ÖNACE-Sektoren sind untenstehender Tabelle 1 zu entnehmen. Zusätzlich wurden die Emissionen nach den Gütern bei deren Erzeugung sie anfallen in der CPA-Klassifikation 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.

Tabelle 1: IEA-konforme Zuteilung der Wirtschaftssektoren des produzierenden Bereiches nach [6]

IEA-Sektor	ÖNACE 2008	Bezeichnung
I 1	241-243, 2451, 2452	Eisen- & Stahlerzeugung
I 2	20, 21	Chemie & Petrochemie
I 3	244, 2453, 2454	Nichteisen Metalle
I 4	23	Steine & Erden, Glas
I 5	29, 30	Fahrzeugbau
I 6	25, 26, 27, 28	Maschinenbau
I 7	07, 08, 099	Bergbau
I 8	10, 11, 12	Nahrungs- & Genussmittel, Tabak
I 9	17, 18	Papier & Druck
I 10	16	Holzverarbeitung
I 11	41, 42, 43	Bau
I 12	13, 14, 15	Textil & Leder
I 13	22, 31, 32	Sonstiger Produzierender Bereich

1.2.2 Bilanzgrenze der Industrie

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

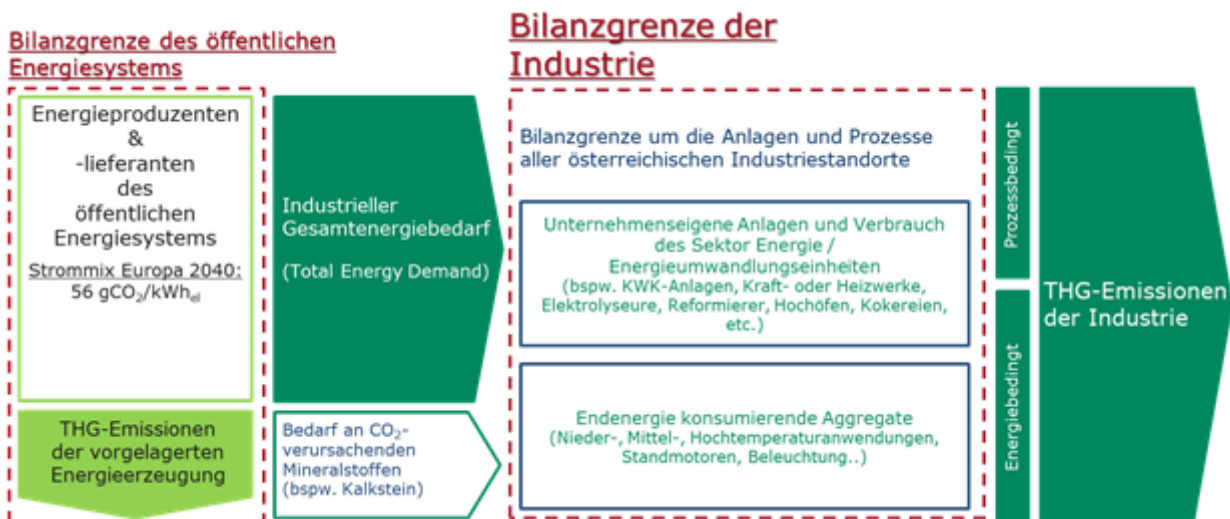


Abbildung 2: Darstellung der industriellen Bilanzgrenze nach [7]. CO₂-Intensität im europäischen Strommix 2040 nach [8]

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 [8].

Die betrachteten THG-Emissionen setzen sich aus energiebedingten, und prozessbedingten Emissionen zusammen, welche in Tabelle 2 beschrieben werden:

Tabelle 2: 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.

1.2.3 Das technische Dekarbonisierungspotential

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. Eine Übersicht über die für die genannten Strategien untersuchten Technologieoptionen wird in Kapitel 3.1 gegeben.

Die Untersuchung von Potentialen hatte in der Vergangenheit in Publikationen der österreichischen Energieforschung bisher vorrangig die Betrachtung von Aufbringungspotentialen (erneuerbarer Energieträger) zum Inhalt. Dabei wird meist zwischen dem theoretischen, technischen, wirtschaftlichen und erschließbaren Potential [9] [10] [11], unterschieden. Abbildung 3 gibt eine Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Potentialdefinitionen.

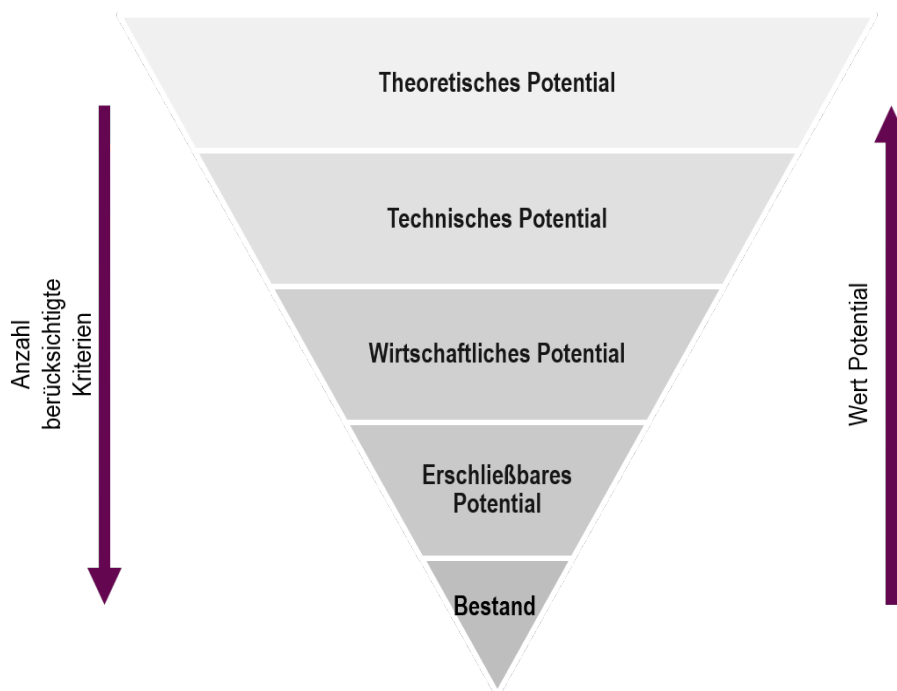


Abbildung 3: Potentialarten in österreichischen Potentialstudien nach [9] [10] [11], eigene Darstellung

Wie in Abbildung 3 ersichtlich ist, weisen theoretische Potentiale die höchsten und erschließbare Potentiale die geringsten Werte auf. Bestände sind als bereits realisierte Potentiale zu betrachten, weshalb diese ebenfalls Bestandteil der darüberliegenden Potentialbegriffe sind. Die berücksichtigten Kriterien zur Berechnung der in dieser Studie herangezogenen Dekarbonisierungspotentiale in der österreichischen Industrie werden nachfolgend in Anlehnung an die Definitionen in [9], [10], [11], [12] näher erläutert:

Das *theoretische Potential* wird ausschließlich über das Vorhandensein oder Nichtvorhandensein von Treibhausgasen in der Bilanzregion beschrieben. Es stellt somit eine absolute Obergrenze dar. Ökologische, ökonomische, soziale, strukturelle oder administrative Aspekte werden dabei nicht berücksichtigt.

Unter dem Begriff des *technischen Dekarbonisierungspotentials* wird in vorliegender Studie 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. 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.

Das *wirtschaftliche Potential* beschreibt jenen Anteil des technischen Potentials, der unter den zugrundeliegenden Wirtschaftlichkeitskriterien genutzt werden kann. Wirtschaftliche Potentiale können demnach zeitlichen Schwankungen unterliegen und durch exogene wie endogene Parameter beeinflusst werden.

Das *erschließbare Potential* stellt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag einer Technologie zur Dekarbonisierung dar. Es ist kleiner als das wirtschaftliche Potential, nähert sich ihm allerdings in einem sehr langen Zeitraum an.

Der *Bestand* ist schlussendlich durch jene Energieanwendungen charakterisiert, die bereits heute THG-neutral bzw. -arm sind und somit keine oder nur mehr geringe zusätzliche Potentiale aufweisen.

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.

1.3 Die Bedeutung der österreichischen Industrie

Daten aus der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung zeigen, dass der Anteil des sekundären Sektors (Bergbau, Industrie, Versorger, Bau) am Bruttoinlandsprodukt (BIP) seit 1995 von 28,9 % auf 25,7% zurückgegangen ist. Trotzdem ist die Industrie aus verschiedenen Gründen noch immer der Kernbereich der

österreichischen Wirtschaft. Erstens, weil zwei Drittel der Ausgaben für Forschung und Entwicklung (F&E) der österreichischen Wirtschaft von der Industrie geleistet werden und das dadurch gewonnene technologische Wissen durch Produktinnovationen zu Erhöhungen der Produktivität in allen anderen Sektoren der Wirtschaft beiträgt. Zweitens, weil 70% der österreichischen Exporte auf die Güter der Industrie entfallen und die Industrie somit wesentlich zur außenwirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit Österreichs beiträgt und so einen höheren Wohlstand ermöglicht. Drittens sorgt die Industrie durch ihre Nachfrage nach Dienstleistungen als Vorprodukte für ihre Produktionsaktivitäten für Wachstum im Dienstleistungssektor. Diese Bedeutung der Industrie hat auch die Europäische Kommission in ihrer Industriestrategie [13] anerkannt. Maßnahmen, die die Industrie stärken sollen, sind etwa eine sichere, saubere und bezahlbare Energie- und Rohstoffversorgung, Leitmärkte für saubere Technologien, oder eine Stärkung des Binnenmarktes und der offenen strategischen Autonomie Europas. Die Europäische Kommission sieht sich in einer Führungsrolle, um den zweifachen, ökologischen und digitalen Wandel, den Europa in den nächsten Jahren zu bewältigen hat, zu gestalten und voranzutreiben.

2 DIE ÖSTERREICHISCHE INDUSTRIE IM DETAIL – STATUS QUO

2.1 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 [14].

Abbildung 4 zeigt die Emissionen in der Produktion verschiedener Gütergruppen in Mt für das Jahr 2018 sortiert nach Sachgütern (unten) und Dienstleistungen. Diese Dienstleistungen sind insbesondere deshalb relevant, weil sie Vorleistungen für die Industrie bereitstellen und so indirekt Emissionen der Industrie verursachen. Die Emissionsdaten auf Branchenebene wurden mit Hilfe der Input-Output-Tabelle 2017 [15] auf Güter umgerechnet. Güter und Branchen entsprechen sich größtenteils, nur bei Energie gibt es eine nennenswerte Produktion außerhalb der Branche Energieerzeugung, etwa in der Papierindustrie. Treibhausgase fallen vor allem bei der Produktion von Metallen (insbesondere Eisen und Stahl) und Glas, Keramik, Steinen und Erden (hier vor allem Zement) an. Deutlich zu sehen ist, dass die Emissionen auf einige wenige Sektoren konzentriert sind, während die Erzeugung einer Reihe von Gütern nur vergleichsweise geringe Emissionen verursacht. Fünf Gütergruppen – (i) Metalle, (ii) Glas Keramik, Steinen und Erden, (iii) Papier und Pappe sowie (iv) Mineralöl²- und (v) chemische Erzeugnisse – sind für den Großteil der Emissionen der heimischen Industrie verantwortlich.

² Die Mineralölverarbeitung wird je nach Datenquelle der Industrie oder dem Sektor Energie zugerechnet.

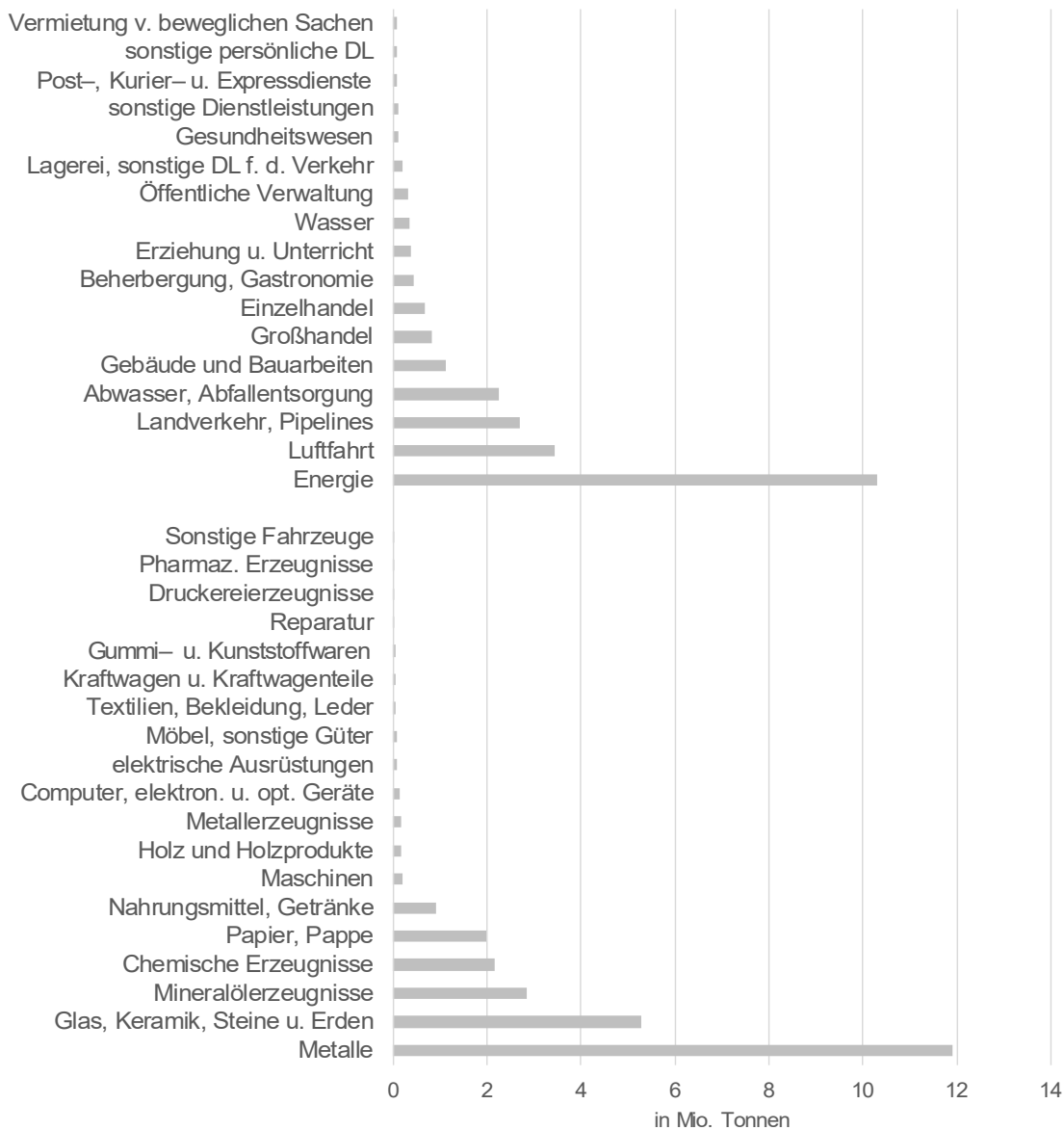


Abbildung 4: THG-Emissionen nach Dienstleistungen (oben) und Sachgütern (unten) in Mio. t, 2018. Eigene Darstellung nach [3], [16], sowie eigenen Berechnungen

Eine andere Perspektive auf die Emissionen der österreichischen Wirtschaft ergibt sich, wenn die absoluten Größen auf die Wirtschaftsleistung (Output bzw. Wertschöpfung) der jeweiligen Gütergruppe bezogen werden. Die folgende Abbildung zeigt die Emissionen pro Mio. Euro Output bzw. Mio. Euro Wertschöpfung³. Dabei werden – wie in den folgenden Grafiken – nur die Produktion der Industrie auf der Ebene dargestellt, da der Fokus dieser Studie auf ebendiesen liegt. Daten zum Output und zur Wertschöpfung stammen aus der Input-Output-Tabelle für Österreich für das Jahr 2017.

Die Daten bestätigen auch hier, 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. Mineralölprodukte stechen mit einer sehr hohen Intensität pro Wertschöpfungseinheit heraus. Der Grund dafür

³ 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.

ist, dass diese Produkte nur mit einer geringen Zahl an Beschäftigten und damit mit geringem Personalaufwand erzeugt werden. Löhne und Gehälter sind der größte Teil der Wertschöpfung.

Am anderen Ende der Verteilung zeigen der Fahrzeugbau und die Erzeugung pharmazeutischer Erzeugnisse einen deutlich geringeren Fußabdruck; Branchen mit einer geringen Emissionsintensität⁴ wurden in eine Grafik innerhalb der Abbildung 5 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.

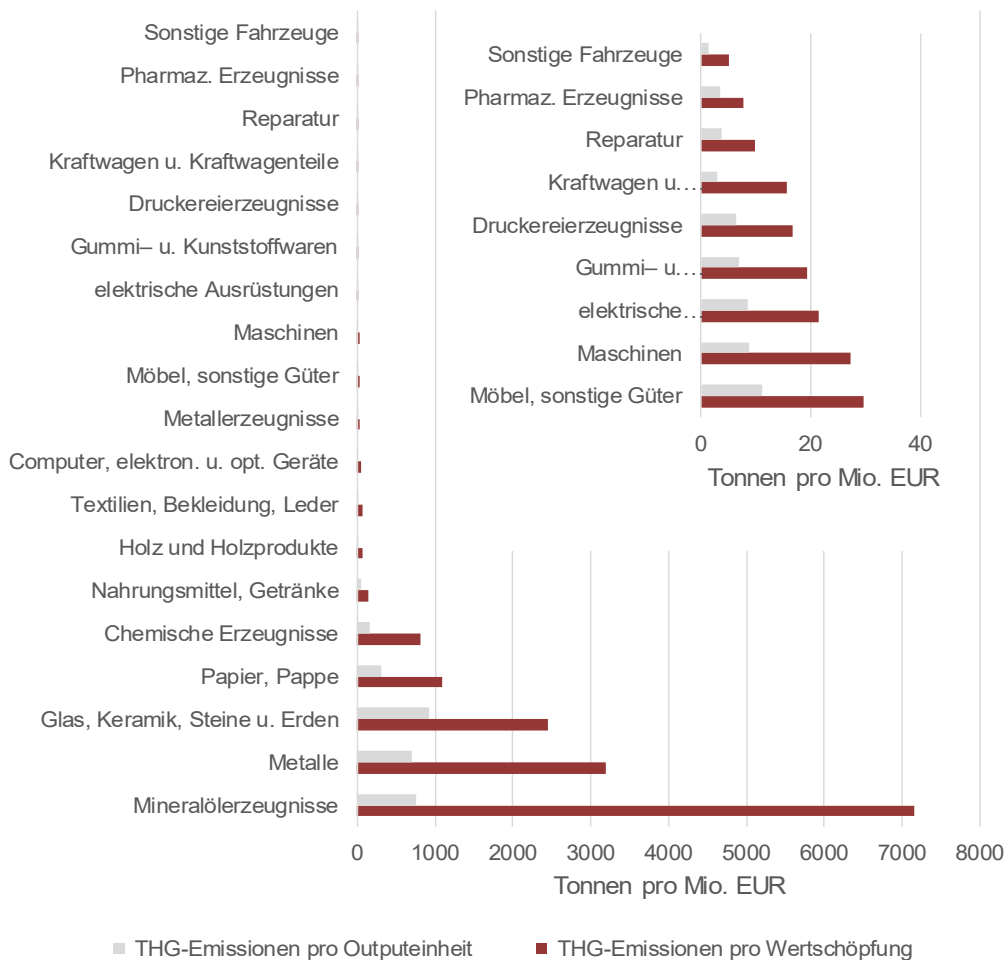


Abbildung 5: THG-Emissionen relativ zum Output und zur Wertschöpfung, 2018. Eigene Darstellung nach [3], [16], sowie eigenen Berechnungen

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 CO_{2e}, die die heimische Wirtschaft verursacht, können 10,5 Mt CO_{2e} dem Endverbrauch und 30,7 Mt CO_{2e} der Produktion von Vorprodukten für die heimische Wirtschaft zugerechnet werden. 18,7 Mt CO_{2e} entstehen bei der Bereitstellung von Produkten und Dienstleistung für Kunden außerhalb Österreichs und gehen somit in den Export, siehe Abbildung 6.

⁴ Die Emissionsintensität einer Branche beschreibt die THG-Emissionen in Tonnen pro Mio. Euro Wertschöpfung.

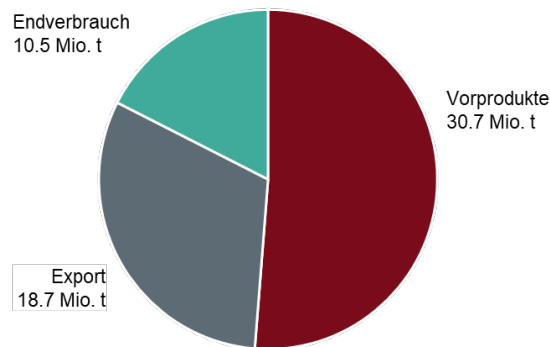


Abbildung 6: Verteilung der THG-Emissionen der österreichischen Wirtschaft nach Destination, 2018. Eigene Darstellung nach [3], [16], sowie eigenen Berechnungen

Betrachtet man lediglich die THG-Emissionen der österreichischen Industrie, siehe Abbildung 7, 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 für den Export emittiert.

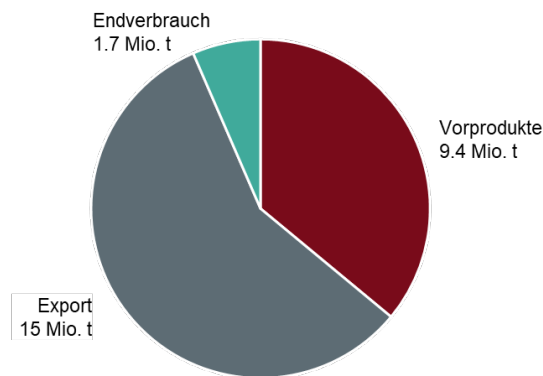


Abbildung 7: Verteilung der THG-Emissionen der österreichischen Industrie nach Destination, 2018. Eigene Darstellung nach [3], [16], sowie eigenen Berechnungen

Die Abbildung 8 zeigt die Mengen, in denen emissionsintensive Güter als Vorprodukte für andere Produkte, für Exporte und die Endnachfrage verwendet werden. Dabei werden die Emissionen nach dem Verhältnis der Verwendungen hochgerechnet.

Die Grafik zeigt deutlich, dass besonders bei emissionsintensiven Gütern nur ein geringer Teil der Emissionen auf den Endverbrauch (im wesentlichen Konsum und Investitionen) in Österreich zurückgeht. Besonders gering ist dieser Anteil bei Metallen; nur 232 kt von insgesamt 11,9 Mt CO₂e, die bei der Erzeugung von Metallen anfallen, sind mit dem inländischen Endverbrauch verbunden. Exporte sind anteilmäßig vor allem bei Metallen (8,1 Mt CO₂e), Glas, Keramik, Steinen und Erden (1,86 Mt CO₂e), chemischen Erzeugnissen (1,83 Mt CO₂e) und bei Papier und Pappe (1,36 Mt CO₂e) ein wichtiger Treiber für Emissionen.

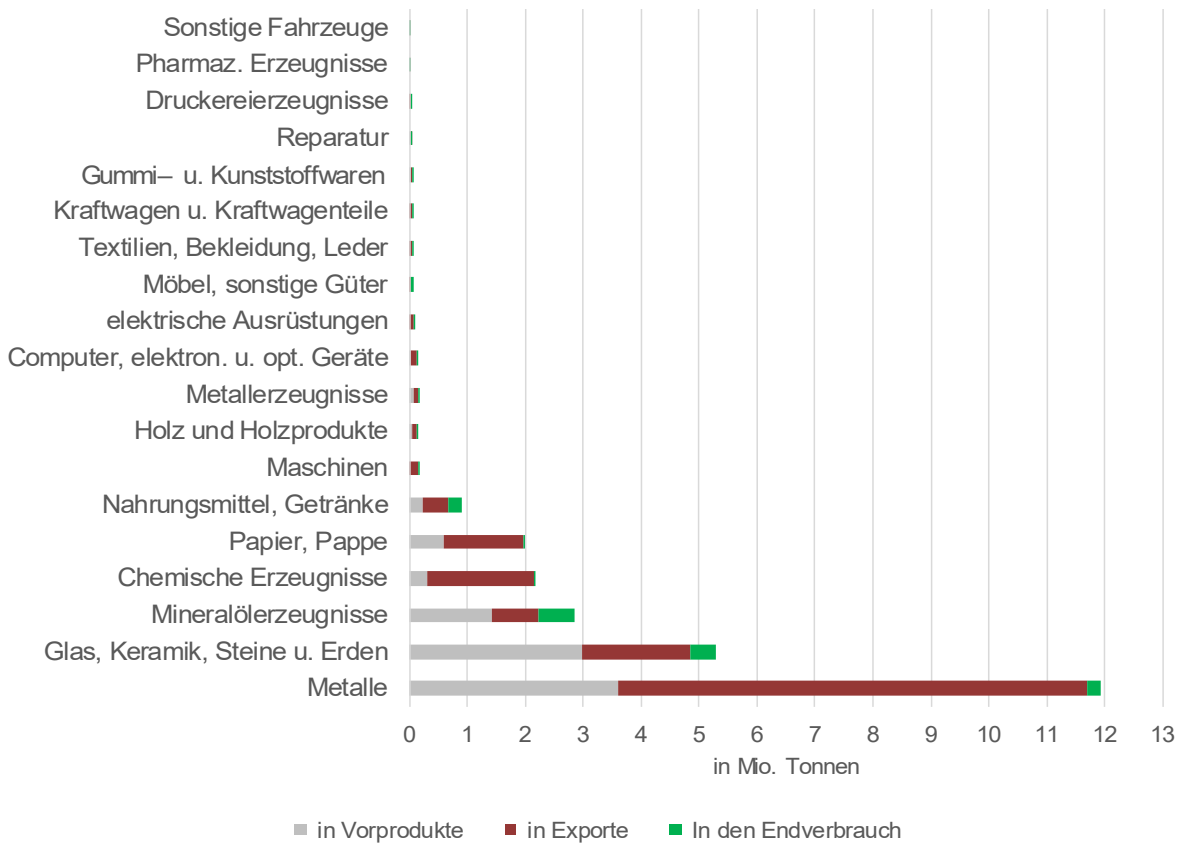


Abbildung 8: THG-Emissionen nach Verwendungszweck der Güter pro Sektor, 2018. Eigene Darstellung nach [3], [16], sowie eigenen Berechnungen

Die Emissionen der österreichischen Industrie sind also im hohen Maß mit Exporten verbunden, worauf schon in einer Studie der IV und WKO [17] hingewiesen wurde. Allerdings werden durch die Importe von im Ausland produzierten Industriegütern ebenfalls Emissionen verursacht, die im nächsten Kapitel genauer untersucht werden. Der österreichische THG-Fußabdruck wird also durch die Teilnahme Österreichs an der internationalen Arbeitsteilung und den globalen Wertschöpfungsketten wesentlich bestimmt.

2.2 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 9 versucht, diese Frage mit Daten von Eurostat [3] zu beantworten. Wir vergleichen zuerst die gesamte Industrie. Die Vergleichsländer sind hier die Länder der EU-27, die Schweiz und das Vereinigte Königreich. Der Vergleich beinhaltet unterschiedlich große Länder, sodass die Emissionen nicht in absoluten Werten, sondern relativ als Emissionsintensität in Tonnen pro Mio. Euro Output angegeben werden. 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.

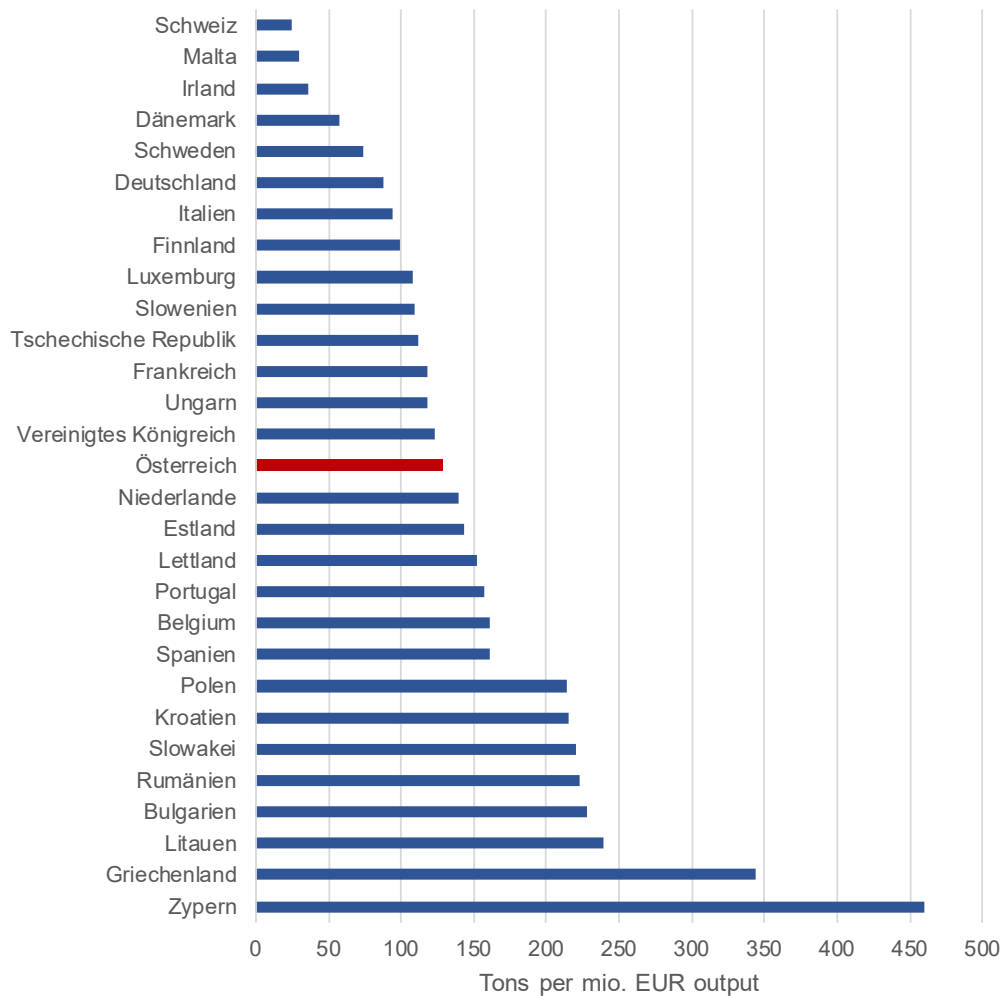


Abbildung 9: THG-Emissionen der Industrie in Tonnen pro Mio. Euro Output in verschiedenen europäischen Ländern, 2018 Quelle: EUROSTAT [3]

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. Die folgende Grafik (Abbildung 10) vergleicht deshalb den Anteil der fünf emissionsintensivsten Industriesektoren (Papier, Chemie, Mineralölerzeugung, Steine und Erden sowie Metallerzeugung) an der gesamten Wertschöpfung der Industrie. Deutlich zu sehen ist, dass der Anteil in Österreich über dem EU-Durchschnitt liegt, der auf eins festgelegt ist. Nur Griechenland, Belgien, Finnland, die Niederlande und Schweden haben höhere Anteile. Dieser hohe Anteil ergibt sich vor allem aus der Größe der österreichischen Eisen- und Stahlerzeugung. Die Wirtschaftsstruktur bestimmt deshalb zu einem Gutteil die Emissionsintensität der gesamten Industrie.

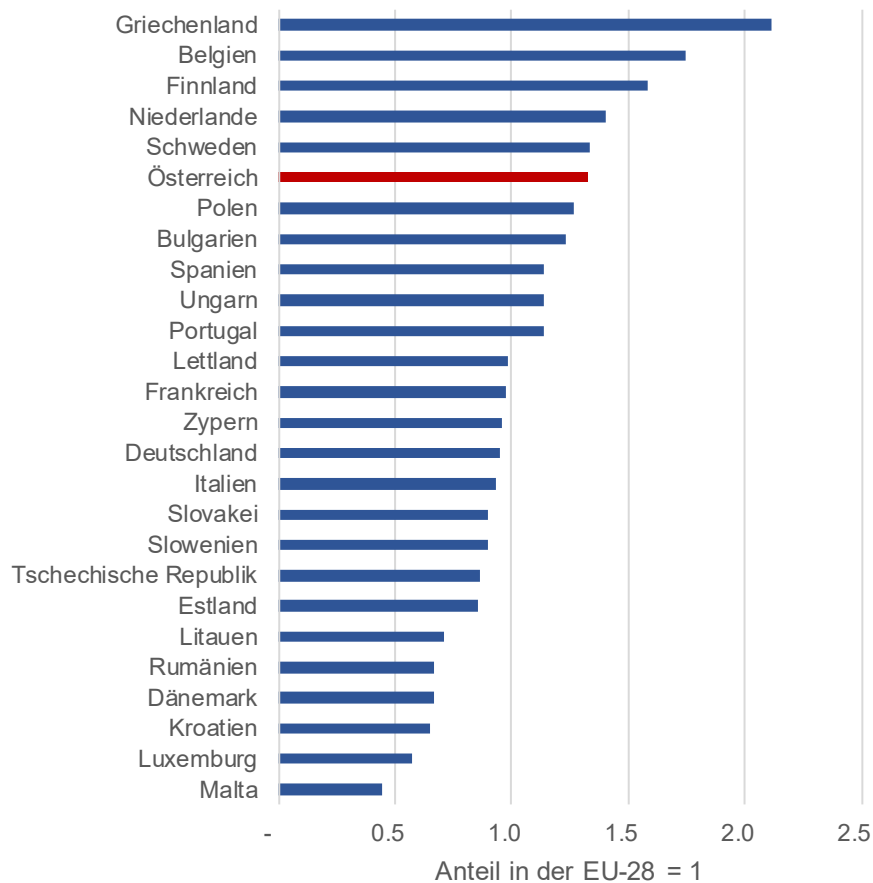


Abbildung 10: Anteil der fünf emissionsintensivsten Branchen an der gesamten Industrie in verschiedenen europäischen Ländern, 2018
Quelle: EUROSTAT [3]

Größenunterschiede bei emissionsintensiven Branchen können also internationale Vergleiche beeinflussen. Deshalb vergleicht die Abbildung 11 unten die Emissionen verschiedener Länder auf der Ebene einzelner Branchen auf Grundlage der Emissionen pro Outputeinheit in Euro. Enthalten sind die Haupthandelspartner Deutschland und Italien sowie einige kleine Länder mit vergleichbarem technologischem Standard gemessen an den F&E-Ausgaben. Die Vergleichsdaten dieser Länder sind auf die Emissionsintensität der österreichischen Vergleichsbranche standardisiert. Wenn im Diagramm der Wert eines Vergleichslandes kleiner als eins ist, emittiert die jeweilige Branche des Landes weniger THG pro Outputeinheit als die österreichische Vergleichsbranche.

Insgesamt liegt die Emissionsintensität der österreichischen Wirtschaft bei der Mineralölverarbeitung, bei der Erzeugung von Papier und Pappe sowie bei der Metallerzeugung 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. Insgesamt zeigen sich auch auf Branchenebene einige große Unterschiede zwischen den Ländern. Diese Unterschiede können sich etwa daraus ergeben, dass es innerhalb der Branchen noch einmal Unterschiede in den ausgeübten Aktivitäten und den erzeugten Produkten gibt. Es ist zum Beispiel möglich, dass für die Produktion desselben Gutes unterschiedliche Produktionstechnologien zum Einsatz kommen (Elektrostahl statt Reduktion mit Koks, Wärme wird mit Gas statt Strom erzeugt), oder in manchen Ländern besonders emissionsintensive Zweige der Produktion möglicherweise gar nicht existieren. Die Gründe für die Unterschiede sind also stark branchenabhängig.

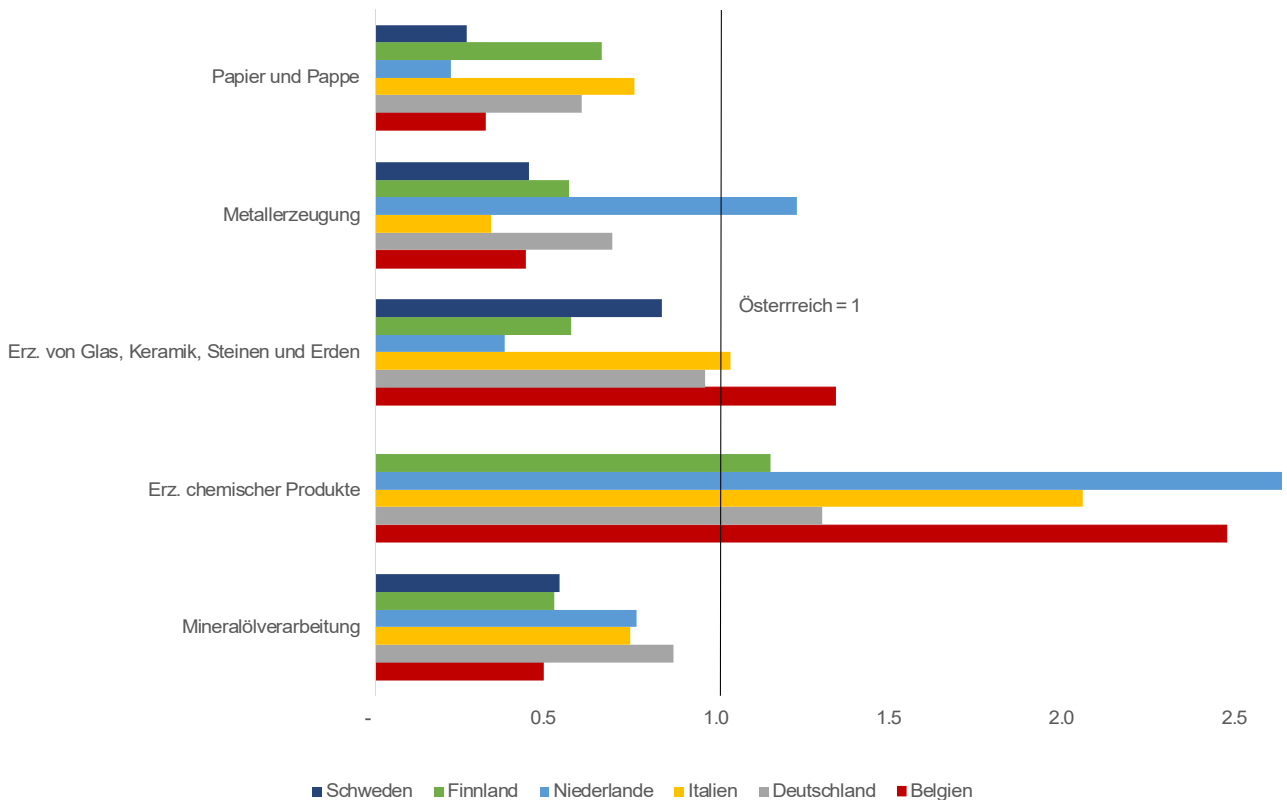


Abbildung 11: Emissionsintensität verschiedener Branchen im Ländervergleich, 2018. Quelle: EUROSTAT [3]

Ein Nachteil der EUROSTAT-Daten ist, dass keine außereuropäischen Länder berücksichtigt werden. Hier muss auf ältere Quellen zurückgegriffen werden, etwa auf eine Studie der OECD [18], die auf Daten aus 2015 basiert. Die Ergebnisse sind mit denen von EUROSTAT vergleichbar: innerhalb der EU liegt die Emissionsintensität der österreichischen Industrie im Mittelfeld, in einzelnen Branchen wie etwa Metallerzeugung emittieren die österreichischen Firmen allerdings mehr als die Unternehmen anderer Länder. Das ist das Ergebnis von Unterschieden in der eingesetzten Technologie, etwa die Reaktion von Eisenerz mit Koks statt der Erzeugung von Stahl aus Schrott mit Elektroschmelze. Im Vergleich zu Ländern wie Indien, China oder Korea ist die österreichische Industrie allerdings deutlich emissionsärmer.

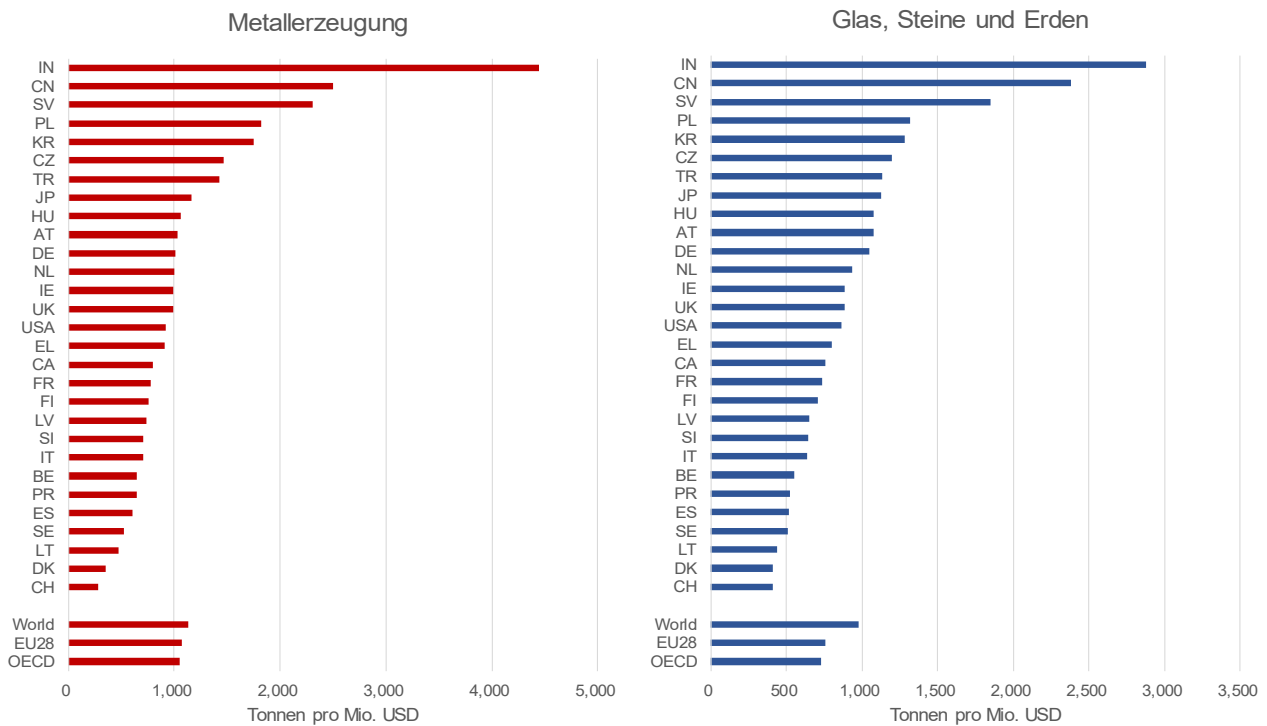


Abbildung 12: Emissionsintensität der Metallerzeugung und der Erzeugung von Glas und Waren aus Steinen und Erden im internationalen Vergleich, 2015 Quelle: Yamano und Guilhoto (2020) [18]

Die Vergleiche mit führenden europäischen Ländern lassen den Schluss zu, dass für die österreichische Industrie noch Potential für eine Senkung der Emissionsintensität besteht – allerdings gilt dieser Schluss nur, wenn Gleiches mit Gleichem verglichen wird und die Branchen der Vergleichsländer tatsächlich auch dieselben Produkte mit derselben Technologie wie ihre österreichischen Mitbewerber herstellen. Außerdem sind NACE-2-Steller, in denen die Vergleichsdaten vorliegen, oftmals recht breite Kategorien, die eine Vielzahl von Aktivitäten auf verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette von Primärerzeugung bis zu Halb- und Fertigprodukten umfassen können. Hinzu kommt, dass die Wirtschaftsstatistik alle Aktivitäten eines Unternehmens nach der größten Aktivität klassifiziert. Ein Weg, solche möglichen Verzerrungen durch Aggregation verschiedener Aktivitäten zu vermeiden, ist ein Vergleich von industriellen Prozessen, wie etwa in den BAT reference documents (BREFs) der Europäischen Union⁵. Dabei 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.

2.3 Die Messung konsumbasierter Emissionen

Bis jetzt wurden nur die direkten, produktionsbasierten THG-Emissionen der Industrie untersucht. Der THG-Fußabdruck von Wirtschaftssektoren besteht allerdings aus zwei Komponenten; erstens jener Menge an Treibhausgasen, die eine Branche direkt ausstößt, etwa durch ihre Produktionsprozesse und zweitens jene Emissionen, die eine Branche indirekt verursacht, indem sie Vorprodukte verwendet, für deren Erzeugung wiederum Treibhausgase ausgestoßen wurden. Beispielsweise ist für den Fußabdruck eines Autos also nicht

⁵ <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>

nur der THG-Ausstoß der Automobilindustrie relevant, sondern auch jene Emissionen, die etwa in der Stahlindustrie bei der Erzeugung der Bleche anfallen. Ebenso entsteht ein Gutteil der Emissionen der Lebensmittelindustrie indirekt bei der Erzeugung pflanzlicher und tierischer Rohstoffe.

In der Literatur hat sich für diese Effekte der Begriff der konsumbasierten Emissionen etabliert [18], [19]. Konsumbasierte Emissionen beinhalten alle Emissionen, die entlang der Produktionskette dieser Güter und Dienstleistungen entstehen und werden jenem Land zugeschrieben, in dem der Endkonsum stattfindet [19], Diese Emissionen werden also sichtbar, indem die Menge der Vorprodukte berechnet wird, die zur Erzeugung einer bestimmten Menge eines Gutes für die Endnachfrage benötigt werden und in einem zweiten Schritt, wie viel THG-Emissionen zur Produktion der Vorprodukte und des Endprodukts angefallen sind. Damit sind die Emissionen über gesamten die Wertschöpfungskette erfasst. Im Gegensatz dazu ordnen die direkten oder produktionsbasierten Emissionen nur die gesamten Luftschadstoffe jener Branche zu, die sie direkt ausstoßt.

Für die konsumbasierten THG-Emissionen muss die Vorlieferstruktur der österreichischen Wirtschaft berücksichtigt werden. Hier helfen die Input-Output-Tabellen der Statistik Austria. Diese zeigen den Zusammenhang zwischen Inputs, Nachfrage und Güterverwendung. Der gesamte Output x besteht aus der Vorleistungsnachfrage Ax und der Endnachfrage nach Gütern y :

$$Ax + y = x$$

A ist eine Matrix, die die Vorleistungsverflechtungen in der Wirtschaft darstellt, während x und y Vektoren sind. Die Ausgangsgleichung $Ax + y = x$ kann nach x aufgelöst werden und ergibt:

$$x = (I - A)^{-1} * y$$

Die Gleichung kann so interpretiert werden: Für die Befriedigung einer bestimmten Endnachfrage y müssen insgesamt Güter im Ausmaß von $(I - A)^{-1}$ mal y produziert werden. Neben der Endnachfrage müssen auch jene Güter produziert werden, die als Vorprodukte verwendet werden. Die Elemente der Vektoren x und y sind der Output der jeweiligen Sektoren in Mio. Euro. Wenn nun beiden Vektoren jeweils mit einer Matrix (c) multipliziert werden, die in der Hauptdiagonale den durchschnittlichen THG-Ausstoß jedes Sektors pro Mio. Euro Output beinhaltet und in die Gleichung oben eingesetzt wird, ergibt sie den gesamten THG-Ausstoß (E), der direkt und indirekt für die Befriedigung einer bestimmten Endnachfrage y erforderlich ist. Die Endnachfrage besteht aus dem Konsum, den Exporten und den Investitionen.

$$E = c * (I - A)^{-1} * y$$

Konsumbasierte Emissionen können in zwei Varianten gerechnet werden: erstens national ohne Berücksichtigung von Importen, zweitens international einschließlich jener Vorprodukte die importiert werden. In der nationalen Variante bleibt die Summe der gesamten Emissionen der österreichischen Wirtschaft in einer produktions- und einer konsumbasierten Perspektive gleich bei 60 Mio. t, es gibt also keine Doppelzählungen. Was sich ändert, ist die Zurechnung der Emissionen zu den einzelnen Sektoren und damit die Intensitäten der Sektoren.

Abbildung 13 unten zeigt die direkten, produktionsbasierten sowie die konsumbasierten THG-Emissionen für die Güter der Industrie. Da der Schwerpunkt der Studie auf der österreichischen Wirtschaft liegt, werden hier zunächst nur Emissionen, die in Österreich entstanden sind, berücksichtigt. Emissionen, die in der Form von Importen der österreichischen Wirtschaft zugerechnet werden können, finden sich weiter unten im Text.

Der Unterschied zwischen produktions- und konsumbasierten Emissionen ist bei Mineralölserzeugnissen am geringsten, weil hier über die inländischen Vorleistungsverknüpfungen hinweg nur wenig zusätzliche Belastungen auftreten. Anders ist es bei Metallen, Steinen und Erden oder Papier und Pappe; hier sorgen Emissionen durch die Produktion von Vorprodukten zu deutlichen höheren Gesamtemissionen. Besonders deutlich ist das bei Nahrungsmitteln und Getränken, wo die konsumbasierten Emissionen achtmal höher als die produktionsbasierten Emissionen sind. Das ist vor allem ein Ergebnis der hohen Emissionsintensität der landwirtschaftlichen Produktion. Ähnliches gilt für Metallerzeugnisse, wo die Emissionen der Vorprodukte ebenfalls aus der Erzeugung von Metallen stammen.

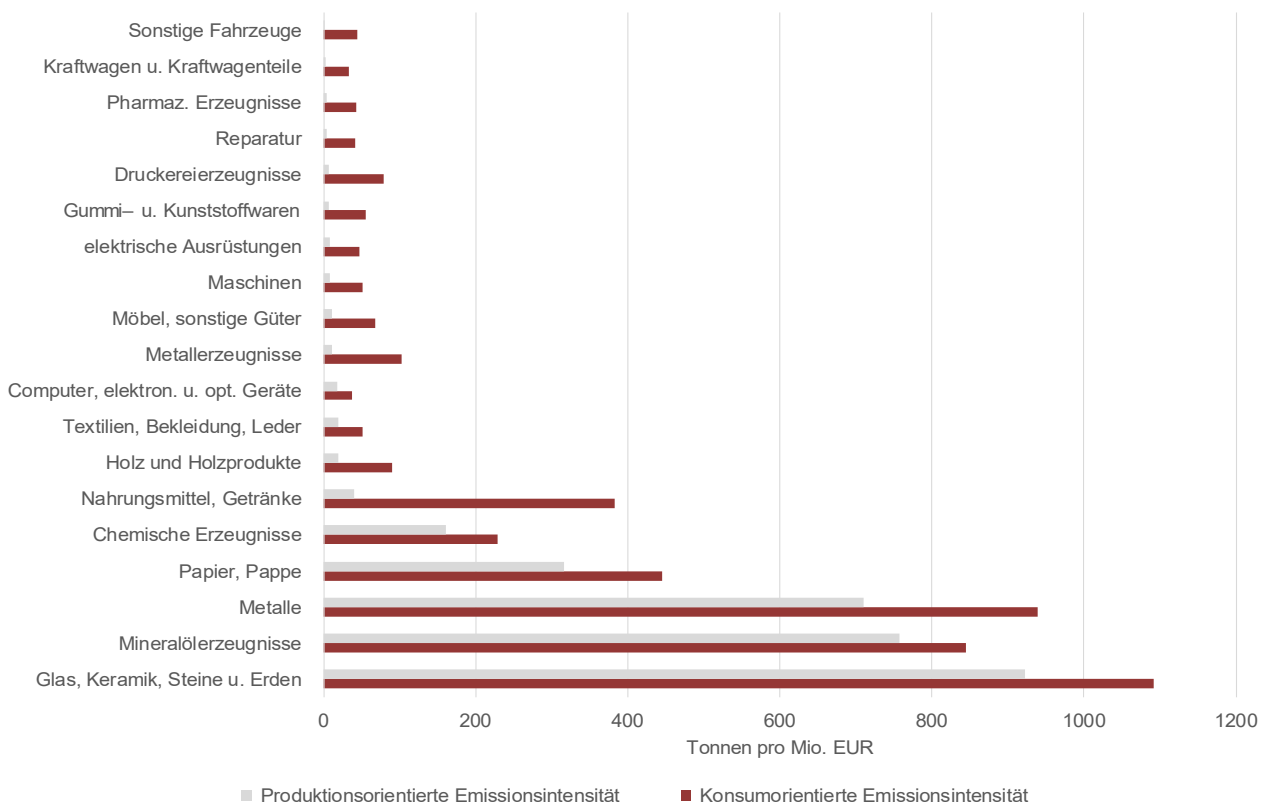


Abbildung 13: Produktions- und konsumbasierte Emissionen bei der Erzeugung von Industriegütern, 2018. Quelle: EUROSTAT [3], Statistik Austria [16], eigene Berechnungen

Insgesamt fällt auf, dass die Unterschiede in der Emissionsintensität zwischen einzelnen Branchen in einer konsumbasierten Perspektive etwas kleiner werden. Da es aber kaum Vorprodukte gibt, die zum größten Teil in einer einzigen Branche als alleiniger Input verwendet werden, bleiben die Unterschiede zwischen produktions- und konsumbasierten Emissionen allerdings meistens klein. Die deutlichsten Unterschiede zwischen beiden Perspektiven lassen sich bei der Erzeugung von Kraftwagen und -teilen, pharmazeutischen Erzeugnissen, Druckereierzeugnissen und bei Reparaturdiensten erkennen. Wie oben gezeigt, reichen diese Unterschiede allerdings nicht aus, die Emissionsintensität dieser Produkte wesentlich anzuheben. Insgesamt ergeben sich auf nationaler Ebene keine großen Unterschiede zwischen der produktions- und konsumbasierten Perspektive.

2.4 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 Berechnung der THG-Emissionen dieser importierten Güter ist allerdings nicht einfach, weil Importe aus verschiedenen Ländern stammen und bei ihrer Erzeugung, wie oben gezeigt, unterschiedlich viel THG emittiert wurde. Ein erster Schritt ist, zu ermitteln, wie groß die Anteile verschiedener Herkunftsländer an den gesamten österreichischen Importen sind. Diese Informationen liefert die Außenhandelsstatistik. Es wird hier die COMTRADE HS96-Datenbank der UNO für 2017 verwendet, um mit der Input-Output-Tabelle kompatibel zu bleiben. Die Daten sind auf der Ebene der CPA-2-Steller aggregiert. Ein Gut auf Ebene der CPA-2-Steller (z. B. Papier und Pappe) korrespondiert dabei genau mit der Erzeugung dieses Gutes auf der Ebene der NACE-2-Steller (Erzeugung von Papier und Pappe) Nachdem die Außenhandelsdaten Dienstleistungen nur teilweise erfassen, konzentriert sich die Analyse auf Industriegüter.

In einem zweiten Schritt werden die Importvolumina aus den einzelnen Ländern mit den Emissionsintensitäten der jeweiligen Sektoren dieser Länder multipliziert. Für die Mitgliedsländer der EU inklusive des Vereinigten Königreichs sowie der Schweiz werden diese Intensitäten von Eurostat für das Jahr 2018 angeboten (siehe Kap. 2.2). Für Länder außerhalb der Europäischen Union werden die Ergebnisse eines OECD-Projekts ([18]) verwendet. Diese Intensitäten beziehen sich im Unterschied zu EUROSTAT auf 2015 und sind konsumbasiert errechnet worden, womit sie tendenziell höher ausfallen. Außerdem erfassen diese OECD-Intensitäten nur CO₂ und keine anderen THG-Emissionen. Mit Hilfe der Daten für Deutschland, das in beiden Datensätzen vorkommt, wurden diese Intensitäten auf den Wertebereich der EUROSTAT-Daten transferiert. Der Anteil der EU-28 an den österreichischen Exporten von Industriegütern betrug 2018 72%, sodass nur für die Minderheit der Importe auf die OECD-Daten zurückgegriffen werden muss. Besonders hoch ist der Anteil von Importen aus Ländern außerhalb der EU bei pharmazeutischen Produkten, Textilien und Bekleidung, sowie Computern, elektronischen und optischen Geräten.

Die Volumina importierter Emissionen sind beachtlich. Insgesamt ergeben sich aus Importen von Industriegütern zusätzliche THG-Emissionen von 15,3 Mt CO₂e, womit sich der THG-Fußabdruck der österreichischen Industrie 2018 von 26 Mt CO₂e auf 41,3 Mt CO₂e. erhöht. Damit entsprechen die importierten THG-Emissionen für Industriegüter 58% der gesamten Emissionen der österreichischen Industrie. Das entspricht etwa dem Unterschied zwischen konsum- und produktionsbasierten Emissionen in den Untersuchungen von [20] und [21] für die Jahre bis 2013. Diese Studien schätzten die gesamten

konsumbasierten Emissionen Österreichs inklusiver der Haushalte und des Verkehrs auf etwa 110 bis 130 Mt CO₂e.

Abbildung 14 zeigt den Vergleich der gesamten inländischen sowie importierten THG-Emissionen. Die bei weitem höchsten importierten Emissionen finden sich in der Erzeugung von Metallen (5,3 Mt CO₂e), chemischen Produkten (2,4 Mt CO₂e) sowie bei Glas, Keramik, Steinen und Erden (2,2 Mt CO₂e). 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 Mt CO₂e), die Slowakei (1,5 Mt CO₂e) und China (1,3 Mt CO₂e). Der hohe Wert der Slowakei ergibt sich vor allem aus dem Import von Metallen und der hohen Emissionsintensität der Erzeugung in diesem Land.

Es stellt sich nun die Frage, ob Österreich seinen THG-Fußabdruck reduzieren kann, indem es Güter aus dem Ausland importiert, anstatt sie im Inland zu produzieren. Zur Beantwortung dieser Frage gewichten wir die Importe mit den entsprechenden Emissionsintensitäten der österreichischen Industrie. Das Ergebnis von 24,6 Mt CO₂e für 2018 unterscheidet sich nur wenig von der tatsächlich emittierten Menge von 26,1 Mt CO₂e. Ein Ersatz der inländischen Produktion durch Importe würde die Emissionen also nur geringfügig reduzieren, was auch vor dem Hintergrund der dafür notwendigen massiven Eingriffe in Eigentumsrechte keine gangbare Strategie scheint. Ebenso klein wäre die Verringerung der Emissionen, wenn alle Importe im Inland produziert werden würden (15,9 vs. 15,3 Mt CO₂e). Wesentlich zielführender scheinen hier Investitionen zur Senkung der Emissionsintensität wie sie in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

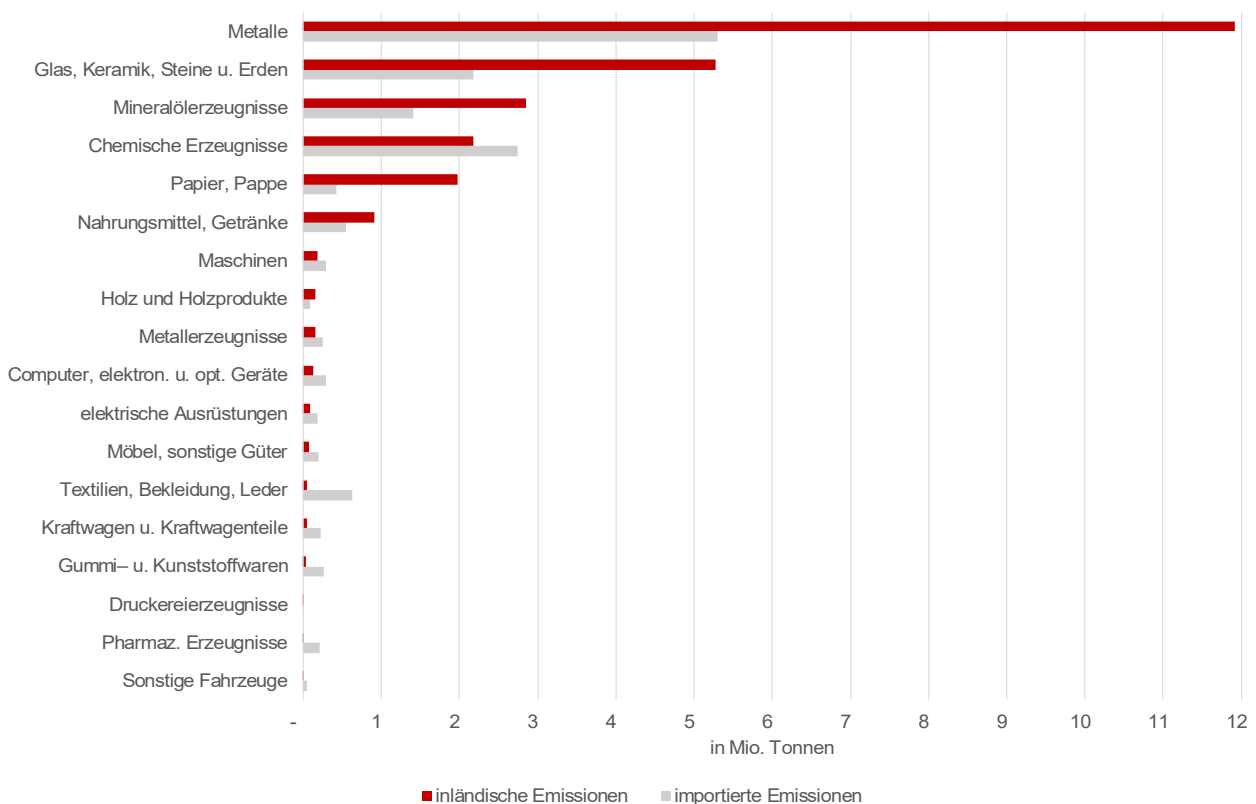


Abbildung 14: Gesamte inländische sowie importierte THG-Emissionen, 2018. Quelle: EUROSTAT, Statistik Austria, Yamano und Guilhoto (2020) [18], eigene Berechnungen

Diesen importierten Emissionen stehen auch beträchtliche THG-Emissionen gegenüber, die bei der Erzeugung von Exportgütern anfallen. Wie oben berechnet, machen diese Emissionen etwa 15 Mt CO₂e aus.

Aus den exportierten Gütern (z. B. Stahl oder Papier) lässt sich vermuten, dass diese wiederum im Ausland als Vorprodukte eingesetzt werden. Es stehen also Importe von THG-Emissionen und etwa gleich große Exporte gegenüber, sodass, der gesamte THG-Fußabdruck der heimischen Industrie auch unter Einrechnung importierter THG-Emissionen 26 Mt CO₂e im Jahr 2018 nicht wesentlich übersteigt.

2.5 Sektorale Betrachtung der österreichischen Industrie

Die in den vorherigen Kapiteln untersuchten Erzeugnisse werden nach der IEA Klassifizierung in 13 verschiedenen Sektoren produziert. Tabelle 3 zeigt einen Ausschnitt der wesentlichen Struktur- und Leistungsdaten dieser 13 Sektoren 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 3: Kennzahlen der österreichischen Industriesektoren 2019 [1]

Sektor	Unternehmen	bedeutende Einzelemittenten ⁶	Ausstoß der Einzelemittenten in kt CO ₂ e	Beschäftigte	Bruttowertschöpfung in Mio. €
Bau	37 923	0	-	318 776	19 183
Bergbau ⁷	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

⁶ Bedeutende Einzelemittenten sind hier jene Betriebe, die im ETS aufscheinen. Tochterunternehmen von Konzernen wurden zusammengefasst.

⁷ 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.

Die 10 größten industriellen Emittenten sind Abbildung 15 zu entnehmen und zeichnen sich durch ihre Zugehörigkeit zu den Sektoren Eisen- und Stahlerzeugung, Steine und Erden, Glas, sowie Papier und Druck aus.

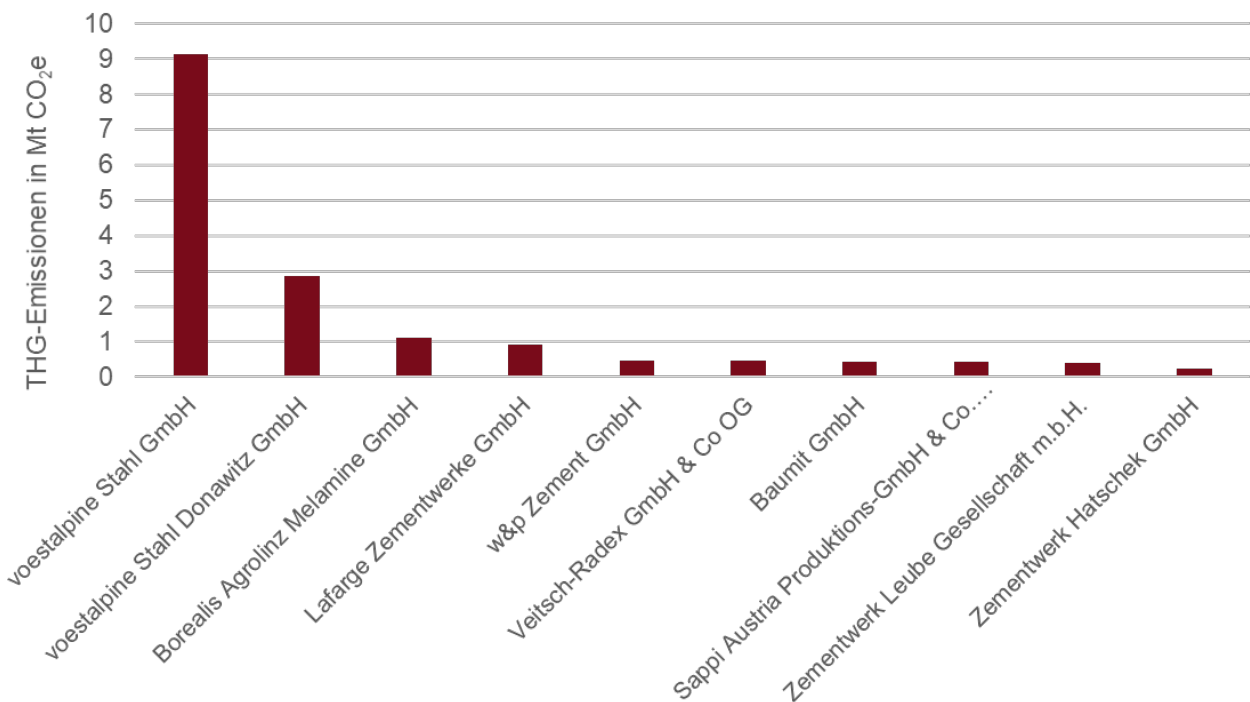


Abbildung 15: Die zehn größten Emittenten der österreichischen Industrie gemäß ETS-Datenbank 2019 [22]

Betrachtet man nun die einzelnen Sektoren der Industrie etwas detaillierter, so kann die THG-Emissionen nach der Quelle (Energieträger oder Transformationsprozess) und Nutzenergiekategorie unterteilen. Die in diesem Kapitel gezeigten Daten basieren in erster Linie auf der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria [5], die mit Hilfe der spezifischen Emissionswerte der einzelnen Energieträger des Umweltbundesamts [2] in CO₂-Equivalenten umgerechnet wurden. Zusätzlich wurden die Transformationsprozesse innerhalb der industriellen Bilanzgrenze, wie beispielsweise Elektrolyseure oder Hochöfen, auf Basis ihrer Prozessparameter ergänzt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Nutzenergieanalyse nur jene Energiemengen beschreibt, die tatsächlich in der Anlage genutzt wird. Etwaige Verluste in Aggregaten zur Energiebereitstellung (z.B. Gaskesseln zur Wärmebereitstellung) werden nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund erscheinen die in diesem Kapitel gezeigten THG-Emissionen geringer als in den Grafiken in den vorherigen Kapiteln. Durch diesen Ansatz ist es jedoch möglich, die indirekten Emissionen von elektrischer Energie und Fernwärme zu inkludieren. Für elektrische Energie und Fernwärme werden für die Status Quo-Erhebung die spezifischen Emissionen nach [23] verwendet. Somit können aus den folgenden Darstellungen jene Energieträger und Nutzenergiekategorien identifiziert werden, die wesentlich zu den THG-Emissionen des Industriesektors beitragen, exakte Zahlenwerte für die Gesamtemissionen der Sektoren sind ergänzend den vorherigen (bzw. nachfolgenden) Kapiteln zu entnehmen.

Abbildung 16 schlüsselt die THG-Emissionen der 13 betrachteten 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 CO_{2e} wesentlich zu den THG-Emissionen der österreichischen Industrie bei. Über Erdgas bereitgestellte Endenergie führt in Summe zu Emissionen von 7 Mt CO_{2e}. Der Einsatz elektrischer Energie in der Industrie führt zu indirekten Emissionen von 7 Mt CO_{2e}. Diese Emissionen werden jedoch in offiziellen Publikationen des Umweltbundesamts oder der Statistik Austria dem Sektor Energie und nicht der Industrie angerechnet.

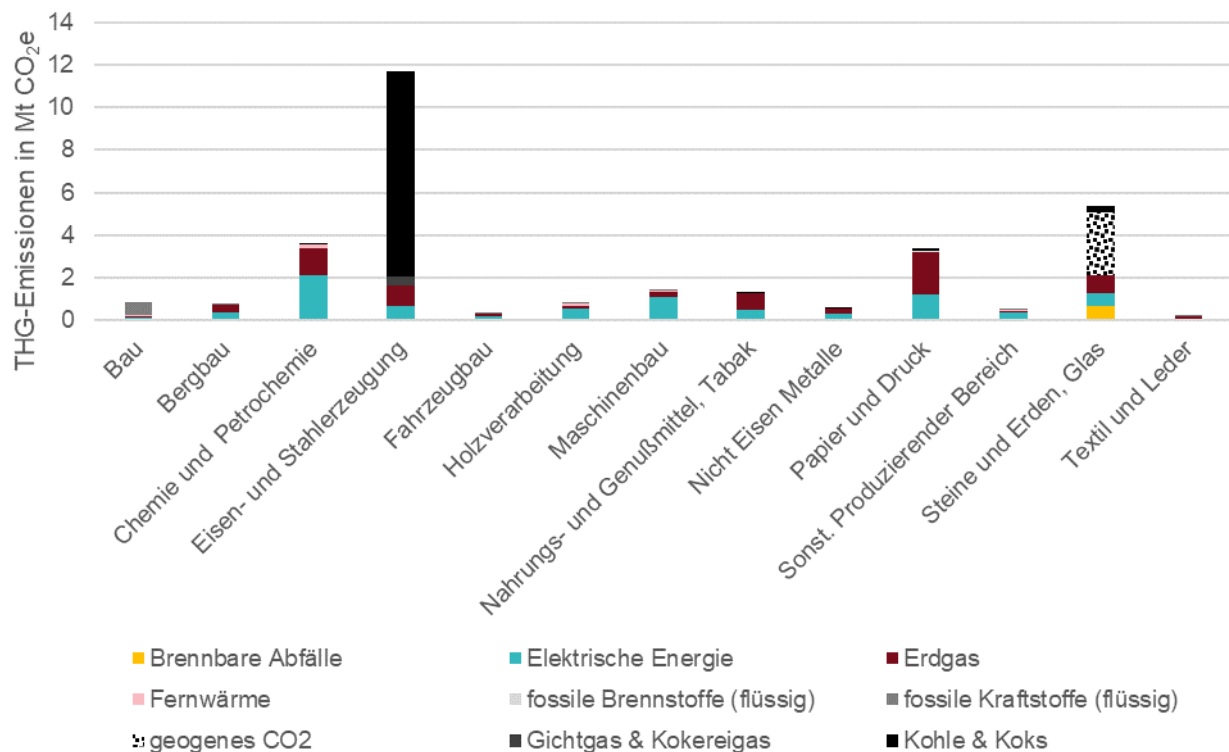


Abbildung 16: THG-Emissionen der 13 IEA Sektoren nach Energieträger, 2019. Eigene Darstellung basierend auf [5], [2] und eigenen Berechnungen.

Abbildung 17 schlüsselt die THG-Emissionen nach Nutzenergiekategorien auf. Transformationsprozesse sind hier mit ca. 12,5 Mt CO_{2e} mit Abstand die größte THG-Quelle. Vergleicht man dies nun mit Abbildung 16, 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 CO_{2e} verantwortlich. Die für den Betrieb von Standmotoren eingesetzte Endenergie verursacht Emissionen von 5,8 Mt CO_{2e}, 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 CO_{2e}.

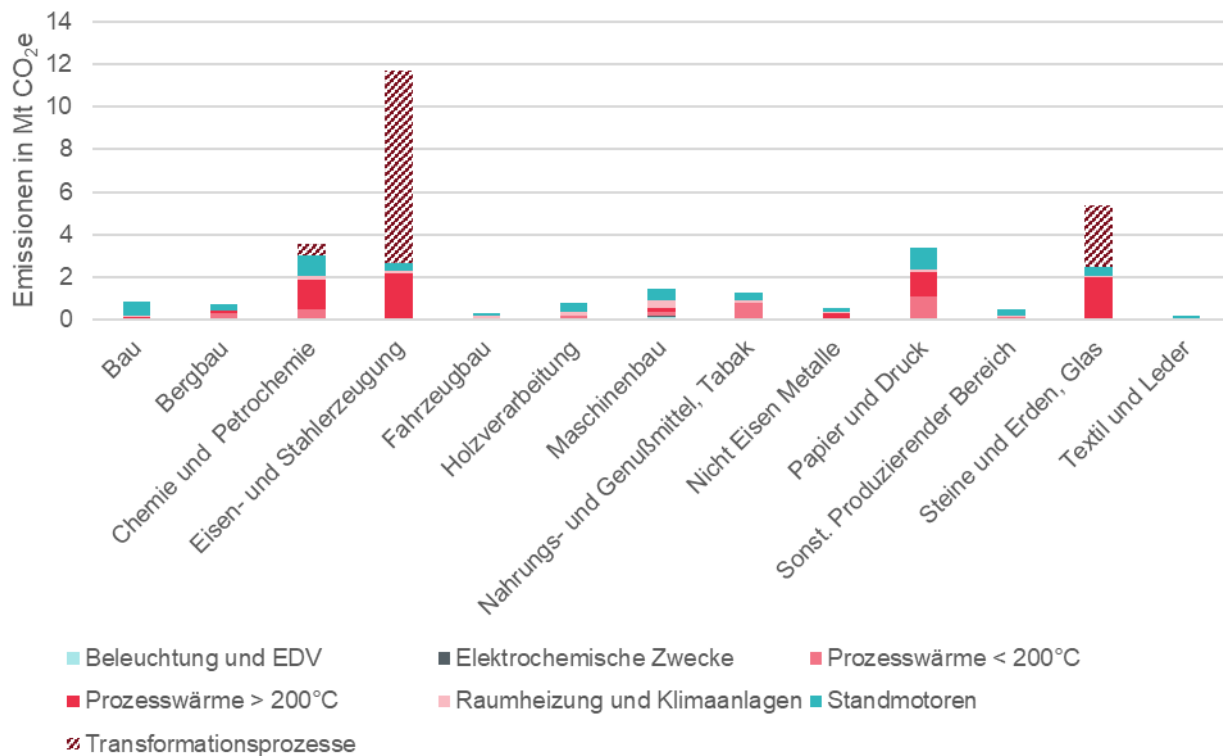


Abbildung 17: THG-Emissionen der 13 IEA Sektoren nach Nutzenergiekategorie, 2019. Eigene Darstellung basierend auf [5], [2] und eigenen Berechnungen.

Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen die gleichen Daten wie Abbildung 16 und Abbildung 17, jedoch in der Form des Energieverbrauchs und ohne Umrechnung auf CO₂-Äquivalente. Da den geogenen Emissionen des Sektor Steine und Erden, Glas kein Energiegehalt zugewiesen werden kann, sind sie in den Grafiken nicht ersichtlich.

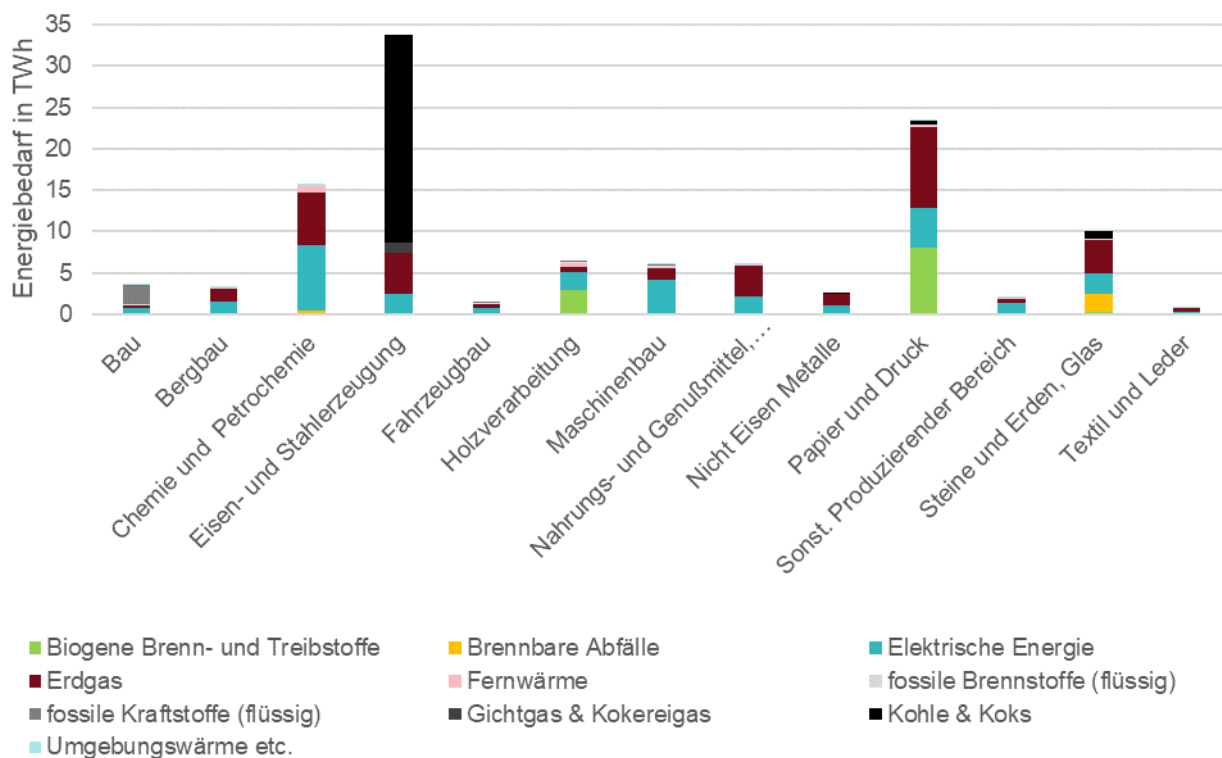


Abbildung 18: Energiebedarf der 13 IEA Sektoren nach Energieträger, 2019. Eigene Darstellung basierend auf [5] und eigenen Berechnungen.

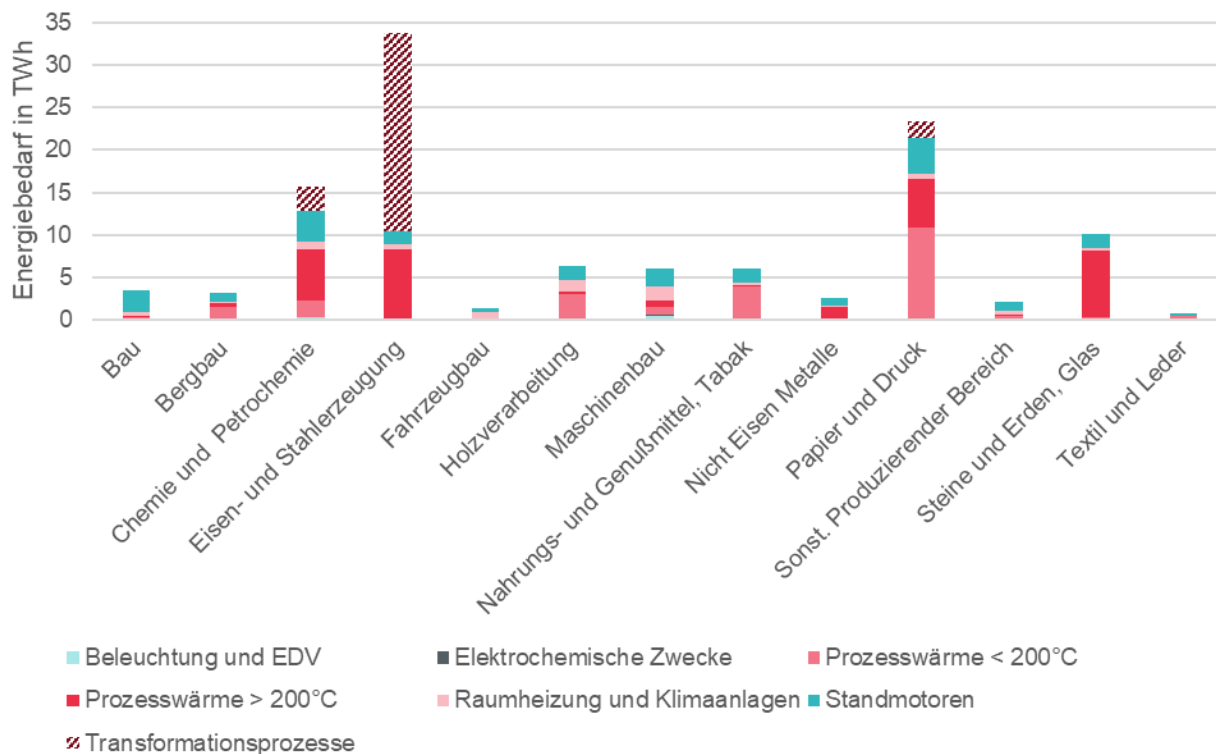


Abbildung 19: Energiebedarf der 13 IEA Sektoren nach Nutzenergiekategorie, 2019. Eigene Darstellung basierend auf [5] und eigenen Berechnungen.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Energieströme und THG-Quellen der einzelnen Sektoren im Detail beschrieben.

2.5.1 Bau

Der Sektor Bau ist sehr kleinteilig organisiert und umfasst fast 38 000 Unternehmen mit über 300 000 Beschäftigten. Die Bruttowertschöpfung des Sektors betrug im Jahr 2019 19 Mrd.€. Strabag SE ist das mit Abstand größte Bauunternehmen in Österreich mit einem Nettoumsatz von über 16,6 Mrd.€, gefolgt von der Porr AG mit ca. 3,5 Mrd.€ [24]. Kein Unternehmen des Sektors Bau ist im ETS gelistet.

Anzahl Unternehmen	37 923
Beschäftigte	318 776
Wertschöpfung in Mio.€	19 183
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	1,12
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	4,3%

Der Energieverbrauch der Baubranche betrug im Jahr 2019 3 494 GWh. Dies entspricht 0,8% des österreichischen und 3,2% des industriellen Energiebedarfs.

Abbildung 20 zeigt den Endenergieeinsatz und die dazugehörigen THG-Emissionen des Sektors Bau. Die Nutzenergiekategorie mit den höchsten THG-Emissionen sind Standmotoren, die zu einem überwiegenden Anteil mit fossilen Energieträgern (in erster Linie Diesel) betrieben werden. Die Kategorie Standmotoren enthält neben tatsächlichen Standmotoren auch Off-Road Fahrzeuge, womit sämtliche Baumaschinen auch in dieser Kategorie inkludiert sind. In diesem Sektor entstehen in erster Linie energiebedingte THG-Emissionen aus sonstigen Quellen können für den Zweck dieser Studie vernachlässigt werden. Laut Luftemissionsstatistik [16] betragen die sonstigen THG-Emissionen sowie die CO₂-Emissionen aus sonstigen Quellen lediglich 3,8%.

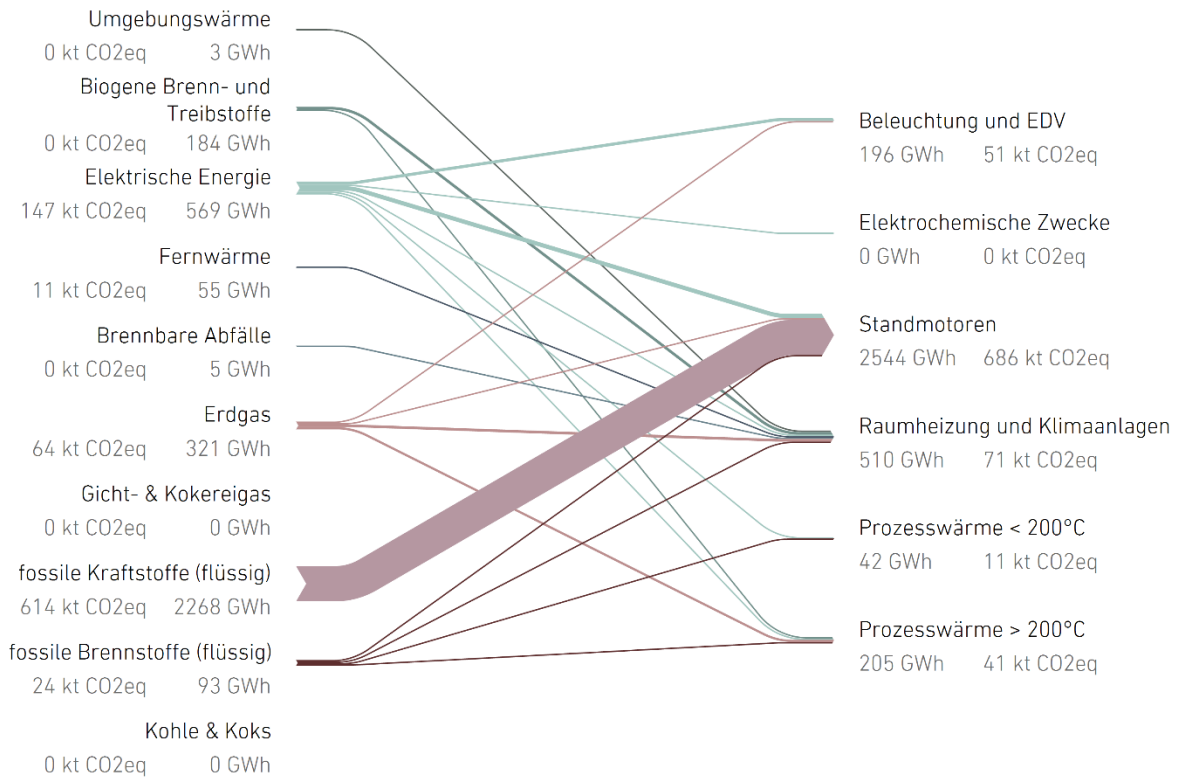


Abbildung 20: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Bau“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

Im Vergleich mit anderen Industriesektoren fällt auf, dass die Baubranche den zweithöchsten Anteil an fossilen THG-Emissionen mit 92,2% der Gesamtemissionen [16] ausstößt. Wobei hier, wie bereits eingangs erwähnt, die dieselbetriebenen Baumaschinen den größten Anteil beitragen. Im Gegensatz zu typischen Standmotoren, die im Allgemeinen relativ einfach elektrifiziert werden können, sind für Baumaschinen Lösungen erforderlich, die weiterhin die hohe Mobilität ermöglichen, die im Einsatz benötigt wird.

2.5.2 Bergbau

Der Sektor Bergbau besteht in Österreich aus 318 Unternehmen, die ca. 6 000 Personen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung des Sektors beträgt ca. 630 Mio.€. Dieser Sektor umfasst einerseits den Abbau von Erzen (3 Unternehmen mit 670 Beschäftigten und einer Bruttowertschöpfung von 117 Mio.€) und andererseits den Abbau von Steinen und anderen geologischen Produkten.

Anzahl Unternehmen	318
Beschäftigte	ca. 6 000
Wertschöpfung in Mio.€	ca. 630
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	1,0
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	3,9%

Im Abbau von Natur- und Kalkstein (inkl. Kies, Sand und Ton) sind 292 Unternehmen mit ca. 4 500 Beschäftigten und einer Bruttowertschöpfung von 391 Mio.€ tätig. Zwei Unternehmen im Sektor Bergbau sind im ETS gelistet und emittieren gemeinsam ca. 264 kt CO₂e, siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Bergbau inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Gewinnung von Steinen und Erden a.n.g.	263 758
Veitsch-Radex Breitenau	227 618
Styromagnesit Steirische Magnesitindustrie GmbH	36 140
Gesamt	263 758

Abbildung 21 zeigt den Endenergieeinsatz und die dazugehörigen THG-Emissionen des Sektors Bergbau. Die meiste Endenergie wird für die Bereitstellung von Prozesswärme unter 200 °C benötigt, gefolgt vom Betrieb von Standmotoren. Die in diesem Sektor eingesetzten Standmotoren sind bereits im Wesentlichen elektrifiziert, wodurch es hier zu indirekten Emissionen kommt, die dem Sektor Energie zuzurechnen sind.

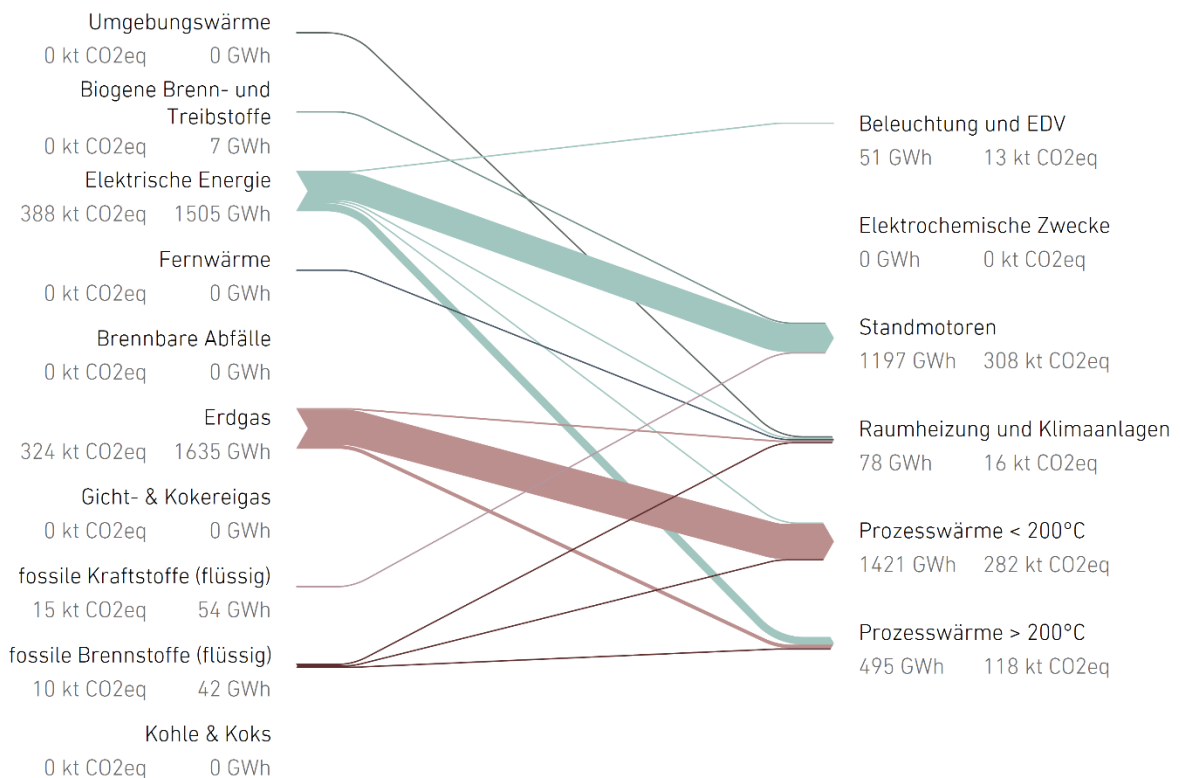


Abbildung 21: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Bergbau“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.3 Chemie- und 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, siehe Tabelle 5. 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 im Chemiapark Linz. 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.

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%

Tabelle 5: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Chemie- und Petrochemie inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO _{2e}
Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen	1 104 501
Borealis Agrolinz Melamine Ammoniakanlage	962 179
Borealis Agrolinz Melamine Salpetersäureanlage	81 598
AMI Agrolinz Melamine International Linz	60 724
Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien	271 597
Jungbunzlauer Wulzeshofen	234 709
Atmosa PSA	27 429
DSM Fine Chemicals Austria Linz	9 459
Herstellung von Chemiefasern	262 481
Lenzing AG Faser+Energie 1, Zellstoff, Papier	172 994
Energie- und Medienzentrale Heiligenkreuz ⁸	89 487
Herstellung von sonstigen chemischen Erzeugnissen a.n.g.	73 351
Bioethanolanlage Pischelsdorf	73 351
Herstellung von pharmazeutischen Grundstoffen	57 869
Sandoz Werk Kundl	57 869
Herstellung von Kunststoffen in Primärformen	31 911
Dynea Krems	20 111
Borealis Schwechat	11 800
Herstellung von sonstigen anorganischen Grundstoffen und Chemikalien	2 126
Solvay Ebensee	2 126
Gesamt	1 803 836

Abbildung 21 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 CO_{2e}.

⁸ Energie- und Medienzentrale der Firma Lenzing AG am Standort Heiligenkreuz

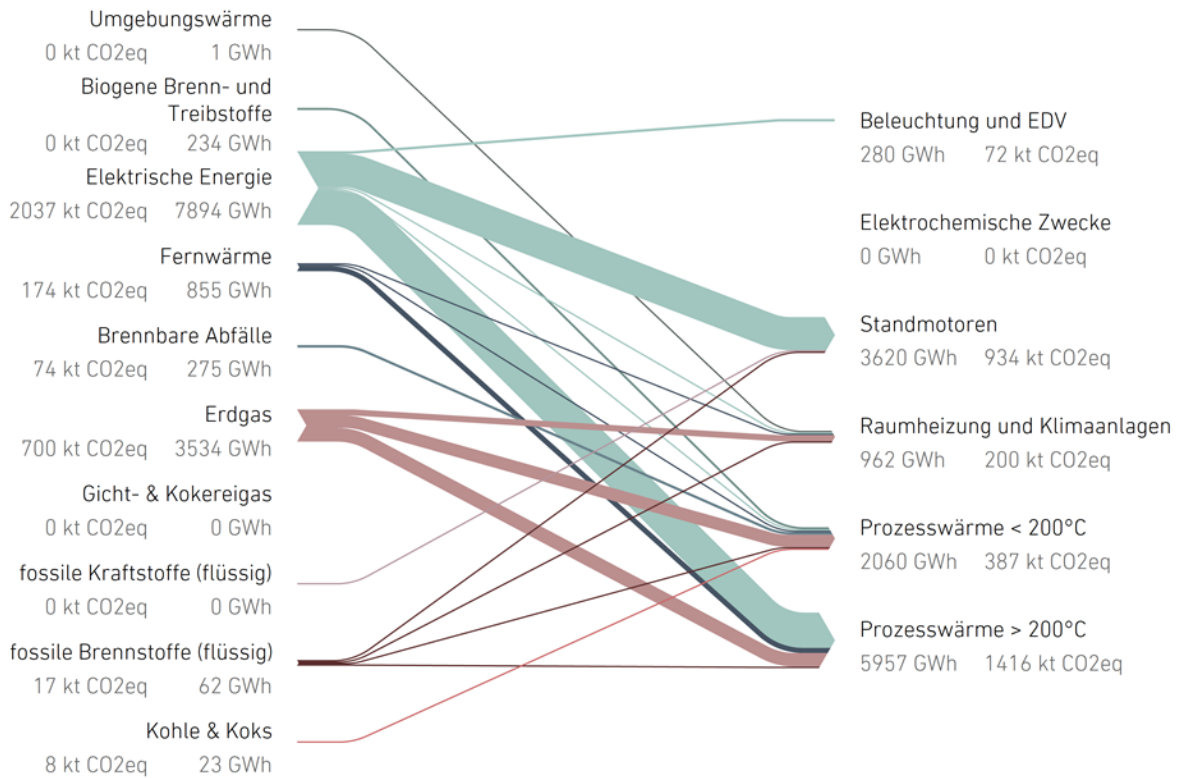


Abbildung 22: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Chemie- und Petrochemie“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.4 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

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%

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, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Eisen- & Stahlerzeugung inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Erzeugung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen	11 952 918
Voestalpine Stahl Linz	8 812 969
Sinteranl., Hochöfen, Stahlwerk Donawitz	2 846 643
Stahlproduktion Böhler Edelstahl Kapfenberg	129 297
voestalpine Schienen GmbH	48 666
voestalpine Wire Rod Austria GmbH	39 612
Stahlwerk Marienhütte GmbH	36 550
Breitenfelder Edelstahl Mitterdorf	26 777
voestalpine BÖHLER Bleche GmbH & Co KG	12 404
Herstellung von Stahlrohren, Rohrform-, Rohrverschluss- und Rohrverbindungsstücken aus Stahl	62 610
voestalpine Tubulars GmbH & Co KG	62 610
Gesamt	12 015 528

Der Sektor kann weiters in die Bereiche Primär-Stahlerzeugung und Sekundär-Stahlerzeugung aufgeteilt werden. Seine Energieflüsse sind im Sankey-Diagramm in Abbildung 23 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. Neben CO₂ entstehen in der Kokerei und der Hochofen-/LD-Konverterroute auch energiereiche Kuppelgase, die in Kraftwerken und KWK-Anlagen für die Strom- und Dampf- bzw. Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Gemeinsam mit dem Einsatz fossiler Energieträger in Höhe von 7 TWh für die Deckung des Endenergiebedarfs der in Abbildung 24 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 24 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 24 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 24, dass in der Eisen- und Stahlerzeugung Endenergie in erster Linie für die Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme eingesetzt wird.

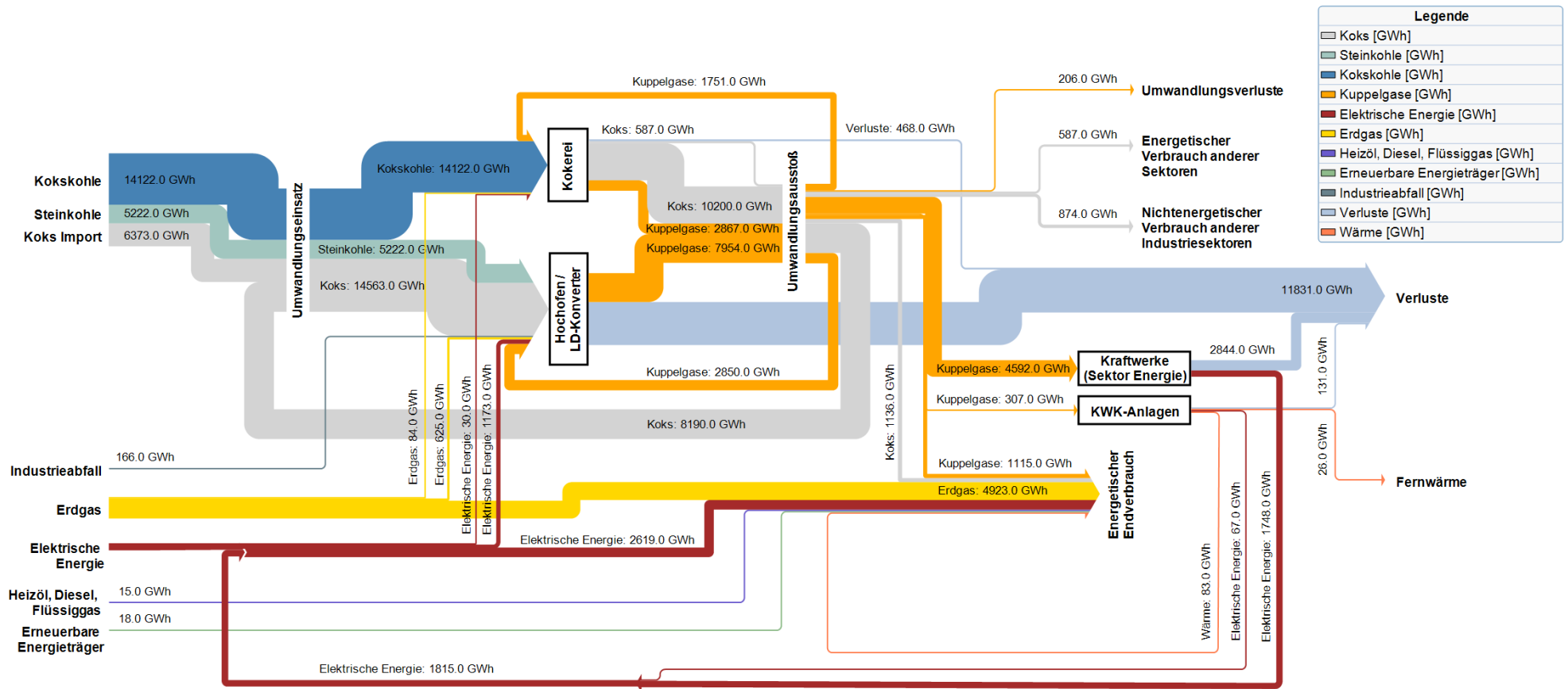


Abbildung 23: Energieflussdiagramm der Eisen- & Stahlerzeugung

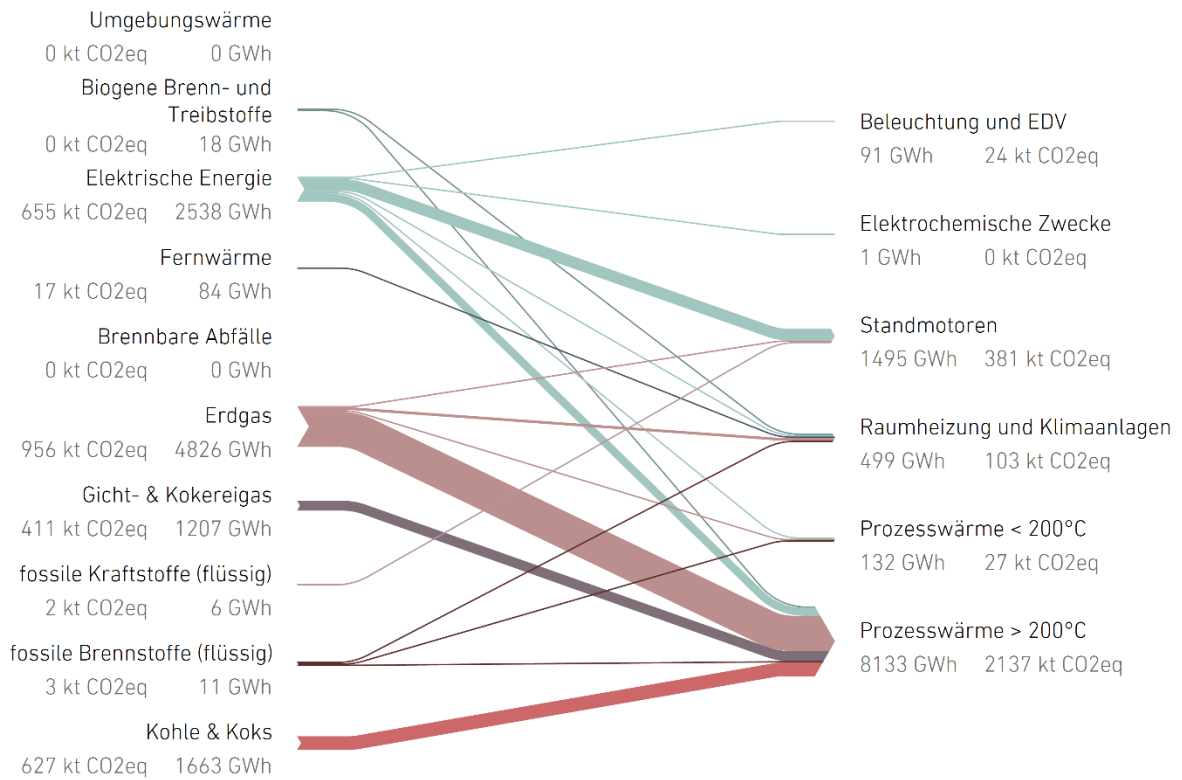


Abbildung 24: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Eisen- & Stahlerzeugung“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.5 Fahrzeugbau

Der Sektor Fahrzeugbau besteht in Österreich aus 333 Unternehmen, die in Summe 51 695 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 4,9 Mrd.€. Zwei Unternehmen des Sektors sind im ETS gelistet, die gemeinsam Emissionen in der Höhe von 24 kt CO₂e und damit ca. die Hälfte des gesamten Sektors verursachen, siehe Tabelle 7.

Anzahl Unternehmen	333
Beschäftigte	51 695
Wertschöpfung in Mio.€	4 897
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	0,05
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	0,2%

Tabelle 7: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Fahrzeugbau inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenmotoren	24 481
Magna Steyr Werk 1 Graz	14 494
BMW Motoren Steyr	9 510
Magna Steyr Werk 2 Graz	477
Gesamt	24 481

Abbildung 25 zeigt den Endenergieeinsatz und die dazugehörigen THG-Emissionen des Sektors „Fahrzeugbau“. Da dieser Sektor nicht energieintensiv ist, wird die meiste Endenergie für Raumheizung und Klimaanlage eingesetzt, wobei hier der Großteil mit Erdgas abgedeckt wird. Der Betrieb der Fertigungsmaschinen (Standmotoren) ist bereits fast ausschließlich elektrifiziert.

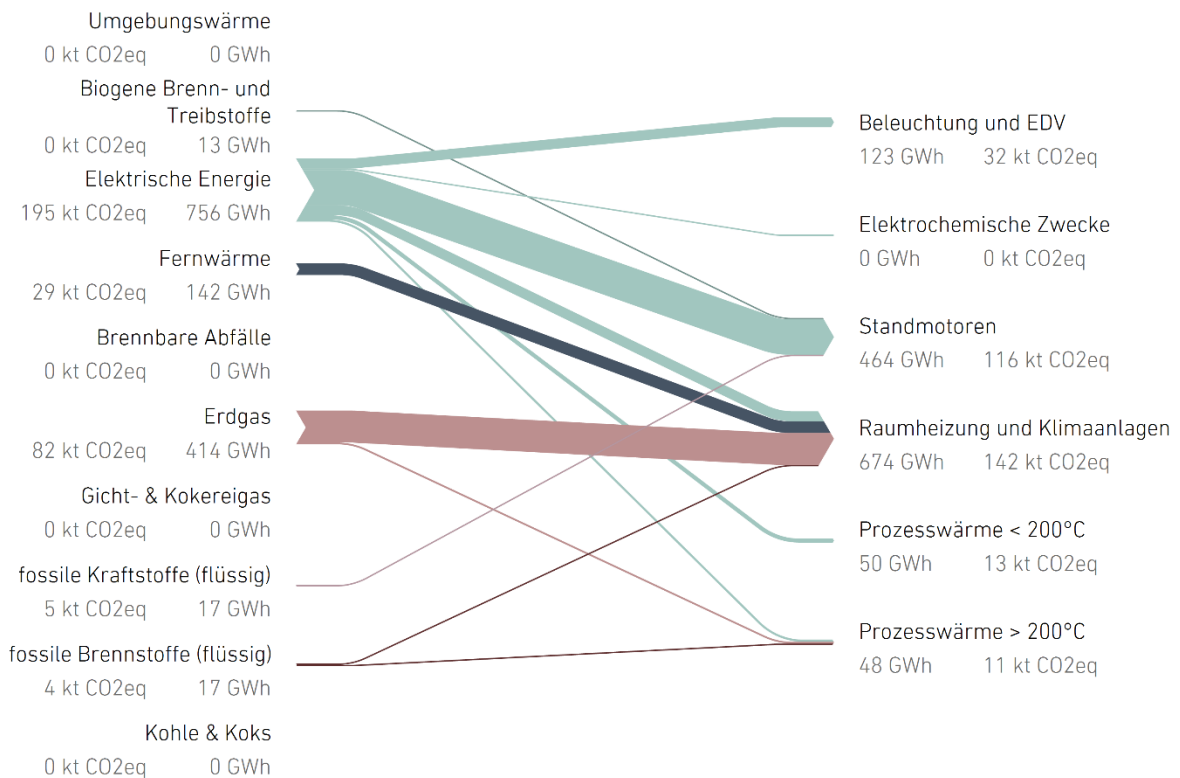


Abbildung 25: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Fahrzeugbau“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.6 Holzverarbeitung

Der Sektor der Holzverarbeitung umfasst 2 667 Unternehmen, die in Summe 51 695 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 4,9 Mrd.€. Dieser Sektor emittiert 150 kt CO_{2e} an klimarelevanten THG-Emissionen. Aufgrund der Kleinteiligkeit des Sektors sowie des hohen Einsatzes von Biomasse wird kein Unternehmen des Sektors im ETS

Anzahl Unternehmen	2 667
Beschäftigte	34 259
Wertschöpfung in Mio.€	2 742
THG-Emissionen in Mt CO _{2e}	0,15
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	0,6%

gelistet. Abbildung 26 zeigt den Endenergiefluss und die zugehörigen THG-Emissionen des Sektors. Am meisten Endenergie wird für die Bereitstellung von Prozesswärme unter 200 °C benötigt, wobei hier fast ausschließlich biogene Brennstoffe, elektrische Energie und Fernwärme eingesetzt wird. Da biogene Brennstoffe keine klimarelevanten Emissionen erzeugen und die Emissionen aus der Produktion von elektrischer Energie und Fernwärme dem Energiesektor angerechnet werden, ist die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme bereits jetzt defacto emissionsfrei. Die höchsten direkten Emissionen des Sektors resultieren aus dem Einsatz von Erdgas für die Raumheizung. Weiters werden geringe Mengen fossiler Brenn- und Kraftstoffe für den Betrieb von Standmotoren und zur Bereitstellung von Hochtemperaturwärme eingesetzt.

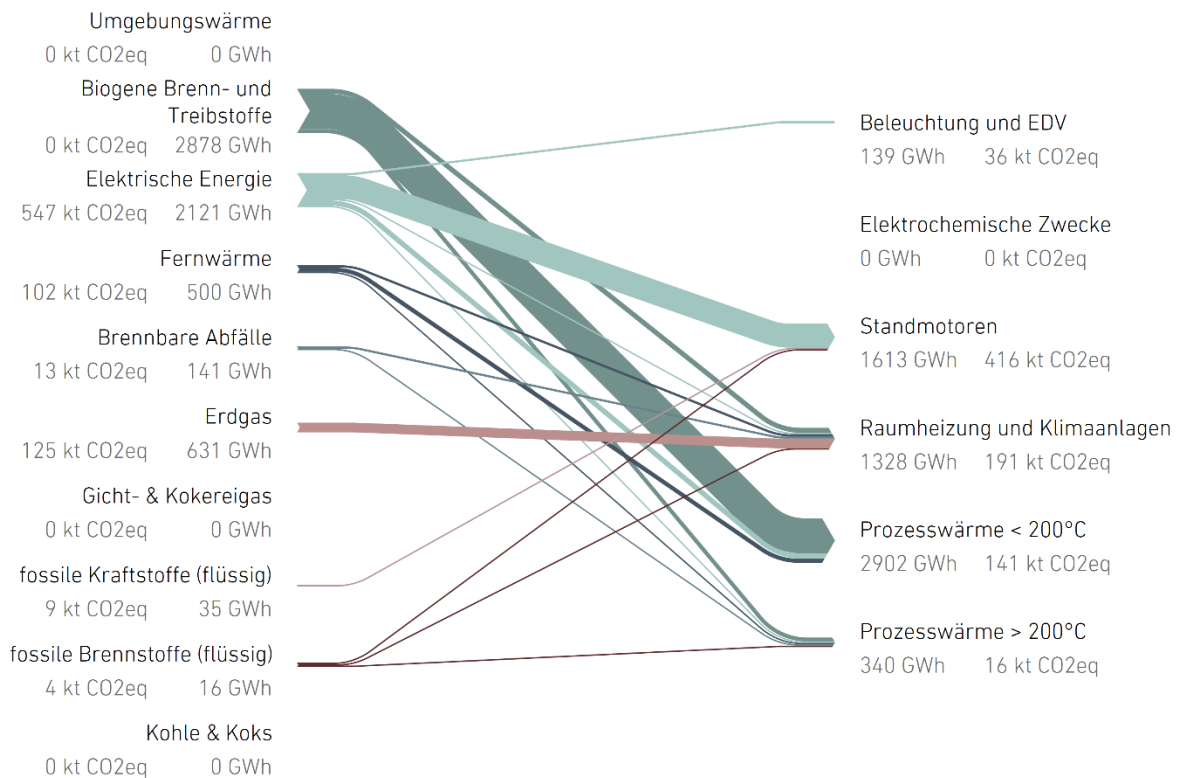


Abbildung 26: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Holzverarbeitung“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.7 Maschinenbau

Der Sektor Maschinenbau besteht aus 6 349 Unternehmen, die in Summe über 240 000 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 21,5 Mrd.€. Zwei Unternehmen, die diesem Sektor zugeordnet sind, sind im ETS gelistet und sind gemeinsam für Emissionen von 43 kt CO₂e verantwortlich, siehe Tabelle 8. Der gesamte Sektor emittiert ca. 570 kt CO₂e.

Anzahl Unternehmen	6 349
Beschäftigte	240 209
Wertschöpfung in Mio.€	21 519
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	0,57
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	2,2%

Tabelle 8: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Maschinenbau inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Herstellung von Verpackungen und Verschlüssen aus Eisen, Stahl und NE-Metall	28 352
TEICH AG Weinburg	28 352
Herstellung von Schmiede-, Press-, Zieh- und Stanzteilen, gewalzten Ringen und pulvermetallurgischen Erzeugnissen	14 957
Boehler Schmiedetechnik	14 957
Gesamt	43 309

Wie in Abbildung 27 ersichtlich, dominiert in diesem Sektor der Einsatz von elektrischer Energie. Erdgas wird in erster Linie für die Raumheizung, aber auch für die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme eingesetzt. Auch in diesem Sektor sind Standmotoren bereits im Wesentlichen elektrifiziert.

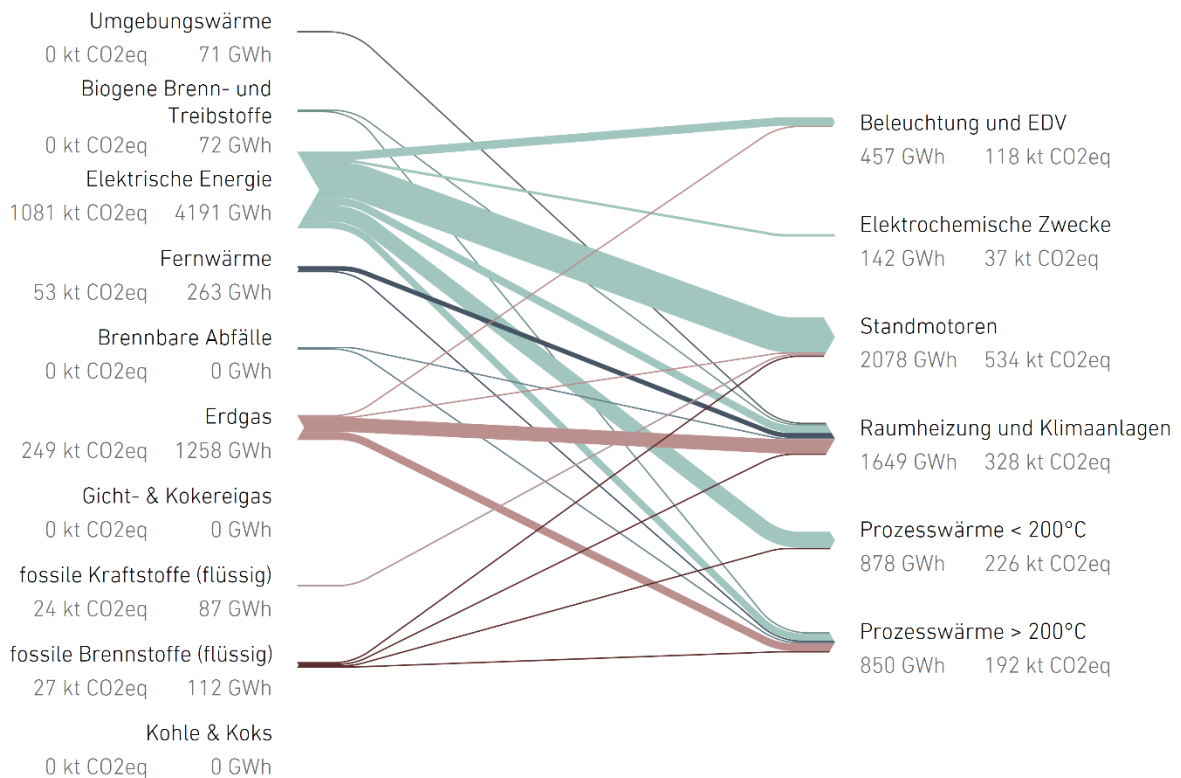


Abbildung 27: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Maschinenbau“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.8 Nahrungs- und Genussmittel, Tabak

Der Sektor Maschinenbau besteht aus 4 078 Unternehmen, die in Summe über 88 000 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Bruttowertschöpfung beträgt ca. 6,4 Mrd.€. Drei Unternehmen des Sektors sind im ETS angeführt und emittieren gemeinsam 257 kt CO₂e, siehe Tabelle 9. Die AGRANA ist mit ihren vier Standorten in Österreich für über 85% der im ETS erfassten Emissionen des Sektors

Anzahl Unternehmen	4 078
Beschäftigte	88 036
Wertschöpfung in Mio.€	6 396
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	0,9
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	3,5%

verantwortlich. Die gesamten Emissionen des Sektors betragen 0,9 Mt CO₂e, womit der Sektor Nahrungs- und Genussmittel, Tabak für 3,5% der THG-Emissionen der österreichischen Industrie verantwortlich ist.

Tabelle 9: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Nahrungs- und Genussmittel, Tabak inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Herstellung von Zucker	110 678
AGRANA Tulln	64 788
AGRANA Leopoldsdorf	45 890
Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen	109 602
AGRANA Aschach	69 660
AGRANA Gmünd	39 942
Herstellung von Frucht- und Gemüsesäften	18 950
Rauch Nüziders	18 950
Herstellung von Ölen und Fetten (ohne Margarine u. ä. Nahrungsfette)	17 775
Ölmühle Bunge Bruck a.d. Leitha	17 775
Gesamt	257 005

Im Endenergieflussdiagramm des Sektors, Abbildung 28, ist zu sehen, dass der Einsatz von Erdgas zur Bereitstellung von Niedertemperaturprozesswärme die größte Rolle spielt. Der Bedarf an Hochtemperaturprozesswärme ist vergleichsweise gering. Standmotoren werden im Wesentlichen mit elektrischer Energie betrieben und führen daher in erster Linie zu indirekten Emissionen.

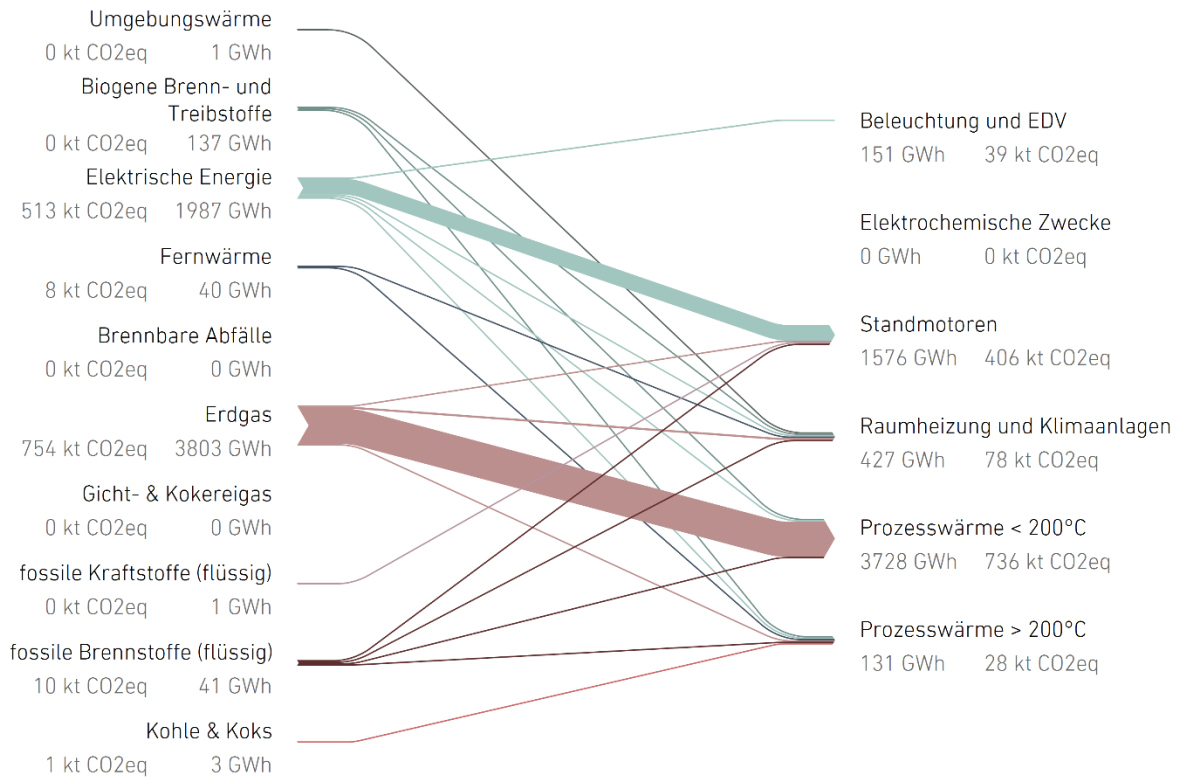


Abbildung 28: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Nahrungs- und Genussmittel, Tabak“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.9 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 CO₂e klimarelevanter THG-Emissionen verantwortlich und weist mit einem Anteil von 20% an den industriellen Gesamtemissionen in Österreich die zweithöchsten Sektoremissionen auf. 33 Unternehmen des Sektors sind im ETS gelistet, welche gemeinsam für Emissionen von 4,1 Mt CO₂e verantwortlich sind, siehe Tabelle 10. Über 60% der im ETS angeführten Emissionen sind der Herstellung von Zement zuzurechnen.

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

Tabelle 10: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Steine & Erden, Glas inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Herstellung von Zement	2 653 171
Lafarge Perlmooser Mannersdorf	610 139
Wietersdorfer & Peggauer Zement Wietersdorf	468 704
Zementwerke Leube Gartenau	320 992
Lafarge Perlmooser Retznei	300 968
Zementwerk Wopfing	291 278
Gmundner Zement Gmunden	253 322
Zementwerk Hofmann Kirchdorf	233 084
Schretter & Cie (Zement) Vils	174 684
Herstellung von Kalk und gebranntem Gips	722 227
VOEST-Alpine Stahl Linz (Kalk) Steyrling	303 621
Kalkwerk Wopfing	138 751
Wietersdorfer & Peggauer (Kalk) Peggau	91 459
Kalkwerk Tagger (Leube) Golling	83 498
Baunit Baustoffe Bad Ischl	46 415
Schretter & Cie (Kalk) Vils	35 934
Ernstbrunner Kalktechnik Ernstbrunn	22 549
Herstellung von Ziegeln und sonstiger Baukeramik	258 055
Wienerberger Hennersdorf	26 252
Wienerberger Krengelbach Haiding	26 050
Tondach Gleinstätten	23 827
Ziegelwerk Pichler Wels	20 309
Ziegelwerk Eder Peuerbach Bruck	18 202
Wienerberger Göllersdorf	17 084
Wienerberger Knittelfeld (Apfelberg)	15 831
Ziegelwerk Eder Weibern	14 906
Leitl Spannton Eferding	14 685
Ziegelwerk Martin Pichler Aschach	14 202
Ziegelwerk Frixeder Senftenbach	13 716
Ziegelwerk Brenner Wirth St. Andrä	13 256
Tondach Pinkafeld	9 678
Comelli Ziegel Kirchbach Maxendorf	9 358
Wienerberger Helpfau Uttendorf	7 803
Ziegelwerk Danreiter Ried im Innkreis	5 129
Ziegelwerk Rhomberg-Dornbirn	3 740
Ziegelwerk Obermair Neuhofen	2 150
Ziegelwerk Lizzi Erlach	1 877
Herstellung von feuerfesten keramischen Werkstoffen und Waren	234 345
Veitsch-Radex Hochfilzen	119 859
Veitsch-Radex Radenthein	76 311
Veitsch-Radex Trieben	17 959
Veitsch-Radex Veitsch	12 505
Rath GmbH Krummnußbaum	7 711
Herstellung von Hohlglas	179 291
Vetropack Kremsmünster	68 178

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO _{2e}
Vetropack Pöchlarn	59 982
Stölzle-Oberglas Köflach	51 131
Herstellung von Gipserzeugnissen für den Bau	52 425
Knauf Werk Weißenbach	29 007
Saint-Gobian Rigips Austria GmbH, Werk Bad Aussee	23 418
Herstellung, Veredlung und Bearbeitung von sonstigem Glas einschließlich technischen Glaswaren	15 968
Swarovski Wattens	8 605
Technoglas Voitsberg	7 363
Herstellung von keramischen Erzeugnissen für sonstige technische Zwecke	2 913
Lias Fehring	2 913
Gesamt	4 118 395

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 11 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 [2].

Tabelle 11: Prozessbedingte THG-Emissionen im Sektor Steine & Erden, Glas, sowie seinen Subsektoren [26]

2018	Zement	Kalk	Magnesit	Glas	Ziegel	Dolomit	Na ₂ CO ₃	Sektor Gesamt
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 29 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.

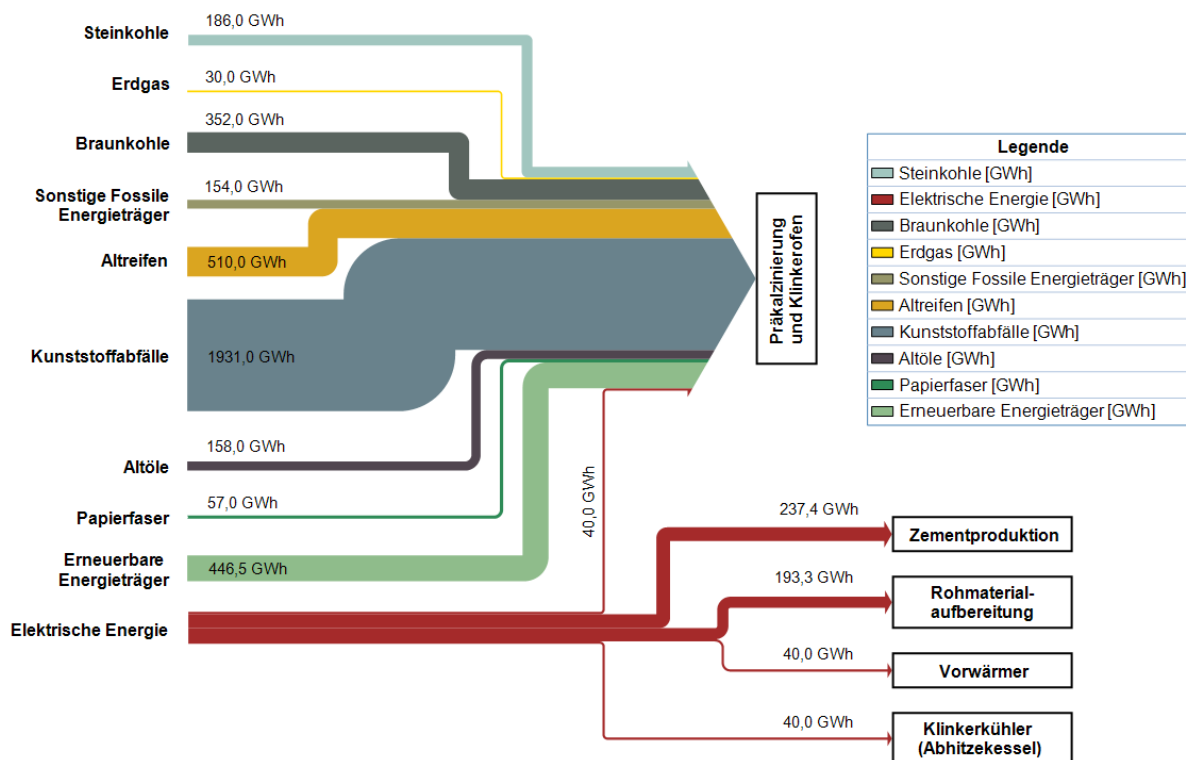


Abbildung 29: Energieflussdiagramm der Zementindustrie

Diese finden insbesondere in der Klinkerherstellung im Drehrohrföfen bei Temperaturen über 1200 °C Anwendung. Hier wird das im Rohstoff Kalziumcarbonat (CaCO₃) enthaltene (geogene) Kohlendioxid durch die hohen Temperaturen ausgetrieben und das für die Zementproduktion benötigte CaO gewonnen. Das ausgetriebene CO₂ 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) CO₂. Die energiebedingten Emissionen, sowie der zugrundeliegende Energiebedarf nach Energieträger und Nutzenergiekategorie können Abbildung 30 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.

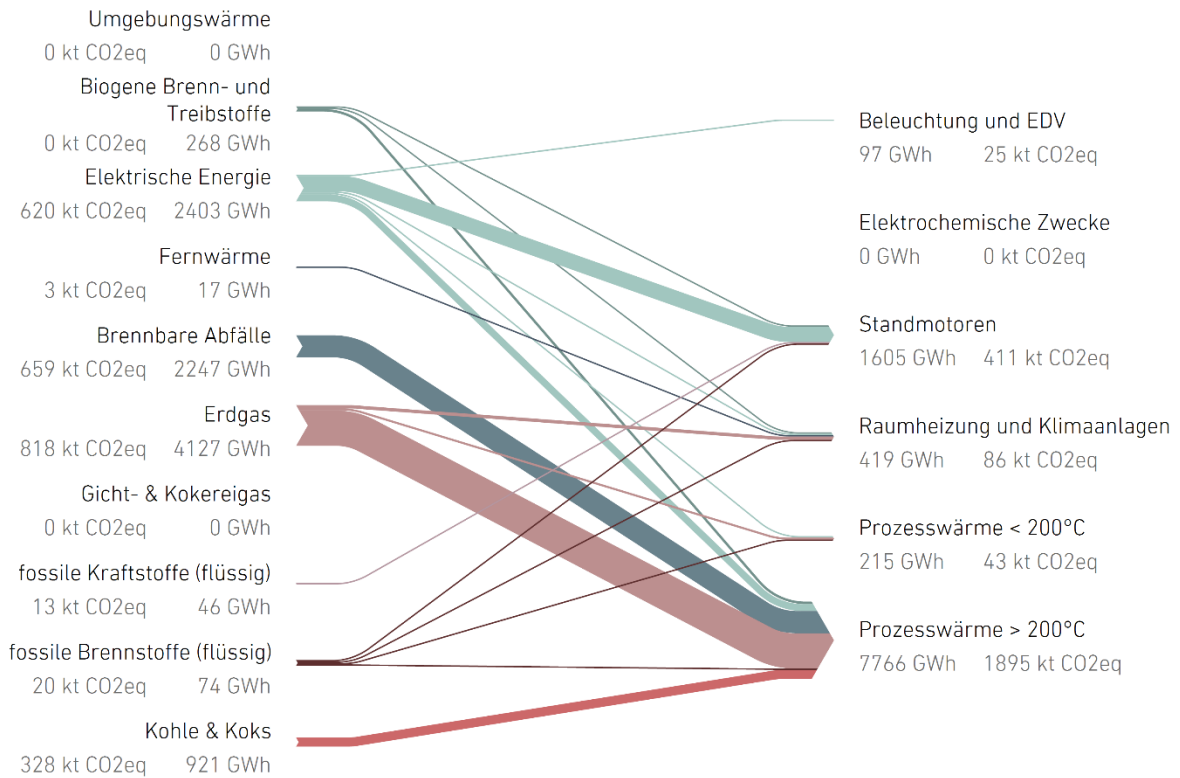


Abbildung 30: Endenergie - und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Steine und Erden, Glas“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.10 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 [16]. Die Produktion von Papier und Pappe umfasst 138 Unternehmen, die 31 355 ArbeitnehmerInnen beschäftigen und eine

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%

Bruttowertschöpfung von 2 Mrd.€ haben. 19 Unternehmen des Sektors sind im ETS gelistet und emittieren gemeinsam über 1,4 Mt CO_{2e}, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Papier & Druck inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO _{2e}
Herstellung von Papier, Karton und Pappe	1 368 858
Sappi Gratkorn	419 088
Norske Skog Bruck GmbH	199 666
Papierfabrik Hamburger Pitten	165 791
Mayr Melnhof Karton Frohnleiten	147 384
Neusiedler Hausmening	84 083
Essity Ortmann	73 393
Nettingsdorfer Ansfelden	56 979
Frantschach St. Gertraud	38 419
Feinpapier Feurstein Traun	36 744
Steyrermühl AG Steyermühl	36 125
Mayr Melnhof Karton Hirschwang	27 836
Neusiedler Kematen	24 153
Rondo Ganahl Frastanz	23 921
Papierfabrik Wattens	21 151
Merckens Schwertberg	3 930
Profümed GmbH	3 467
Brigl & Bergmeister Niklasdorf	3 424
SCA Laakirchen	2 329
Lenzing Papier GmbH	975
Mondi Packaging Frohnleiten	0
Herstellung von Holz- und Zellstoff	63 537
Zellstoff Pöls	53 294
Neusiedler Zellstoff Kematen	8 184
M-real Hallein	2 059
Gesamt	1 432 395

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 31 abzulesende Eigenheit des Sektors, welche derzeit erhebliche Mengen von außen zugekaufter Energieträger 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 31 und Abbildung 32 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.

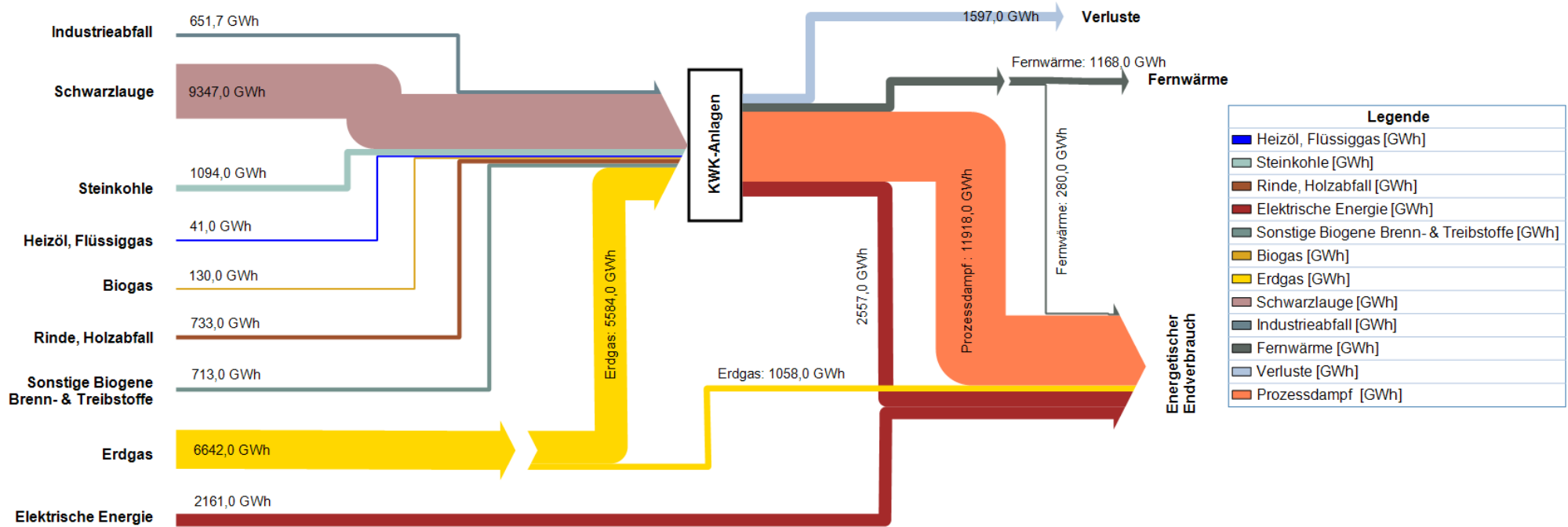


Abbildung 31: Energieflussdiagramm des Sektors Papier & Druck. Eigene Darstellung

Aufgrund der angesprochenen Methodik bei der statistischen Erhebung kann in der in Abbildung 32 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.

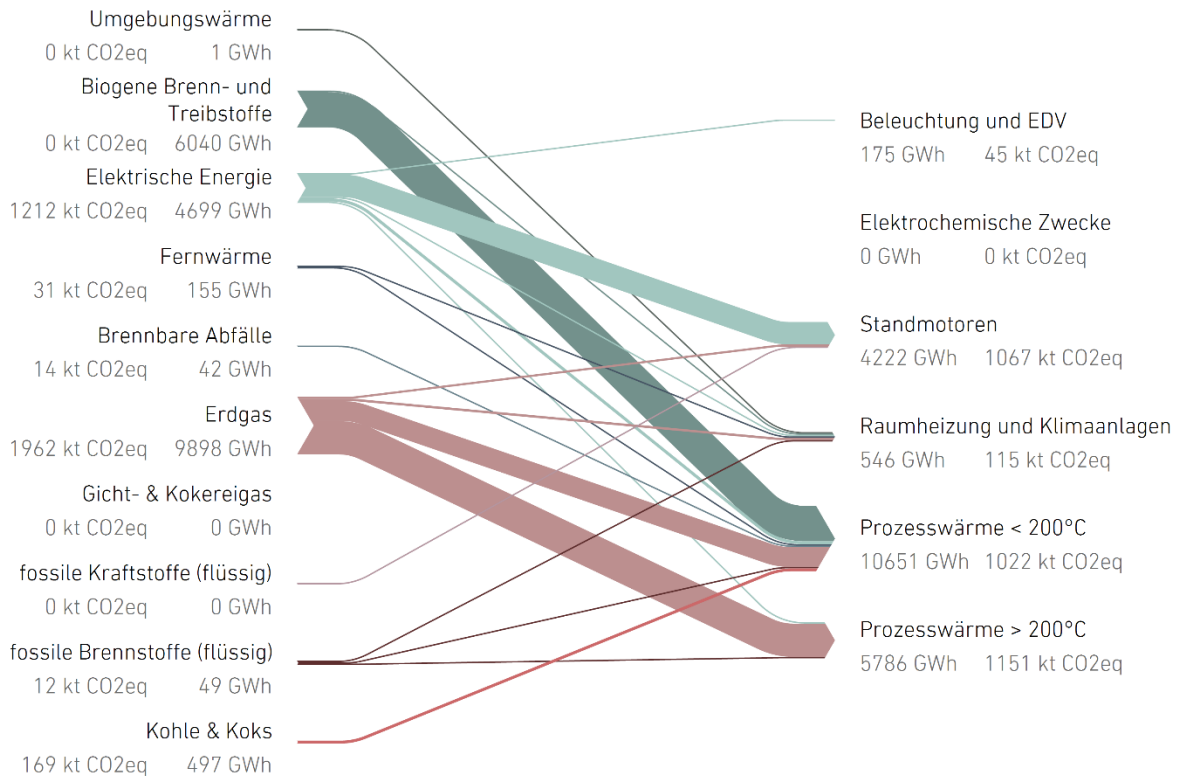


Abbildung 32: Endenergie - und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Papier & Druck“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.11 Nichteisen-Metalle

Im Sektor Nichteisen-Metalle wird die Erzeugung von Edelmetallen, Aluminium, Blei, Zink, Zinn und Kupfer sowie sonstigen Nichteisenmetallen zusammengefasst, wobei der Großteil der Wertschöpfung in der Aluminiumerzeugung (40%) und in den Leichtmetallgießereien geschaffen wird. Der Sektor umfasst in Summe 85 Unternehmen, die 13 480 ArbeitnehmerInnen beschäftigen und eine Bruttowertschöpfung von 1,3 Mrd.€ haben. 2 Unternehmen des Sektors sind im ETS gelistet und emittieren gemeinsam 132 kt CO_{2e}, siehe Tabelle 13.

Anzahl Unternehmen	85
Beschäftigte	13 480
Wertschöpfung in Mio.€	1 328
THG-Emissionen in Mt CO _{2e}	0,57
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	2,2%

Tabelle 13: ETS-gelistete Unternehmen des Sektors Nichteisen-Metallurgie inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Erzeugung und erste Bearbeitung von Aluminium	96 163
AMAG casting GmbH	73 385
AMAG rolling GmbH	22 778
Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer	36 151
Montanwerke Brixlegg AG	36 151
Gesamt	132 314

Der Sektor Nichteisen-Metallurgie ist in Summe für rund 570 kt CO₂e verantwortlich und stellt daher mit einem Anteil von 2,2% an den industriellen Gesamtemissionen den acht-intensivsten Sektor dar.

THG-Emissionen der Nichteisen-Metallurgie sind zum überwiegenden Teil energiebedingt. Abbildung 33 zeigt, dass vor allem die Bereitstellung der Prozesswärme, mit einem hohen Anteil an erdgasbefeuerten Industrieöfen, für die THG-Emissionen des Sektors verantwortlich ist. Ebenfalls vielfach benötigte Standmotoren werden hingegen, dem Stand der Technik entsprechend, überwiegend mit elektrischer Energie betrieben. Geringe, prozessbedingte Emissionen bei der Sekundärherstellung von Blei und Kupfer, sowie in Magnesiumgießereien wurden im Jahr 2019 mit 9,8 kt CO₂ und 140 kg SF₆ bilanziert [2].

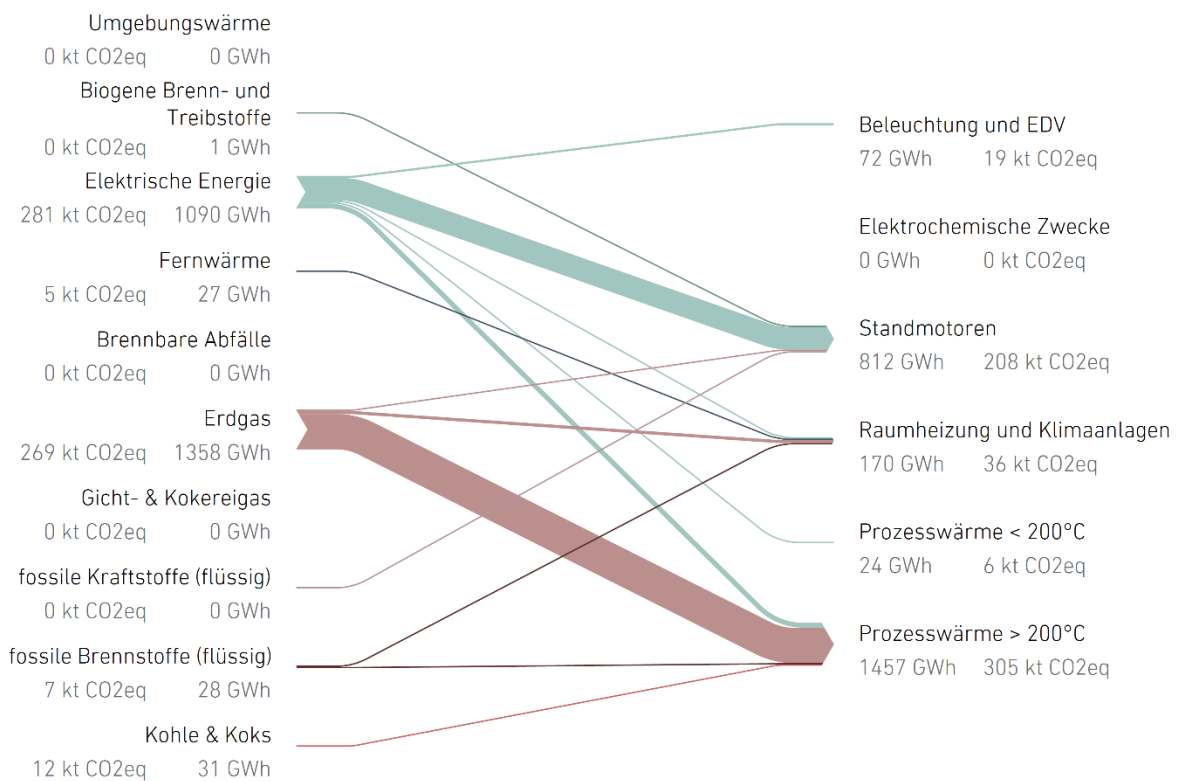


Abbildung 33: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Nichteisen-Metalle“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

In Österreich bereitgestellte Nichteisenmetalle werden größtenteils aus Alt- und Abfallstoffen rückgewonnen. So wird beispielsweise im Subsektor Aluminium, der für etwa 45%⁹ der THG-Emissionen des gesamten Sektors verantwortlich ist, ausschließlich Schrott rezykliert und zu Halberzeugnissen weiterverarbeitet, wobei der Energieeinsatz um bis zu 95% geringer als bei einer Primärerzeugung von Aluminium ist [27]. Auch Kupfer wird in Österreich ausschließlich über die Sekundärroute gewonnen [28]. Neben der Sekundärerzeugung von

⁹ Eigene Berechnungen auf Basis von Produktionsdaten der österreichischen Aluminiumhersteller AMAG, Hammerer, Speedline.

Nichteisenmetallen finden sich im Sektor Nichteisen-Metalle insbesondere Gießereien und ähnliche metallverarbeitende Unternehmen wieder, deren grundlegende Prozessstrukturen ebenfalls den in obenstehendem Diagramm dargestellten Nutzenergiekategorien entsprechen [29].

2.5.12 Textil und Leder

Der Sektor Textil und Leder enthält die Herstellung von Textilien, Bekleidung, Lederwaren und Schuhen. Der Sektor umfasst in Summe 1 668 Unternehmen, die 16 517 ArbeitnehmerInnen beschäftigen und eine Bruttowertschöpfung von ca. 0,9 Mrd.€ haben. Kein Unternehmen dieses Sektors ist im ETS gelistet. Die Gesamtemissionen des Sektors betragen 0,5 Mt CO_{2e}, womit dieser Sektor gemeinsam mit dem Sektor „Fahrzeugbau“ den am wenigsten THG-intensiven Sektor darstellt.

Anzahl Unternehmen	1 668
Beschäftigte	16 517
Wertschöpfung in Mio.€	887
THG-Emissionen in Mt CO _{2e}	0,5
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	0,2%

Abbildung 34 zeigt den Endenergiefluss und die dazugehörigen THG-Emissionen des Sektors. Hier sticht der Einsatz von Erdgas zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme hervor, wobei auch geringe Mengen von Erdgas für den Betrieb von Standmotoren verwendet werden. Somit stellt die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme in diesem Sektor die größte Quelle an klimarelevanten THG-Emissionen dar.

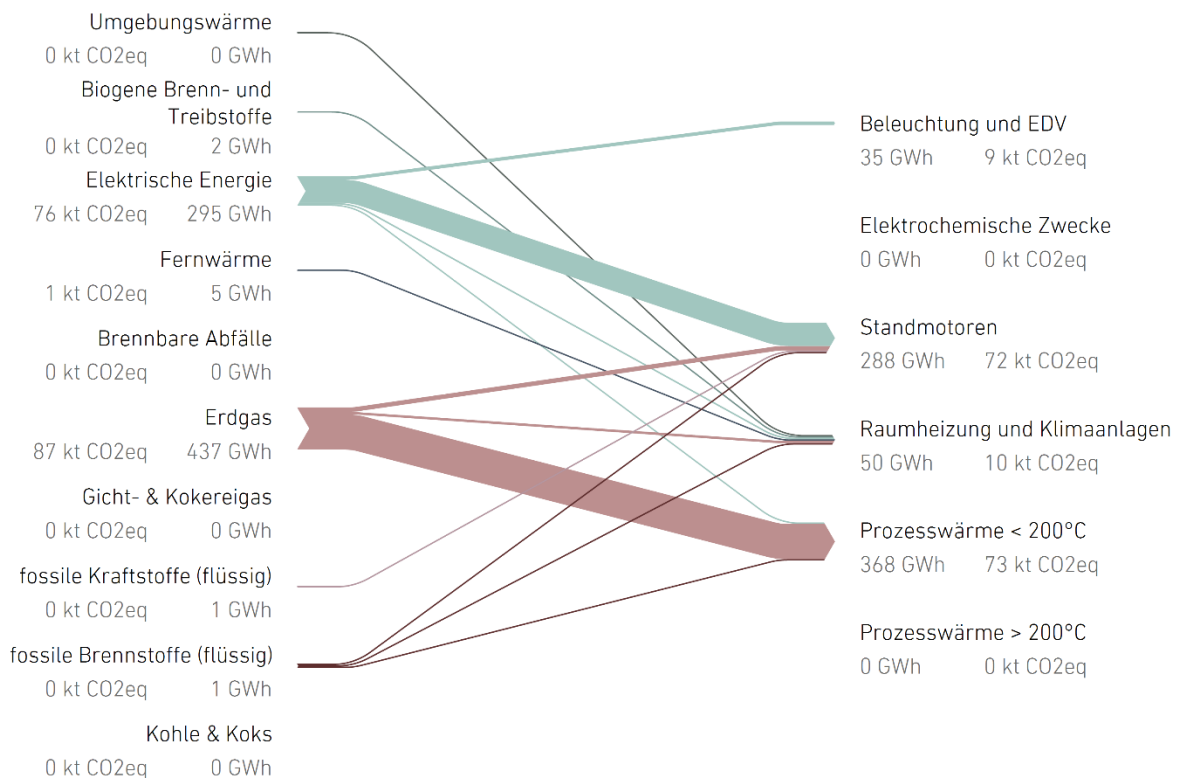


Abbildung 34: Endenergie - und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Textil und Leder“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

2.5.13 Sonstiger produzierender Bereich

Der sonstige produzierende Bereich umfasst die Herstellung von Möbel, Gummi- und Kunststoffwaren, und sonstigen Waren (beispielsweise Münzen, Schmuck, Musikinstrumente, Spielwaren und Sportgeräte). In diesem Sektor sind 5 843 Unternehmen enthalten, die 77 128 ArbeitnehmerInnen beschäftigen. Die Wertschöpfung dieser Unternehmen beträgt ca. 5 Mrd.€. Im ETS ist ein Unternehmen gelistet, das diesem Sektor zugerechnet wird. Das Semperit Werk in Wimpassing ist für die Emission von ca. 16 Mt CO₂e verantwortlich, siehe Tabelle 14.

Anzahl Unternehmen	5 843
Beschäftigte	77 128
Wertschöpfung in Mio.€	4 910
THG-Emissionen in Mt CO ₂ e	0,11
Anteil THG Emissionen im Sektor Industrie	0,4%

Tabelle 14: ETS-gelistete Unternehmen des Sonstigen Produzierenden Bereichs inkl. der verifizierten THG-Emissionen 2019. Eigene Darstellung nach [22]

Unternehmen	THG-Emissionen in t CO ₂ e
Herstellung von sonstigen Gummiwaren	16 162
Semperit Technische Produkte Wimpassing	16 162
Gesamt	16 162

Aufgrund der Aggregation sehr unterschiedlicher Produktionsprozesse in diesem Sektor, sind kaum aussagekräftige Trends in der Nutzenergieanalyse (Abbildung 34) zu finden. Standmotoren sind bereits im Wesentlichen elektrifiziert, Erdgas wird hauptsächlich für die Wärmebereitstellung eingesetzt, wobei der Anteil an Hochtemperaturwärme sehr gering ist.

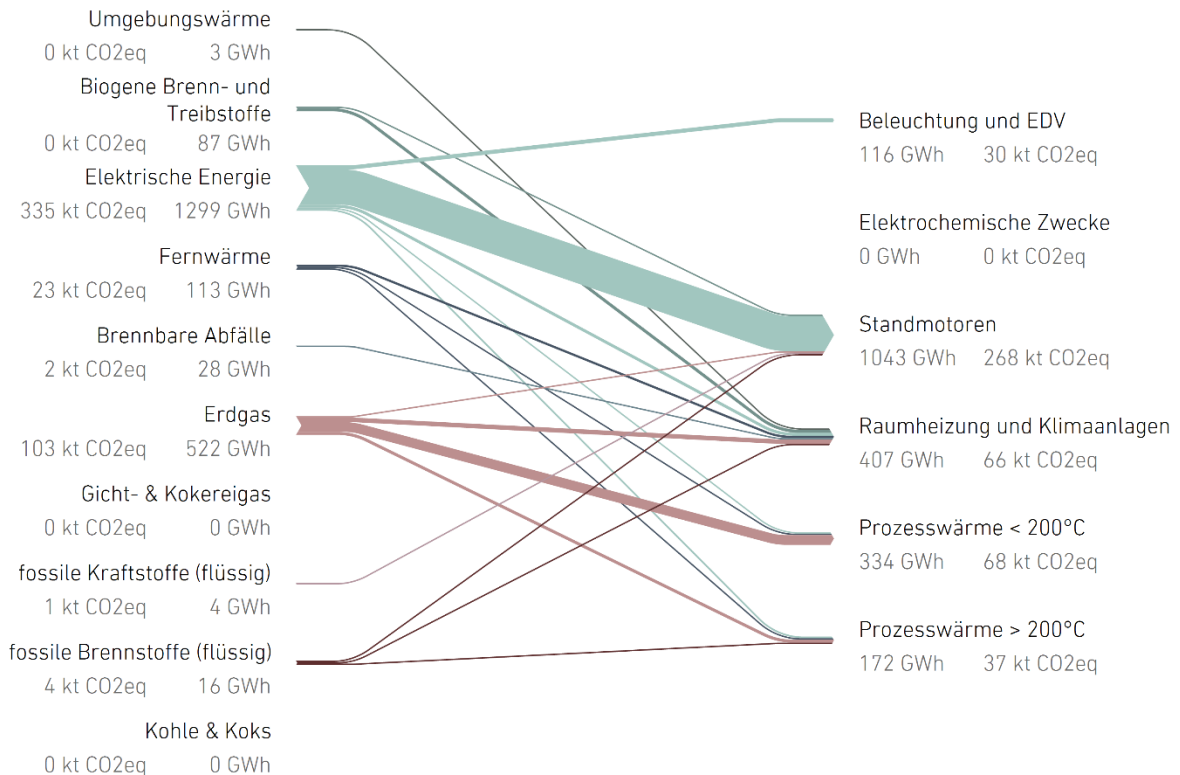


Abbildung 35: Endenergie- und THG-Intensität der Versorgung der Nutzenergiekategorien im Sektor „Sonstiger Produzierender Bereich“. Gesamtösterreich 2019 (eigene Darstellung nach [5], [25])

3 TECHNISCHES DEKARBONISIERUNGSPOTENTIAL

Im Folgenden werden die technischen Dekarbonisierungspotentiale der 13 österreichischen Industriesektoren nach zur Anwendung kommenden Dekarbonisierungsstrategien dargestellt. Um größtmögliche Aussagekraft zu gewährleisten, wurde nach den Erläuterungen in Kapitel 3.1 vorgegangen.

3.1 Grundlagen und Erläuterungen zu Berechnung und Darstellung

Zunächst werden die in Frage kommenden Strategien *Elektrifizierung*, *Einsatz CO₂-neutraler Gase*, *Carbon Capture*, und *Kreislaufwirtschaft* den zu dekarbonisierenden Prozessen und Kategorien systemisch gegenübergestellt und mit einer qualitativen Einschätzung des Umstellungsaufwands ergänzt.

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die in den vier Dekarbonisierungsstrategien zum Einsatz kommenden Technologien. Für die Elektrifizierung der Nutzenergiekategorien Raumheizung und Klimaanlage und Prozesswärme < 200 °C kommen Wärmepumpen mit einem COP von 3 bzw. 2,5 zum Einsatz [30]. Derzeit mit fossilen Brennstoffen betriebene Standmotoren werden elektrifiziert und im Sektor Eisen & Stahl werden durch die Etablierung der Direktreduktion auf Basis CO₂-neutraler Gase in der Primär-Stahlerzeugung Elektrolichtbogenöfen eingeführt.

CO₂-neutrale Gase können überall dort eingesetzt werden, wo bisher fossiles Erdgas verwendet wird. Neben den Nutzenergiekategorien werden CO₂-neutrale Gase auch in der oben angesprochenen Direktreduktion von Eisenerz benötigt, eine Route, die nur in der Verbindung mit der gleichzeitigen Einführung von Elektrolichtbogenöfen möglich ist. Im Sektor Papier & Druck wird das technische Dekarbonisierungspotential durch CO₂-neutrale Gase zusätzlich für die innerhalb der Bilanzgrenze stattfindende Stromerzeugung ausgewiesen. Die eingesetzten CO₂-neutralen Gase unterscheiden sich nach chemischer Zusammensetzung (H₂ oder CH₄) und betrachteter Vorkette. Für die Wasserstoff-Herstellung werden sowohl Elektrolyse, als auch Methanpyrolyse untersucht und die dafür jeweils notwendigen Energieträger und -mengen (elektrische Energie bzw. elektrische Energie und CH₄) ausgewiesen. Die für die Herstellung von Bio-CH₄ benötigte Vorkette wird in vorliegender Studie nicht betrachtet. Bio-CH₄ wird aus landwirtschaftlichen Vorprodukten erzeugt und erfordert somit in erster Linie landwirtschaftliche Flächen.

Carbon Capture-Technologien kommen im Sektor Steine & Erden, Glas zur Anwendung, um die prozessbedingten (geogenen) Emissionen zu vermeiden, die durch den Einsatz CO₂-verursachender Mineralstoffe auch zukünftig anfallen werden.

Im Sektor Eisen & Stahl ergibt sich durch den Ersatz der traditionellen Hochofenroute und den Einsatz von Elektrolichtbogenöfen die Möglichkeit zum verstärkten Einsatz von Schrott in der Stahlproduktion. Im Sektor Steine & Erden, Glas wird im Subsektor Zement der Einsatz von Betonrecycling untersucht. Diese sektorspezifischen Recyclingtechnologien werden unter der Dekarbonisierungsstrategie Kreislaufwirtschaft zusammengefasst. Darüberhinausgehende Möglichkeiten der Kreislaufwirtschaft (z.B. Abwärmenutzung, Kunststoffrecycling) werden in dieser Studie nicht betrachtet.

Tabelle 15: Übersicht über die in den Dekarbonisierungsstrategien betrachteten Prozesse und deren Anwendungsbereiche

Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereiche
Elektrifizierung	Wärmepumpen (COP 3,0)	Raumheizung und Klimaanlage
	Hochtemperaturwärmepumpen (COP 2,5)	Prozesswärme </> 200 °C
	Elektro-Standmotoren	Standmotoren
	Elektrolichtbogenofen	Sektorspezifische Prozesse im Sektor Eisen & Stahl
CO ₂ -neutrales Gas	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C Sektorspezifische Prozesse
	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C Sektorspezifische Prozesse
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C Sektorspezifische Prozesse im Sektor Eisen & Stahl und Papier & Druck
Carbon Capture	Sektorspezifische Technologien	Sektorspezifische Erzeugungsprozesse im Sektor Steine & Erden, Glas
Kreislaufwirtschaft	Sektorspezifische Technologien	Sektorspezifische Erzeugungsprozesse im Sektor Eisen & Stahl und Steine & Erden, Glas

Bei der Implementierung dieser Technologien ergeben sich drei Kategorien von Umstellungsaufwand (Grün, Gelb, Rot), die in Abbildung 36 dargestellt und untenstehend näher erläutert werden.


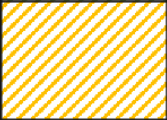

Farbcode	Kategorie Umstellungsaufwand
	Niedriger Umstellungsaufwand: <ul style="list-style-type: none"> Austausch bestehender Anlagenkomponenten innerhalb üblicher Lebenszyklen. Durch alternative Energieträger oder End-of-Pipe-Lösungen ist keine grundlegende Änderung an der Energieversorgung von Produktionsprozessen notwendig.
	Mittlerer Umstellungsaufwand: <ul style="list-style-type: none"> Implementierung benötigt Adaptierungen an der Energieversorgung von Produktionsprozessen. Die Produktionsprozesse selbst werden nicht verändert.
	Großer Umstellungsaufwand: <ul style="list-style-type: none"> Implementierung benötigt grundlegende Veränderungen an den Produktionsprozessen.

Abbildung 36: Schema der qualitativen Einordnung des Umstellungsaufwands bei der Implementierung der vorgestellten Dekarbonisierungstechnologien

In der Kategorie „Grün“ befinden sich jene Technologien, die mit geringem Aufwand, meist innerhalb üblicher Lebenszyklen derzeit genutzter Anlagen, implementiert werden können. Hier finden sich jene Strategien wieder, bei denen lediglich eine Umstellung von fossilem auf biogenes CH₄ stattfindet oder End-of-pipe-Lösungen zum Einsatz kommen, während der vorherrschende Produktionsprozess unverändert bleibt.

In der Kategorie „Gelb“ sind jene Dekarbonisierungstechnologien zu finden, die für deren Implementierung sowohl alternative Energieträger und –leitungen, als auch neue Anlagen benötigen und bei denen davon ausgegangen werden muss, dass geringfügige bis mittelgroße Modifikationen am Produktionsprozess notwendig sein werden. Technologien in dieser Kategorie sind beispielsweise die Elektrifizierung von Standmotoren oder der Einsatz von Wärmepumpen für Anwendungen, bei denen bisher fossile Brenner eingesetzt wurden.

In der Kategorie „Rot“ werden diejenigen Technologien gelistet, die eine grundlegende Veränderung der Produktionsprozesse in den jeweiligen Industriesektoren bewirken. Das wohl prominenteste Beispiel für die Technologien in dieser Kategorie ist die Direktreduktion von Eisenerz mit dem daran angeschlossenen Einsatz des gewonnenen Eisenschwamms im Elektrolichtbogenofen der Primär-Stahlproduktion.

Zusätzlich zum Umstellungsaufwand wird dargestellt, ob die erzielbaren Einsparungen aus energie- oder prozessbedingten Emissionsreduktionen resultieren. Im Anschluss folgt eine, auf diese überblicksgebende Tabelle aufbauende, sektoral aufgelöste, detaillierte Analyse der zum Einsatz kommenden Technologien und deren quantitativ ausgewiesenen, technischen Dekarbonisierungspotentiale. Dabei werden jene Energie- und THG-Bilanzänderungen dargestellt, die mit der Realisierung des ausgewiesenen Potentials einhergehen. Diese Detailbetrachtungen werden darauffolgend grafisch mithilfe von Balkendiagrammen aufbereitet, die folgendes beinhalten:

- Gegenüberstellung der derzeitigen THG-Emissionen mit dem technischen Dekarbonisierungspotential nach Strategie
- Gegenüberstellung des derzeitigen Energiebedarfs nach Energieträger mit Energiebilanzveränderung in der industriellen Bilanzgrenze durch technisches Dekarbonisierungspotential nach Strategie

Die Berechnung der Dekarbonisierungspotentiale beruht auf einer Kombination aus Top-down- und Bottom-up-Ansatz: Im Top-down-Ansatz werden Dekarbonisierungspotentiale auf Basis der Statistik Austria-Daten in Verbindung mit der Einschätzung der benötigten industriellen Temperaturniveaus nach [25] berechnet.

Das benötigte Temperaturniveau spielt eine wesentliche Rolle bei der Wahl möglicher Dekarbonisierungstechnologien. Es wird davon ausgegangen, dass ein Einsatz von Wärmepumpen bis zu Temperaturen von 200 °C bis zum Jahr 2030 möglich sein wird. Daher müssen für den Temperaturbereich über 200°C andere Dekarbonisierungsoptionen zum Einsatz kommen.

Tabelle 16 zeigt die in dieser Studie genutzte Aufteilung der Prozesswärme auf den Temperaturbereich unter 200 °C sowie über 200 °C für die einzelnen betrachteten Sektoren.

Tabelle 16: Anteil der Prozesswärme im Bereich unter sowie über 200 °C. Eigene Berechnung nach [11] und [5]. Mit Ausnahme des Sektors Bergbau stammen die Daten aus [11]. Die Aufteilung des Sektors Bergbau in dieser Quelle spiegelt nicht die Struktur des Sektors in Österreich wider, daher wurde für diesen Sektor auf die Nutzenergieanalyse der Statistik Austria zurückgegriffen [5].

Sektor	Prozesswärme	
	< 200 °C	> 200 °C
Bau	17,1%	82,9%
Bergbau	74,2%	25,8%
Chemie und Petrochemie	25,7%	74,3%
Eisen- und Stahlerzeugung	1,6%	98,4%
Fahrzeugbau	50,9%	49,1%
Holzverarbeitung	89,5%	10,5%
Maschinenbau	50,8%	49,2%
Nahrungs- und Genußmittel, Tabak	96,6%	3,4%
Nicht Eisen Metalle	1,6%	98,4%
Papier und Druck	64,8%	35,2%
Sonst. Produzierender Bereich	66,0%	34,0%
Steine und Erden, Glas	2,7%	97,3%
Textil und Leder	100,0%	0,0%

Für Dekarbonisierungsoptionen, bei denen elektrische Energie eingesetzt wird, werden die indirekten THG-Emissionen der Stromerzeugung berücksichtigt. Damit soll sichergestellt werden, dass die Effekte einer breiten Elektrifizierung in dieser Studie mitberücksichtigt werden und es nicht lediglich zu einer Verschiebung der Emissionen von der Industrie zum Sektor Energie kommt. Als spezifischer Emissionsfaktor für elektrische Energie wird für 2040 ein Wert von 56 gCO₂ pro kWh verwendet. Dieser Wert wurde aus dem in [8] für 2040 prognostizierten Strommix berechnet.

Der Top-down-Zugang kommt für all jene Sektoren zum Einsatz, die ausschließlich im Rahmen der Nutzenergieanalyse zu erfassende Prozesse aufweisen und bei denen lediglich die Form der Energiebereitstellung für eine Dekarbonisierung geändert werden muss, während die grundlegende Prozesskette bestehen bleibt.

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

In jenen Sektoren, in denen die Anwendung einer bestimmten Dekarbonisierungsstrategie gravierende prozesstechnische Änderungen notwendig machen, wurden technologieaufgelöste Bottom-up-Berechnungen angestellt. Zu den mittels Bottom-up-Ansatz untersuchten Sektoren zählen die Eisen & Stahlerzeugung, der Sektor Steine & Erden, Glas, sowie Papier & Druck.

Tabelle 17 und Tabelle 18 dienen der Veranschaulichung der gewählten Methodik bei den Detailuntersuchungen der 13 Industriesektoren. Zu Beginn der Ergebnisse in jedem Sektor geben auf Tabelle 17 basierende Listen einen Überblick über die zur Anwendung kommenden Strategien und Technologien sowie den Anwendungsbereich, in dem diese zum Einsatz kommen und es wird dargestellt, ob die Technologie der Vermeidung von energiebedingten oder prozessbedingten Emissionen dient. Der Umstellungsaufwand wird als Farbcode gemäß Abbildung 36 dargestellt. Ist eine Dekarbonisierungsstrategie als keine Option zu bewerten, wird dies durch einen grauen Balken in der entsprechenden Zeile gekennzeichnet.

Tabelle 17: Beispieltabelle – Übersicht der Dekarbonisierungsstrategien

Dekarbonisierungsstrategie	Emissionsursprung		Technologie	Anwendungsbereiche
Elektrifizierung	Energiebedingte Emissionen		Technologie 1	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme < 200 °C
	Energiebedingte Emissionen		Technologie 2	Standmotoren
CO ₂ -neutrales Gas	Energiebedingte Emissionen		Technologie 3	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C
Carbon Capture				
Kreislaufwirtschaft	Prozessbedingte Emissionen		Technologie 5	Erzeugungsprozess

Niedriger Umstellungsaufwand Mittlerer Umstellungsaufwand Großer Umstellungsaufwand Keine Option

Werden, wie in der Beispieltabelle der Fall, sowohl energiebedingte als auch prozessbedingte Emissionen vermieden, folgen der Übersichtstabelle zwei Detailansichten nach Tabelle 18, in denen der Einfluss der Technologien auf die Energiebilanz sowie die dadurch mögliche THG-Reduktion in kt CO₂e ausgewiesen werden. Die THG-Reduktionen von Technologien, die ohne die Kombination mit anderen Strategien bereits den Großteil der sektoralen THG-Emissionen reduzieren können, werden mit grüner Schriftfarbe dargestellt, andere in gelber. Für die Gewinnung oder Produktion betrachteter CO₂-neutraler Gase können je nach Erzeugungskette andere Energieträger (bspw. elektrische Energie für Elektrolyse oder elektrische Energie und CH₄ für Pyrolyse) benötigt werden, deren Bedarf in der jeweiligen Zeile in *kursiv* dargestellt wird. In den Sektoren, die keine prozessbedingten Emissionen verursachen, wird jeweils lediglich eine Tabelle, jedoch ebenfalls unter Beibehaltung desselben Schemas präsentiert.

Tabelle 18: Beispieltabelle – Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten bzw. prozessbedingten Emissionen

Reduktion der energiebedingten Emissionen / Reduktion der prozessbedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO ₂ e
Elektrifizierung	Technologie 1	Raumheizung und Klimaanlage	Energieträger 1: - 346 Energieträger 2: + 102	- 25
	Technologie 2	Prozesswärme < 200°C	Energieträger 1: - 209 Energieträger 2: + 69	- 40
CO ₂ -neutrales Gas	Technologie 3	Raumheizung und Klimaanlage	Energieträger 2: - 240 Energieträger 4: + 240 <i>dafür En.träger 5: + 214</i>	- 35
		Prozesswärme < 200°C	Energieträger 1: - 300 Energieträger 4: + 300 <i>dafür En.träger 5: + 430</i>	- 50
		Prozesswärme > 200 °C	Energieträger 3: - 500 Energieträger 4: + 500 <i>dafür En.träger 5: + 714</i>	- 400
Carbon Capture	Technologie 4	Sektorspezifischer Erzeugungsprozess	Energieträger 2: + 1000	- 2500
Kreislaufwirtschaft	Technologie 5	Sektorspezifischer Erzeugungsprozess	Energieträger 6: - 10 000 Energieträger 3: + 4499	- 500

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

Im Anschluss an die Detailpräsentation der technischen Dekarbonisierungspotentiale in den Sektoren werden in Abschnitt 3.3 die zuvor ermittelten Ergebnisse aggregiert und deren Implikationen für die österreichische Industrie als Ganzes diskutiert. Diese Zusammenschau nach Dekarbonisierungsstrategie bildet die Grundlage für die in Kapitel 4 durchgeführten Kostenerhebungen.

Bei der Betrachtung der unten angeführten Ergebnisse muss, die Definition des technischen Potentials in Kapitel 1.2.3 in Erinnerung rufend, nochmals betont werden, dass es sich um maximal technisch mögliche Potentiale in Bezug auf den Status Quo und keinesfalls um szenarienspezifisch optimierte Empfehlungen handelt. Damit findet in dieser Studie auch keine Wertung der einzelnen Technologien untereinander statt. Für eine entscheidende Bewertung für oder wider einzelne Dekarbonisierungsstrategien sind jedenfalls zusätzliche Kriterien, wie Exergie- und Ressourceneffizienz, zugehörige Vorketten und verfügbare Ressourcenpotenziale miteinzubeziehen, die jedoch nicht Teil der nachfolgenden Betrachtungen sind.

3.2 Technische Dekarbonisierungspotentiale der Sektoren

3.2.1 Bau

Dem Sektor Bau liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Eine Besonderheit dieses Sektors ist der hohe Einsatz fossiler Treibstoffe für die Nutzenergiekategorie Standmotoren, siehe Kapitel 2.5.1. Da es sich hierbei in erster Linie um den Einsatz mobiler Baumaschinen handelt, die in dieser Kategorie der Nutzenergieanalyse zusammengefasst werden, ist es notwendig, die Mobilität der Maschinen auch in Zukunft zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist eine einfache Elektrifizierung der Nutzenergiekategorie Standmotoren nicht möglich. Zur Dekarbonisierung der mobilen Baumaschinen werden daher für diesen Sektor zwei zusätzliche Optionen betrachtet: Einerseits die Elektrifizierung über batteriebetriebene E-Fahrzeuge, andererseits der Betrieb der Baumaschinen mit Brennstoffzellen und dem Einsatz von Wasserstoff (entweder aus Elektrolyse oder Pyrolyse).

Tabelle 19 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Bau. Man erkennt, dass in diesem Sektor vor allem eine Umstellung der derzeit mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Baumaschinen das mit Abstand größte Potential zur Dekarbonisierung aufweist. Welche der drei dafür untersuchten Optionen der beste Weg ist, hängt in erster Linie von der weiteren Entwicklung der E-Mobilität, ab. Gerade die Elektrifizierung von mobilen Schwermaschinen steckt derzeit noch in den Kinderschuhen, auch im Vergleich zu den Entwicklungen der E-Mobilität im Passagierverkehr [31]. Die Entwicklung der dafür benötigten Technologien schreitet jedoch rasch voran. Durch eine Umstellung des Energieträgers der mobilen Baumaschinen lassen sich THG-Emissionen zwischen 525 und 587 kt CO₂e einsparen. In den anderen Nutzenergiekategorien, Raumheizung und Klimaanlage, Prozesswärme kleiner 200°C sowie größer 200°C ist das Dekarbonisierungspotential um eine Zehnerpotenz geringer und auch absolut betrachtet als eher gering einzustufen.

Tabelle 19: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Bau

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: - 74 Elektr. Energie: + 57	- 36
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 31 Elektr. Energie: + 10	- 8
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren (Batteriebetriebene Baumaschinen)	Fossile ET: - 2271 Elektr. Energie: + 768	- 572
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 193 H ₂ : + 173 dafür el. Energie: + 243	- 25
		Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 31 H ₂ : + 28 dafür el. Energie: + 39	- 6
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 191 H ₂ : + 172 dafür el. Energie: + 241	- 26
		Standmotoren (Baumaschinen mit Brennstoffzellen)	Fossile ET: - 2271 H ₂ : + 1161 dafür el. Energie: + 1625	- 524
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 193 H ₂ : + 174 dafür CH ₄ : + 325 dafür el. Energie: + 50	- 35
		Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 31 H ₂ : + 28 dafür CH ₄ : + 52 dafür el. Energie: + 8	- 8
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 191 H ₂ : + 172 dafür CH ₄ : + 321 dafür el. Energie: + 49	- 36
		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: - 193 Bio-CH ₄ : + 193	- 39
		Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 31 Bio-CH ₄ : + 31	- 8
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 191 Bio-CH ₄ : + 191	- 40

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.2.2 Bergbau

Dem Sektor Bergbau liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 20 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Bau. Das größte Dekarbonisierungspotential liegt in diesem Sektor bei einer dekarbonisierten Bereitstellung der Prozesswärme unter 200°C. Hier können durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen bis zu 255 kt CO_{2e} vermieden werden (unter Berücksichtigung der für 2040 prognostizierten spezifischen Emissionen für elektrische Energie, siehe Kapitel 3.1). Eine Umstellung der Niedertemperaturprozesswärme auf CO₂-neutrale Gase ermöglicht eine THG-Reduktion zwischen 181 und 282 kt CO_{2e}.

Da die Standmotoren in diesem Sektor bereits mehrheitlich elektrifiziert sind und kaum Bedarf an Hochtemperaturprozesswärme besteht, siehe Abbildung 21, ist das Dekarbonisierungspotential dieser Nutzenergiekategorien eher gering.

Tabelle 20: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Bergbau

Reduktion der energiebedingten Emissionen				
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Energiebilanzänderung in GWh	THG-Reduktion in kt CO _{2e}
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 74 Elektr. Energie: 22	- 14
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 1421 Elektr. Energie: + 472	- 255
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 54 Elektr. Energie: + 25,3	- 13
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 74 H ₂ : + 69 dafür el. Energie: + 94	- 10
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 1421 H ₂ : + 1279 dafür el. Energie: + 1790	- 181
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 182 H ₂ : + 163 dafür el. Energie: + 229	- 25
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 74 H ₂ : + 67 dafür CH ₄ : + 125 dafür el. Energie: + 19	- 14
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 1421 H ₂ : + 1279 dafür CH ₄ : + 2391 dafür el. Energie: + 365	- 251
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 182 H ₂ : + 163 dafür CH ₄ : + 305 dafür el. Energie: + 47	- 34
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 74 Bio-CH ₄ : + 74	- 15
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 1420 Bio-CH ₄ : + 1420	- 282
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 182 Bio-CH ₄ : + 182	- 38

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

-

3.2.3 Chemie- und 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 21 angeführt.

Wie in Kapitel 2.5.3 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 CO₂e mit sich. Der Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen für die Bereitstellung von Niedertemperaturprozesswärme ermöglicht eine THG-Reduktion von 323 kt CO₂e. Durch den Einsatz erneuerbarer Gase lassen sich bis zu 354 kt CO₂e einsparen. Durch den hohen Elektrifizierungsgrad der Standmotoren ist in dieser Nutzenergiekategorie kaum mehr Reduktionspotential vorhanden.

Tabelle 21: 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 <i>dafür el. Energie: + 94</i>	- 92
		Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 1666 H ₂ : + 1499 <i>dafür el. Energie: + 2099</i>	- 181
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1523 H ₂ : + 1371 <i>dafür el. Energie: + 1919</i>	- 237
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 705 H ₂ : + 634 <i>dafür CH₄: + 1186 dafür el. Energie: + 181</i>	- 126
		Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 1666 H ₂ : + 1499 <i>dafür CH₄: + 2804 dafür el. Energie: + 428</i>	- 319
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1523 H ₂ : + 1371 <i>dafür CH₄: + 2564 dafür el. Energie: + 391</i>	- 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 [32] verwiesen.

3.2.3.1 Methanol aus grünem Wasserstoff

Derzeit werden in Österreich 28,7 kt Methanol produziert [32], die zu THG Emissionen von ca. 15 kt CO₂e führen¹⁰. Zur Produktion des Methanols wird Erdgas als Ausgangsstoff mit einem 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 [33] 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.

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

Olefine werden unter anderem als Ausgangsstoffe für die Kunststoffproduktion benötigt. Aktuell werden Olefine in Raffinerien aus Erdöl gewonnen. In Österreich werden derzeit 1290 kt Olefine pro Jahr produziert [2]. Alternativ können Olefine aus Methanol, welches wiederum u.a. aus grünem Wasserstoff produziert werden kann, hergestellt werden. DECHEMA [33] 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.

3.2.3.3 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, siehe Tabelle 5. 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 aufgespaltet.

In Österreich werden aktuell 553 kt Ammoniak hergestellt. Um diese Menge klimaneutral produzieren zu können wären 98,2 kt Wasserstoff notwendig¹¹. Dies entspricht einem Energiegehalt von 3,3 TWh. Berücksichtigt man nun die Verluste der Elektrolyse, so wären 4,6 TWh elektrische Energie notwendig.

¹⁰ eigene Berechnung auf Basis der in Österreich angewandten Produktionsprozessen.

¹¹ eigene Berechnung auf Basis der in Österreich angewandten Produktionsprozessen.

3.2.4 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 22 mit roter Umrahmung markiert) in dieser Studie hintanzustellen.

Die Dekarbonisierung der Nutzenergiekategorien, wie sie in Tabelle 22 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. Der durch den Wegfall der Kuppelgase aus Hochofen- und Kokereibetrieb erhöhte Strombedarf in der Größenordnung von 1-2 TWh (bzw. etwa 5-7 % des sektoralen Gesamtenergiebedarfs von 33 TWh, s. Abschnitt 2.5.4) wird in dieser Studie nicht berücksichtigt. Der ebenfalls derzeit aus Kuppelgasen gedeckte Dampf- und Wärmebedarf ist bereits heute in der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria und aus diesem Grund auch in untenstehenden Ergebnistabellen erfasst [5].

Tabelle 22: 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		mittels 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 23 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 23, sondern in Tabelle 24 bei der Diskussion der prozessbedingten Emissionen auf.

Tabelle 23: 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

Neben der oben ausgeführten Vermeidung energiebedingter Emissionen, nehmen die Elektrifizierung und der Einsatz CO₂-neutraler Gase vor allem bei der Vermeidung der Prozessemissionen (Tabelle 24) 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.

In Bezug auf den vermehrten Einsatz von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen ist in Tabelle 24 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 24: 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.

3.2.5 Fahrzeugbau

Dem Sektor Fahrzeugbau liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 25 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Fahrzeugbau. Wie in Kapitel 0 ersichtlich, wird in diesem Sektor für die Produktionsprozesse hauptsächlich elektrische Energie für Motoren eingesetzt. Somit fällt das Einsparungspotential für die Elektrifizierung der verbleibenden fossil angetriebenen Motoren mit 4 kt CO_{2e} sehr gering aus. Da jedoch zur Beheizung der Fertigungshallen u.a. auch Erdgas verwendet wird, gibt es in der Nutzenergiekategorie Raumheizung und Klimaanlage für diesen Sektor das höchste Einsparungspotential. Durch die Anwendung von Wärmepumpen können 75 kt CO_{2e} eingespart werden. Der Einsatz CO₂-neutraler Gase ermöglicht Einsparungen bis zu 82 kt CO_{2e}.

Tabelle 25: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Fahrzeugbau

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: - 409 Elektr. Energie: 121	- 75
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - Elektr. Energie: -	- 0
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 17 Elektr. Energie: + 8	- 4
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 409 H ₂ : + 515 dafür el. Energie: + 94	- 53
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür el. Energie: -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 22 H ₂ : + 20 dafür el. Energie: + 28	- 3
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 409 H ₂ : + 367 dafür CH ₄ : + 688 dafür el. Energie: + 105	- 73
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür CH ₄ : - dafür el. Energie: -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 22 H ₂ : + 20 dafür CH ₄ : + 37 dafür el. Energie: + 6	- 4
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 409 Bio-CH ₄ : + 409	- 82
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - Bio-CH ₄ : -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 22 Bio-CH ₄ : + 22	- 4

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.2.6 Holzverarbeitung

Der Holzverarbeitung liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Zusätzlich werden große Mengen des Energiebedarfs bereits mit klimaneutralen Energieträgern gedeckt, siehe Kapitel 2.5.6. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 26 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Holzverarbeitung.

Da die eigentlichen Produktionsprozesse im Wesentlichen mit klimaneutralen Energieträgern betrieben werden, ist das Dekarbonisierungspotential für die Prozesswärmebereitstellung vernachlässigbar gering. Das größte Einsparungspotential in diesem Sektor liefert die Umstellung der Raumheizungen auf klimaneutrale Alternativen. Durch den Einsatz von Wärmepumpen können bis zu 126 kt CO₂e eingespart werden. Der

Einsatz CO₂-neutraler Gase erlaubt eine THG-Reduktion von bis zu 139 kt CO₂e. Die Elektrifizierung der fossil betriebenen Motoren ermöglicht eine THG-Reduktion von 11 kt CO₂e

Tabelle 26: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Holzverarbeitung

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: - 775 Elektr. Energie: 229	- 126
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - Elektr. Energie: -	- 0
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 47 Elektr. Energie: + 22	- 11
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 775 H ₂ : + 697 dafür el. Energie: + 976	- 84
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür el. Energie: -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 2 H ₂ : + 2 dafür el. Energie: + 3	- 0,1
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 775 H ₂ : + 697 dafür CH ₄ : + 1304 dafür el. Energie: + 199	- 122
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür CH ₄ : - dafür el. Energie: -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 2 H ₂ : + 2 dafür CH ₄ : + 4 dafür el. Energie: + 1	- 0,2
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 775 Bio-CH ₄ : + 775	- 139
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - Bio-CH ₄ : -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 2 Bio-CH ₄ : + 2	- 0,2

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.2.7 Maschinenbau

Dem Sektor Maschinenbau liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 27 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Maschinenbau. Da die Produktionsprozesse dem Sektor Fahrzeugbau ähneln, sind auch die Dekarbonisierungsoptionen ähnlich. Wie in Kapitel 2.5.7 ersichtlich, wird in diesem Sektor für die

Produktionsprozesse hauptsächlich elektrische Energie für Motoren eingesetzt. Somit fällt das Einsparungspotential für die Elektrifizierung der verbleibenden fossil angetriebenen Motoren mit 33 kt CO₂e vergleichsweise gering aus. Da jedoch zur Beheizung der Fertigungshallen u.a. auch Erdgas verwendet wird, gibt es in der Nutzenergiekategorie Raumheizung und Klimaanlage für diesen Sektor das höchste Einsparungspotential. Durch die Anwendung von Wärmepumpen können 155 kt CO₂e eingespart werden. Der Einsatz CO₂-neutraler Gase ermöglicht Einsparungen bis zu 169 kt CO₂e. Zusätzlich können durch die Dekarbonisierung der Bereitstellung von Hochtemperaturprozesswärme mittels CO₂-neutraler Gase bis zu 94 kt CO₂e vermieden werden. Die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme ist bereits fast vollständig elektrifiziert, wodurch es hier defacto kein Einsparungspotential mehr gibt.

Tabelle 27: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Maschinenbau

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: - 839 Elektr. Energie: 248	- 155
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 0,6 Elektr. Energie: + 0,2	- 0,1
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 152 Elektr. Energie: + 72	- 33
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 839 H ₂ : + 755 dafür el. Energie: + 1058	- 110
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 0,6 H ₂ : + 0,5 dafür el. Energie: + 0,7	- 0,1
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 465 H ₂ : + 418 dafür el. Energie: + 586	- 61
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 839 H ₂ : + 755 dafür CH ₄ : + 1413 dafür el. Energie: + 216	- 151
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 0,6 H ₂ : + 0,5 dafür CH ₄ : + 1 dafür el. Energie: + 0,2	- 0,1
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 465 H ₂ : + 418 dafür CH ₄ : + 782 dafür el. Energie: + 119	- 84
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 839 Bio-CH ₄ : + 839	- 169
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 0,6 Bio-CH ₄ : + 0,6	- 0,2
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 465 Bio-CH ₄ : + 465	- 94

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.2.8 Nahrungs- und Genussmittel, Tabak

Dem Sektor Nahrungs- und Genussmittel, Tabak liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 28 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Nahrungs- und Genussmittel, Tabak. Wie in Kapitel 2.5.8 ersichtlich werden in diesem Sektor fossile Energieträger in erster Linie für die Bereitstellung von Niedertemperaturprozesswärme unter 200°C eingesetzt. Aus diesem Grund besteht in dieser Nutzenergiekategorie auch das höchste Dekarbonisierungspotential. Würde eine Umstellung der Aufbringung von Niedertemperaturprozesswärme auf Wärmepumpen erfolgen, würde dies in einer THG-Reduktion von 637 kt CO_{2e} zur Folge haben. Eine Umstellung auf CO₂-neutrale Gase führt zu Einsparungen von bis zu 703 kt CO_{2e}. Auch in diesem Sektor sind Standmotoren bereits im Wesentlichen elektrifiziert, wodurch es hier nur ein sehr geringes Dekarbonisierungspotential von 3 kt CO_{2e}. Auch eine Umstellung der Aufbringung von Raumwärme und der Kühlanlagen führt zu einer vergleichsweise geringen THG-Reduktion in einer Bandbreite von 27 bis 41 kt CO_{2e}.

Tabelle 28: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Nahrungs- und Genussmittel, Tabak

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: - 207 Elektr. Energie: + 61	- 38
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 3539 Elektr. Energie: + 1175	- 637
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 18 Elektr. Energie: + 8	- 3
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 207 H ₂ : + 187 dafür el. Energie: + 261	- 27
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 3539 H ₂ : + 3185 dafür el. Energie: + 4459	- 453
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 83 H ₂ : + 75 dafür el. Energie: + 105	- 11
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 207 H ₂ : + 187 dafür CH ₄ : + 349 dafür el. Energie: + 53	- 37
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 3539 H ₂ : + 3185 dafür CH ₄ : + 5956 dafür el. Energie: + 909	- 627
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 83 H ₂ : + 75 dafür CH ₄ : + 140 dafür el. Energie: + 21	- 15
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 207 Bio-CH ₄ : + 207	- 41
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 3539 Bio-CH ₄ : + 3539	- 703
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 83 Bio-CH ₄ : + 83	- 17

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.2.9 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 und meistzitierten Technologien, die CO₂-Anreicherung mittels Oxyfuel mit anschließender CO₂-Abscheidung, sowie die dem Kalzinierungsprozess nachgeschaltete Aminwäsche, untersucht.

Tabelle 29 zeigt eine Übersicht über die im Sektor Steine & Erden, Glas möglichen Dekarbonisierungstechnologien und deren dafür notwendigen Umstellungsaufwand.

Auch in diesem Sektor weist die Dekarbonisierung der Nutzenergiekategorien bei Elektrifizierung einen mittleren Umstellungsaufwand auf, während der Einsatz CO₂-neutraler Gase einen geringen Aufwand innerhalb des betrachteten Bilanzrahmens mit sich bringt.

Bei der Vermeidung prozessbedingter Emissionen beruht der Unterschied im ausgewiesenen Umstellungsaufwand zwischen den beiden Technologien auf der Tatsache, dass die End-of-pipe-Lösung Aminwäsche lediglich ein Zusatzaggregat am Ende des derzeitigen Produktionsprozesses benötigt, während für die Etablierung der Oxyfuel-Technologie Prozessketten neu dimensioniert und Adaptierungen am Produktionsstandort notwendig werden.

Tabelle 29: Übersicht der Dekarbonisierungsstrategien im Sektor Steine & Erden, Glas

Dekarbonisierungsstrategie	Emissionsursprung		Technologie	Anwendungsbereiche
Elektrifizierung	Energiebedingte Emissionen	Mittlerer Umstellungsaufwand	(Hochtemperatur)-Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme < 200 °C
	Energiebedingte Emissionen		Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren
CO ₂ -neutrales Gas	Energiebedingte Emissionen	Niedriger Umstellungsaufwand	H ₂ (aus Elektrolyse)	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	Prozessbedingte Emissionen	Mittlerer Umstellungsaufwand	Oxyfuel Verbrennung	Erzeugungsprozess
	Prozessbedingte Emissionen		Aminwäsche	Erzeugungsprozess
Kreislaufwirtschaft	Prozessbedingte Emissionen	Niedriger Umstellungsaufwand	Vermehrtes Recycling von Beton	Erzeugungsprozess

 Niedriger Umstellungsaufwand
  Mittlerer Umstellungsaufwand
  Großer Umstellungsaufwand
  Keine Option

Wie Tabelle 30 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 29 dargestellten Prozesse, ist zur Dekarbonisierung von Prozesstemperaturen über 200 °C der Einsatz von CO₂-neutralen Gasen notwendig. Dadurch wäre, je nach Erzeugungsvorkette (Bio-CH₄, Elektrolyse, oder Methanpyrolyse), eine Reduktion energiebedingter Emissionen zwischen 1714 und 1233 kt CO₂e möglich.

Tabelle 30: 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, wie eingangs erwähnt, in diesem Sektor alternativlos (Tabelle 31). 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 [34]. 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 Drehrohrfen 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 [8] 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 Treibhausgasen 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 [35] 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 [36]. Unter Zugrundelegung des derzeitigen Energieträgermix (dargestellt in Abbildung 29) für die benötigte Trocknung des Rezyklats nach [37] kann lediglich eine Einsparung von bis zu 90 kt CO₂e 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 CO₂e. 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 31: 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 ₂ e
Carbon Capture	Oxyfuel-Verbrennung	Erzeugungsprozess	Elektr. Energie: + 676	- 2490
	Aminwäsche mit Wärmepumpe	Erzeugungsprozess	Elektr. Energie: + 1421	- 2449
Kreislaufwirtschaft	Recyclingeinsatz von Beton mitzeitigem 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.

3.2.10 Papier & Druck

Das technische Dekarbonisierungspotential im Sektor Papier und Druck basiert auf der Vermeidung der in diesem Sektor anfallenden energiebedingten Emissionen (Tabelle 32). 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 33 weist das Dekarbonisierungspotential der Stromerzeugung getrennt von der Dampferzeugung (Prozesswärme <200 °C) aufgrund der oben angesprochenen Methodik der statistischen Erhebung aus. Darüber hinaus zeichnen die für Papier und Druck zur Verfügung stehenden Dekarbonisierungstechnologien für die energiebedingten Emissionen ein aus den übrigen Sektoren bekanntes Bild. Während der bloße Ersatz fossiler Kohlenwasserstoffe durch CO₂-neutrale Gase einen niedrigen Umstellungsaufwand aufweist, muss bei einer Elektrifizierung von Standmotoren und Prozesstemperaturen < 200 °C ein mittlerer Aufwand in Kauf genommen werden.

Tabelle 32: Übersicht der Dekarbonisierungsstrategien im Sektor Papier & Druck

Dekarbonisierungsstrategie	Emissionsursprung	Technologie	Anwendungsbereiche
Elektrifizierung	Energiebedingte Emissionen	(Hochtemperatur)-Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme < 200 °C
	Energiebedingte Emissionen	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren
CO ₂ -neutrales Gas	Energiebedingte Emissionen	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C Industrieeigene KWK-Anlagen (Stromerzeugung)
	Energiebedingte Emissionen	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C Industrieeigene KWK-Anlagen (Stromerzeugung)
	Energiebedingte Emissionen	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage Prozesswärme </> 200 °C Industrieeigene KWK-Anlagen (Stromerzeugung)
Carbon Capture			
Kreislaufwirtschaft			

 Niedriger Umstellungsaufwand

 Mittlerer Umstellungsaufwand

 Großer Umstellungsaufwand

 Keine Option

Tabelle 33 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.

Tabelle 33: 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

Wie gezeigt findet die Dekarbonisierung im Sektor Papier und Druck über die Verringerung der energiebedingten Emissionen statt. 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.

3.2.11 Nicht-Eisen Metalle

Dem Sektor Nicht-Eisen Metalle liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 34 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Nicht-Eisen Metalle. In diesem Sektor werden fossile Energieträger, und hier vor allem Erdgas, für die Aufbringung von Hochtemperaturprozesswärme über 200°C eingesetzt, siehe Kapitel 2.5.11. Aus diesem Grund weist diese Nutzenergiekategorie auch das höchste Dekarbonisierungspotential auf. Der Einsatz CO₂-neutraler Gase kann, je nach eingesetzter Technologie, zu THG-Reduktionen von 171 bis 261 kt CO₂e führen. Der geringe Anteil an Niedertemperaturprozesswärme, der in diesem Sektor benötigt wird, ist bereits vollständig elektrifiziert. Daher gibt es in dieser Nutzenergiekategorie kein weiteres direktes Dekarbonisierungspotential. Auch die Standmotoren des Sektors sind im Wesentlichen elektrifiziert. Eine vollständige Elektrifizierung würde 4 kt CO₂e an THG-Emissionen einsparen.

Tabelle 34: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Nicht-Eisen Metalle

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: - 108 Elektr. Energie: + 32	- 20
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - Elektr. Energie: -	- 0
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 23 Elektr. Energie: + 11	- 4
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 108 H ₂ : + 97 dafür el. Energie: + 136	- 14
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür el. Energie: -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1287 H ₂ : + 1158 dafür el. Energie: + 1621	- 171
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 108 H ₂ : + 98 dafür CH ₄ : + 182 dafür el. Energie: + 28	- 19
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür CH ₄ : - dafür el. Energie: -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1287 H ₂ : + 1158 dafür CH ₄ : + 2165 dafür el. Energie: + 330	- 234
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 108 Bio-CH ₄ : + 108	- 21
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - Bio-CH ₄ : -	- 0
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 1287 Bio-CH ₄ : + 1287	- 261

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.2.12 Textil und Leder

Dem Sektor Textil und Leder liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 35 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Textil und Leder. Wie in Kapitel 2.5.12 ersichtlich werden in diesem Sektor fossile Energieträger in erster Linie für die Bereitstellung von Niedertemperaturprozesswärme eingesetzt. Somit weist diese Nutzenergiekategorie das höchste Dekarbonisierungspotential auf. Der Einsatz von Wärmepumpen zur Bereitstellung von Niedertemperaturprozesswärme kann 66 kt CO₂e an THG-Emissionen einsparen. Der Einsatz von CO₂-neutralen Gasen reduziert die THG-Emissionen, je nach Technologie, zwischen 47 und 72 kt CO₂e. Eine

Umstellung der fossil-betriebenen Standmotoren und der Raumheizung bzw. Kühlanlagen auf klimaneutrale Technologien hat einen vergleichsweise geringen Einfluss. Hochtemperaturprozesswärme wird in diesem Sektor nicht eingesetzt. Daher ist für diese Nutzenergiekategorie kein Dekarbonisierungspotential ausgewiesen.

Tabelle 35: Technische Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Textil und Leder

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: - 26 Elektr. Energie: + 7,7	- 5
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 365 Elektr. Energie: + 121	- 66
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 48 Elektr. Energie: + 23	- 8
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 26 H ₂ : + 23 dafür el. Energie: + 33	- 3
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: -365 H ₂ : + 328 dafür el. Energie: + 460	- 47
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür el. Energie: -	- 0
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 26 H ₂ : + 24 dafür CH ₄ : + 44 dafür el. Energie: + 7	- 5
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 365 H ₂ : + 328 dafür CH ₄ : + 614 dafür el. Energie: + 54	- 65
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - H ₂ : - dafür CH ₄ : - dafür el. Energie: -	- 0
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 26 Bio-CH ₄ : + 26	- 5
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 365 Bio-CH ₄ : + 365	- 72
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - Bio-CH ₄ : -	- 0

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.1.13 Sonstiger Produzierender Bereich

Im sonstigen produzierenden Bereich liegt in allen untersuchten Dekarbonisierungsstrategien eine mehr oder weniger umfangreiche Vermeidung von energiebedingten THG-Emissionen zu Grunde. Dieser Sektor zählt mit seiner Vielzahl an unterschiedlichen Subsektoren zu den nicht-energieintensiven Sektoren und emittiert keine prozessbedingten Emissionen. Somit werden für diesen Sektor die Dekarbonisierungspotentiale aus der Nutzenergieanalyse über den beschriebenen Top-Down Ansatz abgeschätzt.

Tabelle 36 zeigt die technischen Potentiale zur Verringerung der energiebedingten Emissionen im Sektor Sonstiger Produzierender Bereich. Wie aus Kapitel 2.5.13 ersichtlich, besteht der Energiebedarf dieses

Sektors Großteiles aus dem Betrieb bereits mehrheitlich elektrifizierter Standmotoren. Vergleichsweise geringe Energiemengen werden für die Wärmebereitstellung aufgewendet. Da hier jedoch u.a. auch fossile Energieträger eingesetzt werden, weist die Wärmebereitstellung das höchste Dekarbonisierungspotential auf. Eine Umstellung der Niedertemperaturprozesswärme auf Wärmepumpen führt zu einem Dekarbonisierungspotential von 50 kt CO₂e. Eine Bereitstellung der benötigten Niedertemperaturprozesswärme mittels CO₂-neutraler Gase kann zu THG-Einsparungen zwischen 36 und 56 kt CO₂e führen. Eine Dekarbonisierung der Hochtemperaturprozesswärmebereitstellung reduziert, je nach Technologie, die THG-Emissionen zwischen 12 und 18 kt CO₂e.

Tabelle 36: 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: - 171 Elektr. Energie: + 50	- 29
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200 °C	Fossile ET: - 281 Elektr. Energie: + 93	- 50
	Elektrifizierung von Motoren	Standmotoren	Fossile ET: - 29 Elektr. Energie: + 14	- 5
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 171 H ₂ : + 153 <i>dafür el. Energie: + 215</i>	- 20
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 281 H ₂ : + 253 <i>dafür el. Energie: + 354</i>	- 36
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 89 H ₂ : + 80 <i>dafür el. Energie: + 112</i>	- 12
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 171 H ₂ : + 153 <i>dafür CH₄: + 287</i> <i>dafür el. Energie: + 44</i>	- 28
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 281 H ₂ : + 253 <i>dafür CH₄: + 473</i> <i>dafür el. Energie: + 72</i>	- 50
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 89 H ₂ : + 80 <i>dafür CH₄: + 150</i> <i>dafür el. Energie: + 23</i>	- 16
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	Fossile ET: - 171 Bio-CH ₄ : + 171	- 32
		Prozesswärme < 200°C	Fossile ET: - 281 Bio-CH ₄ : + 281	- 56
		Prozesswärme > 200 °C	Fossile ET: - 89 Bio-CH ₄ : + 89	- 18

Gelbe Schriftfarbe: Mitigation-Strategie

Grüne Schriftfarbe: Deep Decarbonisation-Strategie

3.3 Zusammenfassung des technischen Dekarbonisierungspotentials

Fasst man nun sämtliche Dekarbonisierungspotentiale der österreichischen Industrie zusammen, so erhält man die in Tabelle 37 (energiebedingte Emissionen) und in Tabelle 38 (prozessbedingte Emissionen) ausgewiesenen Werte.

Das mit Abstand größte 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 37: 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 38: 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

3.4 Auswirkungen auf das österreichische Energiesystem

Wie bereits in den Tabellen zu den technischen Potentialen (siehe Kapitel 3.2) 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 [33].

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 37 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.

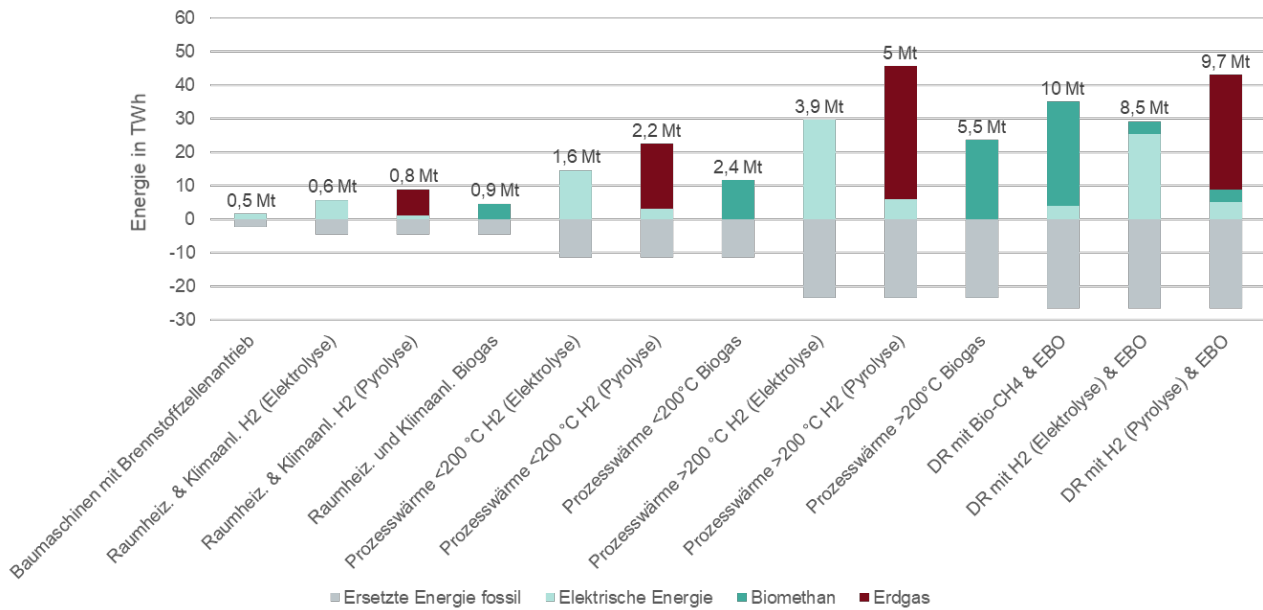


Abbildung 37: Auswirkung der Dekarbonisierungsstrategie CO₂-neutrale Gase auf das Energiesystem bei vollständiger Implementierung der Maßnahmen. Das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential jeder Maßnahme in Mt CO₂e ist über dem betreffenden Balken angegeben.

Abbildung 38 zeigt die Auswirkungen auf das Energiesystem der Maßnahmen aus der Dekarbonisierungsstrategie Elektrifizierung. Zu besseren Vergleichbarkeit mit Abbildung 37 wurde bei der Darstellung die gleiche Skalierung der vertikalen Achse gewählt. 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.

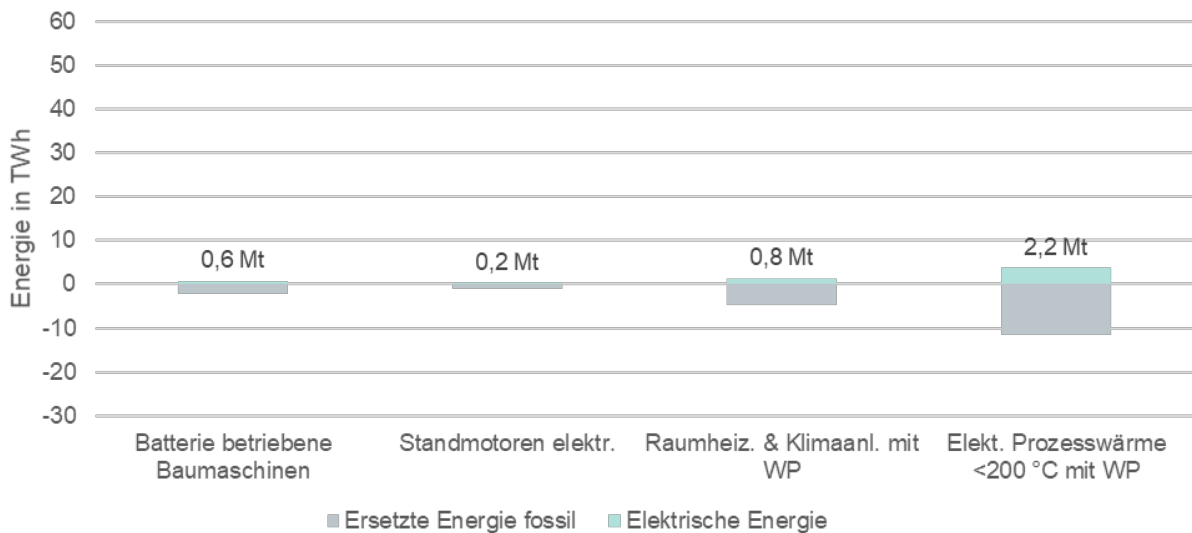


Abbildung 38: Auswirkung der Dekarbonisierungsstrategie Elektrifizierung auf das Energiesystem bei vollständiger Implementierung der Maßnahmen. Das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential jeder Maßnahme ist über dem betreffenden Balken angegeben.

Abbildung 39 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.

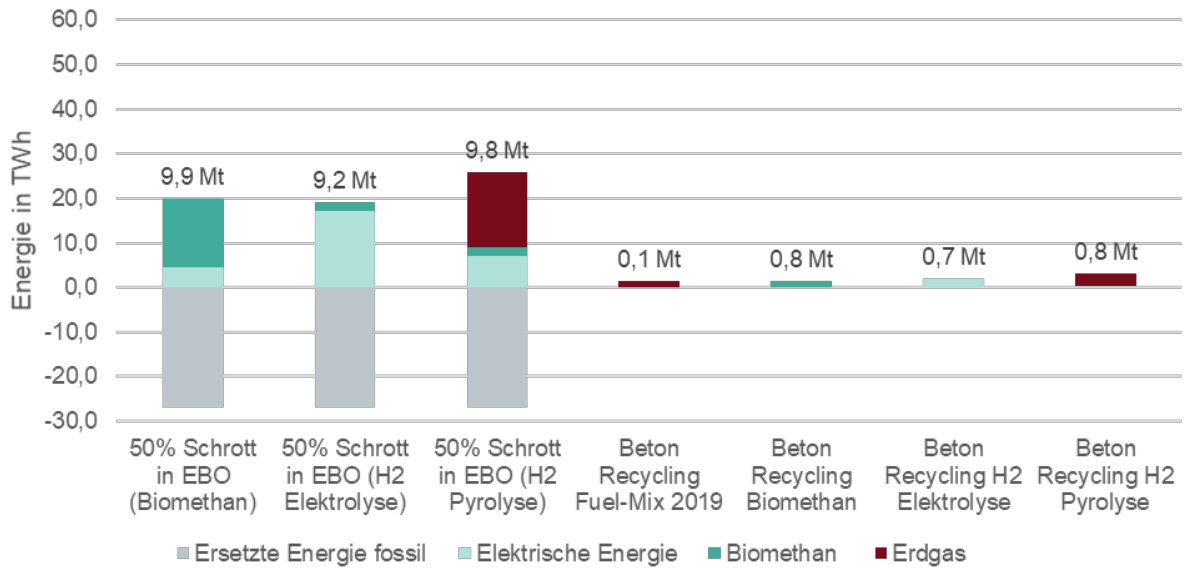


Abbildung 39: Auswirkung der Dekarbonisierungsstrategie Kreislaufwirtschaft auf das Energiesystem bei vollständiger Implementierung der Maßnahmen. Das maximal mögliche Dekarbonisierungspotential jeder Maßnahme ist über dem betreffenden Balken angegeben.

4 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 [38]. Die Investitionskosten in Technologien und Prozesse, um bis 2050 eine Dekarbonisierung der EU zu erreichen, schätzt [39] 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.

4.1 Einschränkungen in der Kostenbewertung

Zu den THG-Reduktionskosten der österreichischen Industrie liegen keine sektoral vergleichbaren Untersuchungen vor, weshalb für die vorliegende Abschätzung in erster Linie Studien zur deutschen und europäischen Industrie herangezogen werden:

- **Klimaneutrale Industrie, Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement.** Agora Energiewende. [40]
- **Klimapfade für Deutschland.** Boston Consulting Group und Prognos. [41]
- **Net-Zero Europe, Decarbonization pathways and socioeconomic implications.** McKinsey & Company. [39]
- **Industrial Transformation 2050, Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry.** Material Economics. [42]
- **CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO₂ capture in cement plants.** CEMCAP Projekt [43]
- **Roadmap Chemie, Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland.** Dechema, Futurecamp [33]
- **Planungsleitfaden EnPro – Erneuerbare Prozesswärme, Integration von Solarthermie und Wärmepumpen in industrielle Prozesse.** AIT, AEE, TU Wien [44]
- **IEA G20 Hydrogen report: Assumptions.** International Energy Agency [45]
- **Closed Loop Economy: the Case of Concrete in the Netherlands.** Universiteit Leiden & TU Delft [46]

Es wird darauf hingewiesen, dass die in den jeweiligen Studien enthaltenen Abschätzungen zu den gesamten Dekarbonisierungskosten auf spezifischen und unterschiedlichen Annahmen beruhen. Die wichtigsten dieser Annahmen sind der Preis für CO₂-freie Elektrizität, die (zukünftigen) Technologiekosten, die Entwicklungen anderer Energiepreise und des CO₂-Preises sowie Annahmen zu Zinssatz bzw. Diskontierung und Betriebsdauer (jährlich und gesamt). Vor diesem Hintergrund werden die spezifischen Gesamtkosten der Dekarbonisierung, sofern vorhanden, in Wertebereichen angegeben, um eine Orientierung über günstigere und teurere Optionen zu geben.

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. Beispielsweise beträgt der Anteil der CAPEX an den aktuell erreichbaren Gestehungskosten für Wasserstoff aus Elektrolyse nur etwa 55%¹². Bei Annahme gleichbleibender Betriebskosten ist außerdem davon auszugehen, dass dieser Anteil durch Lernkurven- und Skaleneffekte, insbesondere bei dem aktuellen Innovationstempo und Entwicklungsstand der betrachteten Technologien, weiter sinken wird (vgl. [47, 48]). Bereits heute lassen sich diese Kostensenkungen bei Biomethan aus anaerober Vergärung beobachten, wobei auch hier noch mit einer zusätzlichen Reduktion des Investitionskostenanteils durch Skaleneffekte gerechnet wird [49].

Die Kosten der Dekarbonisierung hängen wesentlich von den verwendeten Energieträgern, wie Strom und (CO₂-neutrales) Gas, und erneuerbaren Rohstoffen, wie Biomasse ab. Durch den hohen Anteil an Elektrifizierung in den betrachteten Maßnahmen ist die Abhängigkeit der Gesamtkosten von den Kosten(-entwicklungen) für CO₂-freie Elektrizität besonders hoch. Die verwendeten Studien gehen zu einem großen Teil von einem Preisintervall zwischen 50 und 70 €/MWh aus.

Als Reaktion auf die angeführten Schwierigkeiten bei der Bewertung von vergleichbaren Gesamtkosten der einzelnen Dekarbonisierungsoptionen werden innerhalb dieser Studie nur die direkten Investitionen in die jeweiligen Technologien betrachtet. Die Investitionskosten werden in Bezug zu den identifizierten Dekarbonisierungspotentialen gesetzt und als Summe der Investitionskosten bis 2040 dargestellt. Diese Betrachtungen ermöglichen eine Abschätzung des notwendigen Kapitalaufwands für die einzelnen Sektoren und damit auch eine potenzielle Entscheidungshilfe für etwaige Förderungen einzelner Maßnahmen in Abhängigkeit von deren Dekarbonisierungspotential. Eine vergleichende Betrachtung der Gesamtkosten (inklusive einheitlicher Bewertung der Betriebskosten) ist vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Herausforderungen nicht Teil dieser Studie.

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.

4.2 Kosten der Querschnittstechnologien

Die Technologien zur Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen werden wie in Kapitel 3 beschrieben in mehreren – teilweise auch allen – Sektoren eingesetzt. Die Methode und Datenquellen zur Bestimmung der Kosten dieser Technologien werden daher hier gesammelt beschrieben; in den nachfolgenden Unterkapiteln zu den einzelnen Sektoren werden lediglich die mit diesen Maßnahmen im jeweiligen Sektor in Verbindung

¹² Basierend auf den in [47] ermittelten Gestehungskosten für eine Elektrolysekapazität von 5 MW_{el} und 5.000 Volllaststunden pro Jahr

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.

4.2.1 Wärmepumpen

Der Einsatz von Wärmepumpen stellt eine Möglichkeit zur Dekarbonisierung von *Raumheizungen und Klimaanlage* als auch zur Bereitstellung CO₂-freier *Prozesswärme bis 200 °C* dar.

Für kommerzielle Wärmepumpen zur Raumwärmebereitstellung mit einem COP von 3 werden in [39] spezifische CO₂-Reduktionkosten von 40 €/t CO₂ ausgewiesen. Die Investitionskosten (Anschaffung und Installation) werden basierend auf einer Recherche von Preisblättern für Wärmepumpen mit durchschnittlich 1.000 €/kW Heizleistung angenommen. Für die Volllaststunden werden 2.200 h/Jahr als typischer Mittelwert angenommen.

Für Wärmepumpen zur Bereitstellung von Prozesswärme mit einem COP von 2,5 werden Volllaststunden von 4.000 h/Jahr angenommen. Die Investitionskosten liegen zwischen 250 und 400 €/kW Heizleistung [44]. Für die Abschätzung der Investitionskosten wird der Mittelwert dieser zwei Werten herangezogen.

4.2.2 CO₂-neutrale Gase für energiebedingte Emissionen

Für die Reduktion der energiebedingten THG-Emissionen aus Wärme- und Stromproduktion wird die Dekarbonisierungsstrategie *CO₂-neutrale Gase* über alle Sektoren hinweg gesammelt betrachtet. Diese trifft primär im Anwendungsbereich *Prozesswärme >200 °C* zu, wo der Einsatz von Wärmepumpen technisch nicht möglich ist, sowie als Alternative zu Wärmepumpen in den Anwendungsbereichen *Raumheizungen und Klimaanlage* und *Prozesswärme bis 200 °C*. Darüber hinaus kommen sie im Sektor Papier und Druck in der Anwendung *betriebseigene KWK-Anlagen (Stromproduktion)* zu tragen.

Für die Dekarbonisierung dieser Bereiche stellt die Bereitstellung des CO₂-neutralen Gases den größten Kostenfaktor dar. Ein wesentlicher Aspekt ist in dieser Betrachtung der Standort der Produktionsanlage (Elektrolyse-, Pyrolyse- bzw. Biogasanlage). Je nachdem, ob die Produktion am Industriestandort stattfindet oder das Gas als Energieträger zugekauft wird, sind entsprechende Investitionskosten entweder der Industrie selbst oder dem Sektor Energie zuzurechnen und werden daher in den Abbildungen jeweils gesondert dargestellt bzw. gekennzeichnet. Die spezifischen CO₂-Reduktionskosten sind davon weitgehend unabhängig. Da sich diese CO₂-neutralen Gase sowohl in ihrer Zusammensetzung (Wasserstoff oder Methan) als auch ihrer Aufbringung wesentlich unterscheiden können, werden im Folgenden *Wasserstoff aus Elektrolyse*, *Wasserstoff aus Methanpyrolyse* und *Methan aus Biogas* als Optionen zur Bereitstellung CO₂-neutraler Gase diskutiert.

4.2.2.1 Wasserstoff aus Elektrolyse

Um möglichst konsistent mit den Wasserstoff-basierten Maßnahmen zur Reduktion der prozessbedingten Emissionen in den Sektoren Eisen- & Stahlerzeugung und Chemie zu bleiben, werden primär die in [45] genannten Investitionskosten für die Wasserelektrolyse herangezogen. Diese werden, ohne Angabe der Anlagenkapazität, mit 595 €/kW_{el} (2030) bzw. 385 €/kW_{el} (long-term) angegeben und decken sich damit weitgehend mit anderen Kostenprognosen für den Zeitraum bis 2040 (380–650 €/kW_{el} für 5 MW_{el} in [47]). Zur Berechnung der Gesamtinvestitionen auf Basis des zukünftigen Wasserstoffbedarfs werden, unter der Annahme von 5.000 Volllaststunden pro Jahr, mittlere Investitionskosten von 138 €/MWh H₂ angenommen.

4.2.2.2 Wasserstoff aus Methanpyrolyse

Die Methanpyrolyse stellt im Vergleich zur Wasserelektrolyse eine vergleichsweise neue Technologie dar deren technische Einsatzreife in der Industrie aktuell noch nicht gegeben ist [33]. Entsprechend beschränkt und unsicher stehen daher Abschätzungen zu Investitionskosten im industriellen Maßstab zur Verfügung. Die von FutureCamp Climate und DECHEMA herausgegebene Studie „Roadmap Chemie 2050“ [33] gibt hierfür Investitionskosten von 3.500 €/t H₂ bzw. 105 €/MWh H₂ an, wobei zukünftig mit deutlichen Kostenreduktionen gerechnet wird. Wesentlicher Vorteil der Methanpyrolyse für die Wasserstoffproduktion gegenüber der Elektrolyse ist jedenfalls der deutlich geringere Strombedarf und die damit verbundenen niedrigeren Kosten.

4.2.2.3 Biomethan aus anaerober Gärung

Werden die Anlagen zur Erzeugung des benötigten Biogases der jeweiligen Industrie zugerechnet, so fallen hierfür Investitionen für entsprechende Biogasanlagen (anaerobe Gärung) und Aufbereitungseinheiten an. Diese Investitionskosten liegen lt. [49] aktuell in einem Bereich von 1.195 bis 1.380 €/kW_{th}. Gemäß zukünftig erwarteter Kostenreduktionen können hier, ausgehend von einem nahezu ganzjährigen Betrieb (8.500 h/a), spezifische Investitionskosten von 75–85 €/MWh CH₄ erreicht werden. Für die nachfolgenden Berechnungen wird von einem mittleren Wert von 80 €/MWh CH₄ ausgegangen.

4.2.3 Elektrifizierung Standmotoren

In diesem Bereich weist die vorliegende Studie zwar CO₂-Emissionsreduktionen aus, es wird aber davon ausgegangen, dass durch die Umstellung auf elektrische Standmotoren bis 2040 keine Kosten für die Industrie entstehen, die über die üblichen Reinvestitionszyklen in diesen Bereichen hinausgehen.

4.3 Investitionskosten der Dekarbonisierung in den Industriesektoren

4.3.1 Bau

4.3.1.1 Dekarbonisierung Standmotoren

In diesem Bereich weist die vorliegende Studie zwar CO₂-Emissionsreduktionen aus, es wird aber davon ausgegangen, dass durch die Dekarbonisierung von Standmotoren bis 2040 keine Kosten für die Industrie entstehen, die über die üblichen Reinvestitionszyklen in diesem Bereich hinausgehen.

4.3.1.2 Dekarbonisierung der Querschnittstechnologien

Für die im Sektor *Bau* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 39 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 39: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Bau¹³

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	78
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	2
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	24
		Prozesswärme < 200°C	4
		Prozesswärme > 200 °C	24
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	18
		Prozesswärme < 200°C	3
		Prozesswärme > 200 °C	18
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	16
		Prozesswärme < 200°C	3
		Prozesswärme > 200 °C	14

¹³ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.2 Bergbau

Für die im Sektor Bergbau zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 40 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 40: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Bergbau¹⁴

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	30
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	96
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	9
		Prozesswärme < 200°C	175
		Prozesswärme > 200 °C	22
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	7
		Prozesswärme < 200°C	134
		Prozesswärme > 200 °C	17
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	6
		Prozesswärme < 200°C	115
		Prozesswärme > 200 °C	13

¹⁴ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.3 Chemie- und Petrochemie

Für die im Sektor *Chemie- und Petrochemie* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 41 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 41: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Chemie- und Petrochemie¹⁵

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 [50] zu finden.

¹⁵ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.3.1 Methanol aus grünem Wasserstoff

Für die Produktion von Methanol (MeOH) mittels grünen Wasserstoffes weisen sowohl DECHEMA [33] als auch IEA [45] 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 mit Kostenbereichen von 662–1.045 €/t MeOH (DECHEMA) bzw. 320–670 €/t MeOH aber deutliche Unterschiede, wenngleich in der Langzeitbetrachtung ähnliche Kostenreduktionen erwartet werden (untere Kostengrenze). Für die Abschätzung der gesamten Investitionskosten wird, auch aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den anderen Wasserstoff-basierten Anwendungen, aus den Daten der IEA für 2030 (505 €/t MeOH) und „long term“ (325 €/t MeOH) ein Mittelwert von 415 €/t MeOH herangezogen. Unter der Annahme einer jährlichen Produktionsmenge von 28,7 kt Methanol ist bis 2040 mit Investitionskosten von **11,9 Mio. Euro** zu rechnen.

4.3.3.2 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 4.3.3.1 diskutierten Grundkosten übernommen. Bei einem Bedarf von 2,67 t Methanol pro Tonne Olefine [51] ergeben sich damit Kosten von 1.110 €/t HVC (High Value Chemicals) für die Bereitstellung des Methanols. Zusätzlich entfallen lt. Annahmen der Agora Energiewende [40] etwa 19 €/t HVC für die Methanol-to-Olefine-Anlage. Dies resultiert in gesamten spezifischen Investitionskosten von rund 1.130 €/t Olefine.

Die Studie der Agora Energiewende schätzt die Kapitalkosten für diesen Prozess auf 402 €/t HVC, allerdings mit einer anderen Systemgrenze ohne Investitionen für die Elektrolyse und zusätzlichen Kosten für die CO₂-Abscheidung aus der Luft (DAC). Unter Berücksichtigung der Kosten für die Elektrolyse (250–500 €/kW_{el} lt. [40] und 5.000 h/a) und Bereinigung um die Kosten des DAC ergeben sich Investitionskosten von 1.450–2.635 €/t HVC, die primär von den Kosten für die Wasserstoffproduktion abhängig sind.

Die CO₂-Reduktionskosten liegen gemäß [40] zwischen 84-515 €/t CO₂.

Unter der Annahme einer jährlichen Produktionsmenge von 1.290 kt Olefinen ist bis 2040 mit Investitionskosten von **1.458 Mio. Euro** zu rechnen, wobei aus Konsistenzgründen die Methanol-basierten Investitionskosten mit 1.130 €/t Olefine herangezogen wurden.

4.3.3.3 Ammoniak aus grünem Wasserstoff

Für die Erzeugung von Ammoniak (NH₃) aus erneuerbarem Wasserstoff sind in Studien der DECHEMA [33] und der IEA [45] entsprechende Kosten ausgewiesen. Demnach betragen die Investitionskosten für den Prozess im Bereich von 490–985 €/t NH₃ (IEA) bzw. 855–1.823 €/t NH₃ (DECHEMA). 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 wird wiederum der Mittelwert der Kostenprognosen des IEA Reports – 750 €/t NH₃ für 2030 bzw. 490 €/t NH₃ (long term) – mit 620 €/t NH₃ herangezogen.

Unter der Annahme einer jährlichen Produktionsmenge von 553 kt Ammoniak ist bis 2040 mit Investitionskosten von **343 Mio. Euro** zu rechnen.

4.3.4 Eisen- & Stahlerzeugung

Für die im Sektor *Eisen- & Stahlerzeugung* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 42 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 42: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung¹⁶

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

Darüber hinaus spielen im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung die prozessbedingten Emissionen eine besonders wichtige Rolle. In Kapitel 3.2.4 wurden für die prozessbedingten Emissionen des Sektors die beiden Dekarbonisierungsstrategien *CO₂-neutrales Gas* und *Kreislaufwirtschaft* identifiziert, wobei alle Maßnahmen eine Direktreduktion mit CO₂-neutralem Gas und eine prozessbedingte Elektrifizierung über die Elektrostahlroute vorsehen.

4.3.4.1 Direktreduktion mittels CO₂-neutraler Gase

Die Dekarbonisierungsstrategie CO₂-neutrales Gas im Sektor Eisen und Stahl sieht eine Primärstahlerzeugung durch Direktreduktion und Einschmelzen im Elektrolichtbogenofen (EAF) vor, wobei wiederum die folgenden CO₂-neutralen Gase individuell betrachtet werden:

- Bio-Methan
- Wasserstoff aus Elektrolyse
- Wasserstoff aus Methanpyrolyse

Für die Direktreduktion (DR) mittels Wasserstoff aus der Elektrolyse weist Agora Energiewende [40] zu erwartende spezifische Kapitalkosten von 40 €/t Rohstahl (CS) für DR-Anlage und EAF aus. Die

¹⁶ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

Investitionskosten für die Produktion des benötigten Reduktionsmittels (Wasserstoff) sind darin nicht enthalten. Die resultierenden CO₂-Kosten, unter Berücksichtigung der Betriebs- und sonstigen Kosten, werden dabei mit 532–630 €/t CS angegeben.

Die IEA [45] gibt die Investitionskosten für Wasserstoff-basierte DR und EAF mit 640–805 €/t CS, inkl. der Investitionskosten für die Bereitstellung des CO₂-neutralen Gases mittels Elektrolyse. Der Bericht weist nicht direkt vergleichbare Kapitalkosten für die Direktreduktion mittels Bio-Methan aus. Für die Berücksichtigung der Option Bio-Methan wird daher gleich wie für die Option Wasserstoff aus Methanpyrolyse der Anteil der Elektrolysekosten aus den oben genannten Investitionen für Wasserstoff-basierte DR mit den in Abschnitt 4.2.2.3 und 4.2.2.2 ermittelten Kosten für die Bio-Methan Produktion bzw. Methanpyrolyse ersetzt.

Für die drei Optionen werden folglich die Mittelwerte der IEA-Kostenprognosen (2030 und „long term“) und die daraus berechneten Werte angesetzt:

- Bio-Methan: 688 €/t CS¹⁷
- Wasserstoff aus Elektrolyse: 685 €/t CS
- Wasserstoff aus Methanpyrolyse: 600 €/t CS

4.3.4.2 Vermehrter Schrotteinsatz mit Direktreduktion

Bei den Maßnahmen mit erhöhtem Sekundärstahlanteil reduzieren sich die Kosten im Vergleich zu den Maßnahmen ohne Schrotteinsatz Direktreduktion mittels CO₂-neutraler Gase wie folgt: Durch den erhöhten Schrottanteil von 50% reduzieren sich die Kosten für die Direktreduktion sowie die Investitionskosten für die Produktion des Reduktionsmittels um jeweils 50%. Die Investitionskosten für den Elektrolichtbogenofen bleiben gleich. Daraus resultieren folgende spezifische Werte für die Varianten der Dekarbonisierungsstrategie *Kreislaufwirtschaft*:

- Bio-Methan, 50% Schrottanteil: 415 €/t CS¹⁸
- Wasserstoff aus Elektrolyse, 50% Schrottanteil: 410 €/t CS
- Wasserstoff aus Methanpyrolyse, 50% Schrottanteil: 370 €/t CS

¹⁷ Die zusätzlichen Investitionskosten für den Dampf-Reformer sind darin nicht enthalten.

¹⁸ Die zusätzlichen Investitionskosten für den Dampf-Reformer sind darin nicht enthalten.

Tabelle 43: Investitionskosten für Technologien 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	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von Bio-CH ₄	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	1607 DRI-CS 1262 Bio-CH ₄
	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von H ₂ (Elektrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	1607 DRI-CS 1248 H ₂ (Elektrolyse)
	<u>Einsatz in EBO</u> Einsparung von H ₂ (Pyrolyse)	Einsatz von 50% Schrott im EBO zur Stahlherstellung	1607 DRI-CS 958 Pyrolyse

Im Sektor Eisen- und Stahlerzeugung sind die Investitionskosten für die Reduktion der energiebedingten THG deutlich niedriger als für die Reduktion der prozessbedingten THG. Der Hauptanteil der Gesamtinvestitionskosten fällt für die Reduktion prozessbedingter THG an (inklusive der Produktion der Reduktionsmittel).

Die folgende Abbildung 40 fasst 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.

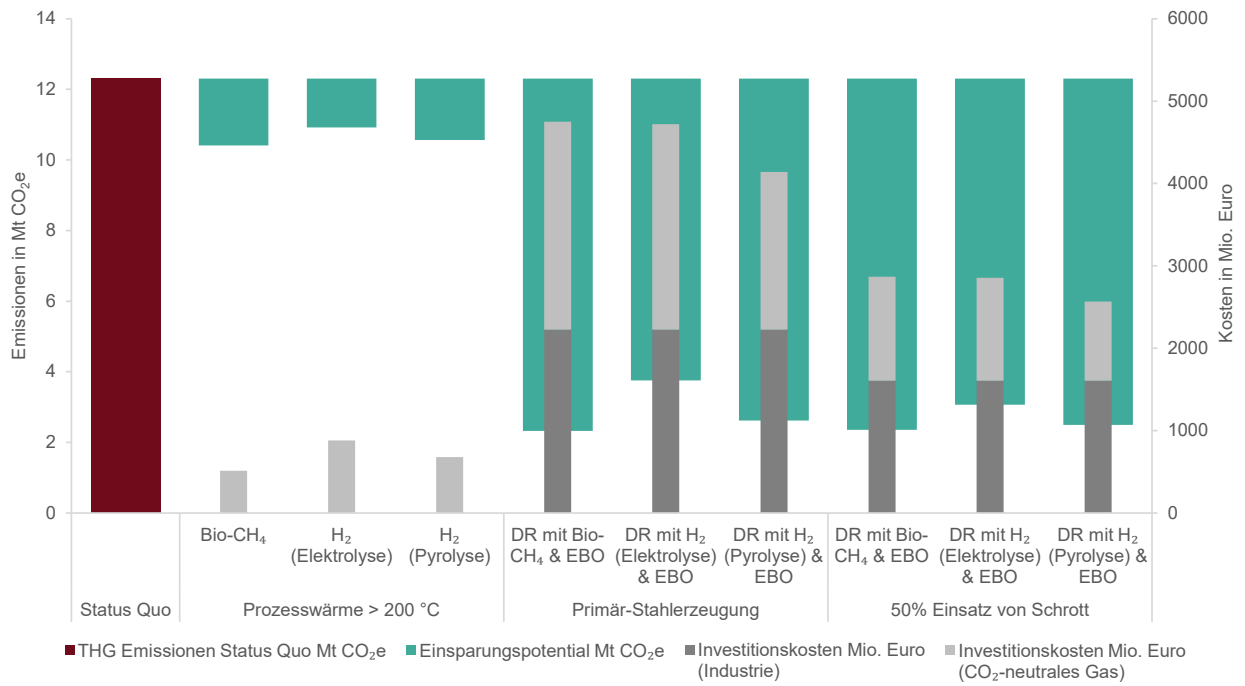


Abbildung 40: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Eisen- & Stahlerzeugung für die Anwendungsbereiche Prozesswärme > 200 °C und Stahlerzeugung

4.3.5 Fahrzeugbau

Für die im Sektor *Fahrzeugbau* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 44 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 44: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Fahrzeugbau¹⁹

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	165
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	-
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	50
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	3
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	39
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	2
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	33
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	2

¹⁹ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.6 Holzverarbeitung

Für die im Sektor *Holzverarbeitung* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 45 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 45: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Holzverarbeitung²⁰

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	312
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	-
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	95
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	0,3
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	73
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	0,2
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	63
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	0,2

²⁰ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.7 Maschinenbau

Für die im Sektor *Maschinenbau* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 46 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 46: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Maschinenbau²¹

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	338
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	0,04
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	103
		Prozesswärme < 200°C	0,07
		Prozesswärme > 200 °C	57
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	79
		Prozesswärme < 200°C	0,06
		Prozesswärme > 200 °C	44
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	68
		Prozesswärme < 200°C	0,05
		Prozesswärme > 200 °C	33

²¹ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.8 Nahrungs- und Genussmittel, Tabak

Für die im Sektor *Nahrungs- und Genussmittel, Tabak* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 47 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 47: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Nahrungs- und Genussmittel, Tabak²²

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	83
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	239
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	26
		Prozesswärme < 200°C	436
		Prozesswärme > 200 °C	10
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	20
		Prozesswärme < 200°C	335
		Prozesswärme > 200 °C	8
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	17
		Prozesswärme < 200°C	287
		Prozesswärme > 200 °C	6

²² Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.9 Steine & Erden, Glas

Für die im Sektor *Steine & Erden, Glas* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 48 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 48: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Steine & Erden, Glas²³

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 Herleitung der Kosten für die spezifischen Optionen im Sektor *Steine, Erden und Glas* wird im Folgenden beschrieben.

4.3.9.1 Carbon Capture

Aufgrund des hohen Anteils an geogenen CO₂-Emissionen in der Zementherstellung ist eine signifikante Reduktion nur durch Abscheiden aus den Prozessströmen möglich. Im H2020-Projekt CEMCAP wurden dazu unterschiedliche Technologien auch ökonomisch bewertet und verglichen [43]. Für das **Oxyfuel-Verfahren** werden CO₂-Reduktionskosten von 42,2 €/t CO₂ und für Investitionskosten von 127,8 €/t Klinker ausgewiesen. Für die **Aminwäsche** werden CO₂-Reduktionskosten von 80,2 €/t CO₂ und für Investitionskosten von 76,1 €/t Klinker ausgewiesen.

Die genannten Kosten beinhalten allerdings nur den jeweiligen Aufwand für die Abtrennung der CO₂-Emissionen aus der Zementproduktion. Je nach weiterer Verwendung (Carbon Capture and Utilisation, CCU), wie z.B. zur Herstellung von Kohlenwasserstoffen mit möglichst langer Nutzungsdauer (vgl. Olefine aus

²³ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

grünem Methanol (Methanol-to-Olefine)), oder Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) werden weitere Kosten für Verflüssigung, Transport und Speicherung zu berücksichtigen sein.

4.3.9.2 Betonrecycling

Zu dieser Maßnahme wurden die Information zu Kosten für die Aufbereitung von Altbeton aus [46] herangezogen. Diese Studie weist für die Smart Crusher Technologie Kapitalkosten von 1 €/t Beton aus. Diese Maßnahme führt zu einem um 28% reduzierten Bedarf an neu produziertem Zement. Unter der aus der Studie ableitbaren Annahme, dass aus einer Tonne Altbeton rund 60 Kilogramm nutzbarer Zement gewonnen werden können, belaufen sich die Investitionskosten für diese Option bis 2040 auf 35 Mio. Euro.

Tabelle 49: 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 <u>Zementindustrie</u>	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. Abbildung 41 zeigt die Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Steine & Erden, Glas für die Anwendungsbereiche Prozesswärme > 200°C und Erzeugungsprozess.

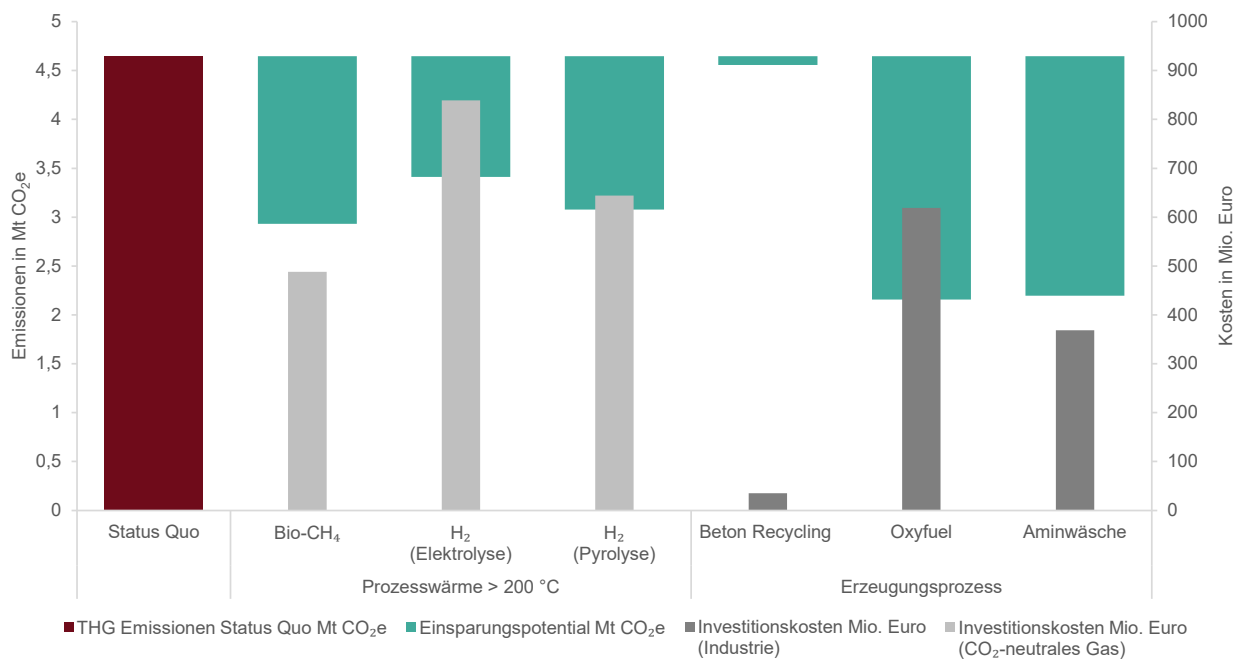


Abbildung 41: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Steine & Erden, Glas für die Anwendungsbereiche Prozesswärme > 200 °C und Erzeugungsprozess

4.3.10 Papier & Druck

Für die im Sektor *Papier & Druck* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 50 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 50: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Papier & Druck²⁴

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. Abbildung 42 zeigt die Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Papier und Druck.

²⁴ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

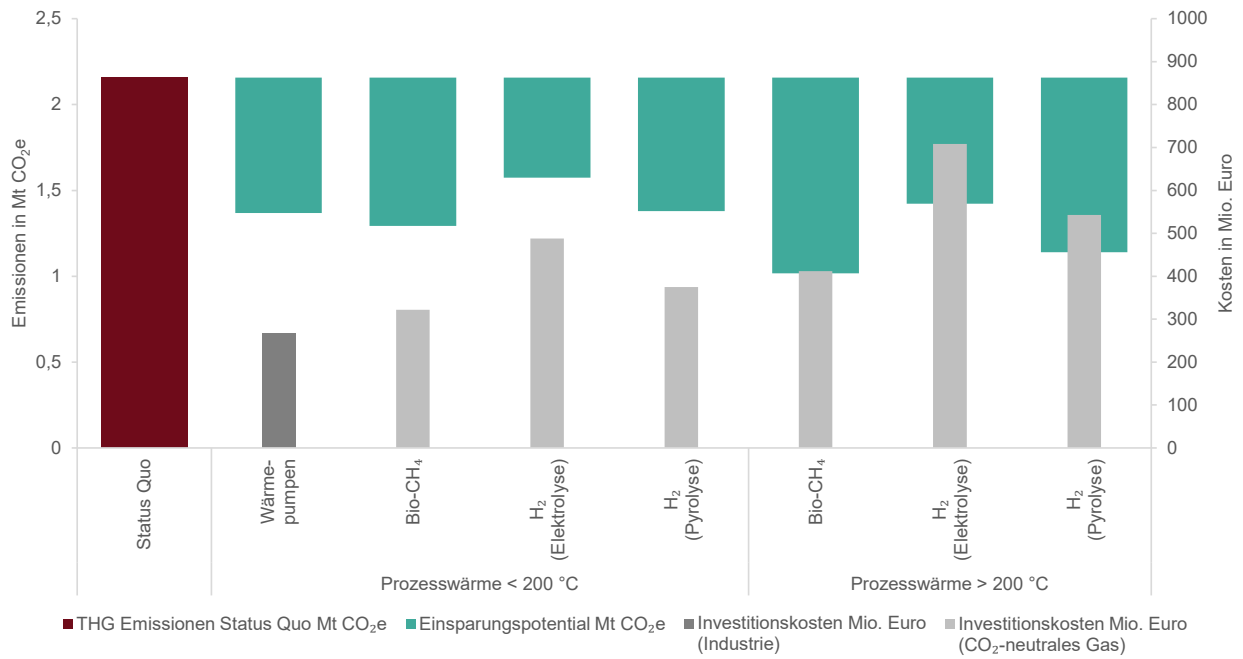


Abbildung 42: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten im Sektor Papier und Druck²⁵

²⁵ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.11 Nichteisen-Metallurgie

Für die im Sektor *Nichteisen-Metallurgie* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 51 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 51: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Nichteisen-Metallurgie²⁶

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	44
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	-
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	13
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	158
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	10
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	122
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	9
		Prozesswärme < 200°C	-
		Prozesswärme > 200 °C	92

²⁶ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.12 Textil und Leder

Für die im Sektor *Textil und Leder* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 52 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 52: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Textil und Leder²⁷

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	10
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	25
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	3
		Prozesswärme < 200°C	45
		Prozesswärme > 200 °C	-
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	2
		Prozesswärme < 200°C	35
		Prozesswärme > 200 °C	-
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	2
		Prozesswärme < 200°C	30
		Prozesswärme > 200 °C	-

²⁷ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.3.13 Sonstiger Produzierender Bereich

Für die im Sektor *Sonstiger Produzierender Bereich* zur Anwendung kommenden Querschnittstechnologien ergeben sich gemäß den in Abschnitt 4.2 erläuterten spezifischen Technologiekosten die in Tabelle 53 dargestellten Gesamtinvestitionen bis 2040.

Tabelle 53: Investitionskosten für Querschnittstechnologien im Sektor Sonstiger Produzierender Bereich²⁸

Kosten der Dekarbonisierung – energiebedingte Emissionen			
Dekarbonisierungsstrategie	Technologie	Anwendungsbereich	Investitionskosten (Mio. Euro)
Elektrifizierung	Einsatz von Wärmepumpen	Raumheizung und Klimaanlage	69
	Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen	Prozesswärme < 200°C	19
CO ₂ -neutrales Gas	H ₂ (aus Elektrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	21
		Prozesswärme < 200°C	35
		Prozesswärme > 200 °C	11
	H ₂ (aus Methanpyrolyse)	Raumheizung und Klimaanlage	16
		Prozesswärme < 200°C	27
		Prozesswärme > 200 °C	8
	Bio-CH ₄	Raumheizung und Klimaanlage	14
		Prozesswärme < 200°C	23
		Prozesswärme > 200 °C	6

²⁸ Für den Anwendungsbereich Raumheizung und Klimaanlage sind die ausgewiesenen Investitionskosten aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Annahmen nicht direkt miteinander vergleichbar.

4.4 Zusammenfassende Darstellung der Investitionskosten

Betrachtet man die nicht-energieintensiven Sektoren (gesamte Industrie abzüglich Eisen- & Stahlerzeugung, Steine & Erden, Glas sowie Papier und Druck), 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, sie 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 Zusatzoptionen zur Reduktion des fossilen Feedstocks in der chemischen Industrie lösen weitere Investitionen von 2,6 Mrd. Euro aus.

Abbildung 43 zeigt die Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten in den nicht-energieintensiven Sektoren.



Abbildung 43: Zusammenfassung der CO₂-Reduktionspotentiale und Investitionskosten in den nicht-energieintensiven Sektoren (Kosten in Mio. €)

Die folgende Abbildung 44 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.

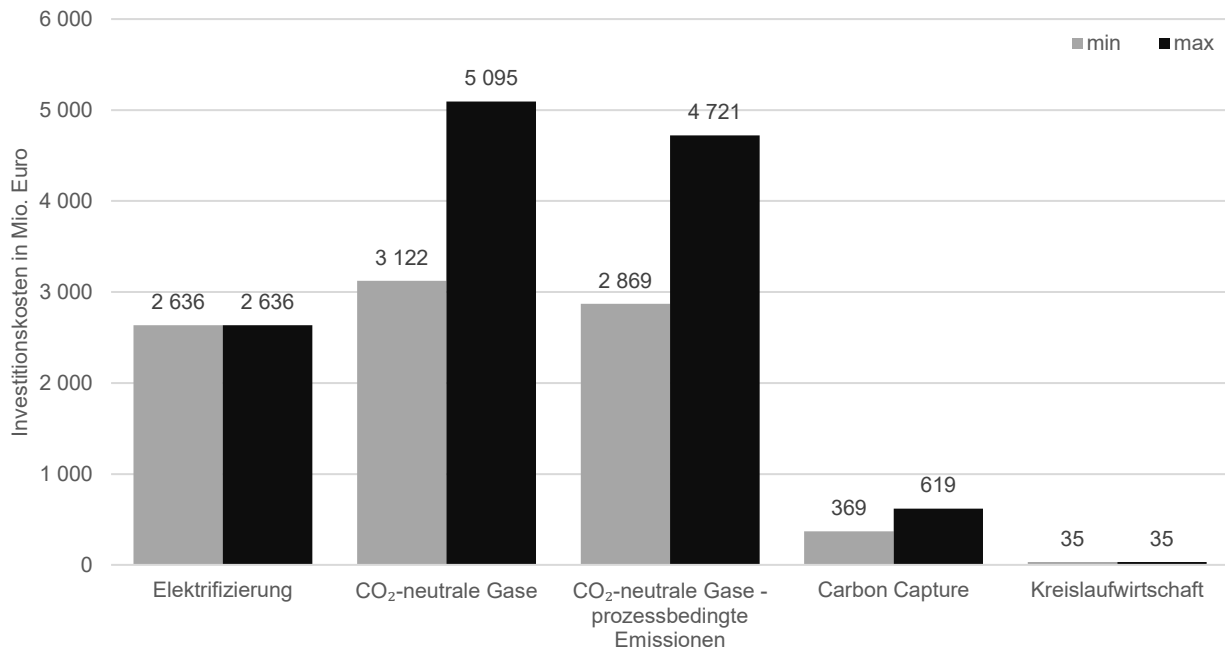


Abbildung 44: Wertebereiche der Investitionskosten je Dekarbonisierungsstrategie

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 Minimalwerte jeweils durch die Variante basierend auf Bio-CH₄ bedingt, die Maximalwerte 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 45 in niedrigerer Auflösung dargestellt.

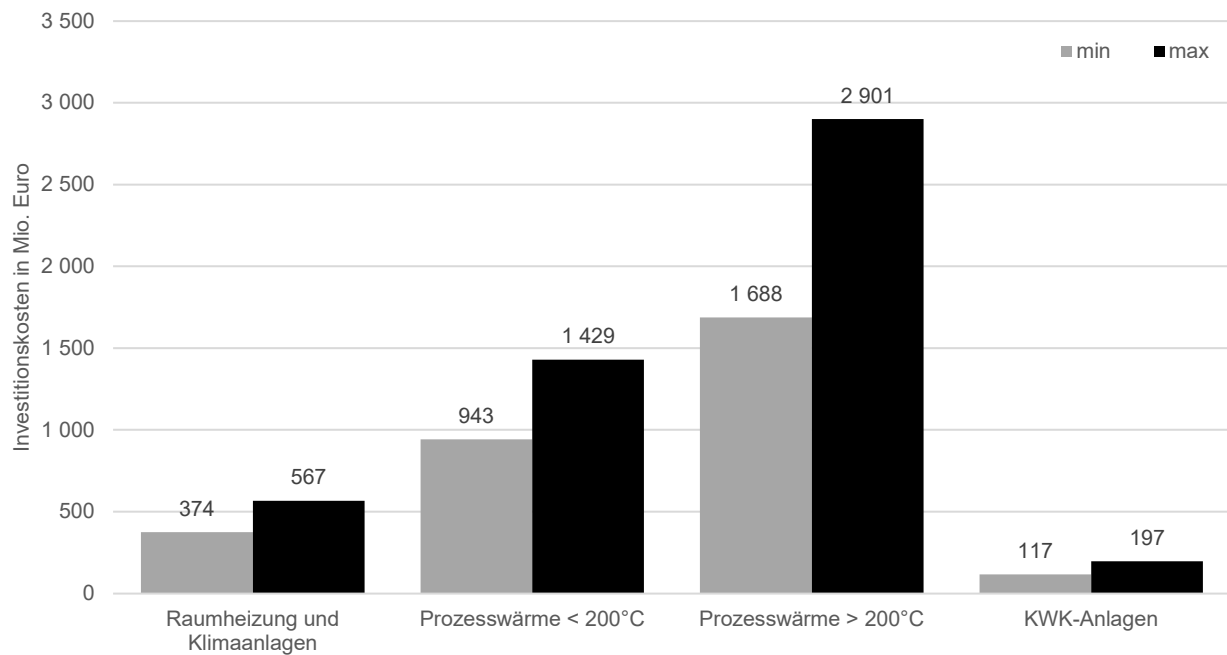


Abbildung 45: Wertebereiche der Investitionskosten für Dekarbonisierungsstrategie CO₂-neutrale Gase

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.

4.5 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 [52] 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 54).

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

Tabelle 54: Policy-Säulen für eine treibhausgasneutrale Zukunft

	Preissignale für CO₂	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

5 ZUSAMMENFASSUNG

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 Bruttoinlandsverbrauchs. 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 dem, was auch durch inländische Produktion anfallen würde. 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 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 ($> 200^{\circ}\text{C}$) vorangetrieben werden. Aufgrund des Temperaturniveaus werden auch hier CO_2 -neutrale Gase zum Einsatz kommen müssen, welche eine Verminderung der Treibhausgase um 1,4 bis 1,9 Mt CO_2e ermöglichen können. Aufgrund notwendiger Vorketten bei der Erzeugung der CO_2 -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 CO_2 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 CO_2e eingespart werden, sofern eine langfristige Bindung des abgetrennten CO_2 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 das 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).

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] Europäische Kommission, „Eine neue Industriestrategie für Europa,“ COM(2020) 102 final, Brüssel.
- [14] M. Sommer, F. Sinabell und G. Streicher, „Ein Ausblick auf die Treibhausgasemissionen in Österreich 2021 und 2022,“ WIFO Working papers 628/2021, Wien, 2021.
- [15] Statistik Austria, „Input-Output-Tabelle 2017,“ Statistik Austria, Wien, 2021.
- [16] Statistik Austria, „Luftemissionsrechnung 2018,“ 2020. [Online]. Available: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/umwelt/luftemissionsrechnung/.
- [17] WKO Bundessparte Industrie & Industriellenvereinigung im Dialog mit Austrian Energy Agency und AIT Austrian Institute of Technology, „Im Wettbewerb um die Zukunft - Klimapolitische Perspektiven für den Beitrag der österreichischen Industrie zur Treibhausgasneutralität,“ Wien, 2019.

- [18] N. a. J. G. Yamano, „CO2 emissions embodied in international trade and domestic final demand: Methodology and results using the OECD Inter-Country Input-Output Database,“ *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, Bd. No. 2020/11, 2020.
- [19] Umweltbundesamt, „Klimaschutzbericht 2020,“ Wien, 2020.
- [20] K. W. Steininger, P. Munoz, J. Karstensen, G. P. Peters, R. Strohmaier und E. Velázquez, „Austria's consumption-based greenhouse gas emissions: Identifying sectoral sources and destinations,“ *Global Environmental Change*, pp. 226-242, 2018.
- [21] B. B. N. W. A. J. G. F. R. Windsperger, „Life cycle based modelling of greenhouse gas emissions,“ Institut für Industrielle Ökologie, St. Pölten, 2017.
- [22] 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].
- [23] Umweltbundesamt, „Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger,“ [Online]. Available: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>. [Zugriff am 06 2021].
- [24] Statista, „Die größten Bauunternehmen in Österreich nach Nettoumsatz im Jahr 2019,“ 2020. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/421662/umfrage/groesste-oesterreichische-bauunternehmen-nach-umsatz/>.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] AMAG Austria Metall AG, 2021. [Online]. Available: <https://www.amag-al4u.com/nachhaltigkeit/engagierter-umweltschutz.html>. [Zugriff am 28 07 2021].
- [28] R. Geyer, S. Knöttner, C. Diendorfer und G. Drexler-Schmid, „IndustRiES - Energieinfrastruktur für 100 % Erneuerbare Energie in der Industrie,“ Wien, 2019.
- [29] Wirtschaftskammer Österreich, „Advantage Austria Deutschland,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.advantageaustria.org/de/zentral/branchen/metalle-und-metallverarbeitung/zahlen-und-fakten/zahlen-und-fakten.de.html>. [Zugriff am 28 07 2021].
- [30] Umweltbundesamt, „Szenario erneuerbare Energie 2030 und 2050– Zusammenfassung (REP-0576),“ Wien, 2016.
- [31] McKinsey, „Harnessing momentum for electrification in heavy machinery and equipment,“ 9 April 2019. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/harnessing-momentum-for-electrification-in-heavy-machinery-and-equipment>. [Zugriff am June 2021].
- [32] M. S. B. W. Andreas Windsperger, „Perspektiven der Decarbonisierung für die chemische Industrie in Österreich,“ Institut für industrielle Ökologie, St. Pölten, 2018.
- [33] F. DECHEMA, „Roadmap Chemie 2050, Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland,“ 2019.

- [34] R. Anantharaman, D. Berstad, E. De Lena, C. Fu, S. Gardasdottir, 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] V. Sousa und J. A. Bogas, „Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production,“ *Journal of Cleaner Production*, 2021.
- [38] Europäische Kommission, „Going climate neutral by 2050, A strategic long-term vision, a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy,“ 2019.
- [39] McKinsey & Company, „Net-Zero Europa, Decarbonization pathways and socioeconomic implications,“ 2020.
- [40] Agora Energiewende, „Klimaneutrale Industrie Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement,“ 2019.
- [41] The Boston Consulting Group; Prognos, „Klimapfade für Deutschland,“ 2018.
- [42] Material Economics, „Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry,“ 2019.
- [43] CEMCAP, „CEMCAP comparative techno-economic analysis of CO2 capture in cement plants,“ 2019.
- [44] A. T. W. AIT, „EnPro – Erneuerbare Prozesswärme, Integration von Solarthermie und Wärmepumpen in industrielle Prozesse, Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds,“ 2017.
- [45] IEA, „IEA G20 Hydrogen report: Assumptions,“ 2020.
- [46] Universiteit Leiden; TU Delft, „Closed-loop Economy: Case of Concrete in the Netherlands,“ 2015.
- [47] H. Böhm, A. Zauner, D. C. Rosenfeld und R. Tichler, „Projecting cost development for future large-scale power-to-gas implementations by scaling effects,“ *Applied Energy* 264, p. 114780, 2020.
- [48] H. Böhm, S. Goers und A. Zauner, „Estimating future costs of power-to-gas – a component-based approach for technological learning,“ *International Journal of Hydrogen Energy* 44, pp. 30789-30805, 2019.
- [49] Navigant, „Gas for Climate. The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system,“ 2019.
- [50] 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.
- [51] C. Schneider, S. Samadi, G. Holtz, G. Kobiela, S. Lechtenböhmer und W. Witecka, „Klimaneutrale Industrie: Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement,“ Berlin, 2019.
- [52] 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