

Potenziale & Strategien zur Dekarbonisierung der Industrie

WETTLAUF ZUR zero-emission INDUSTRIE

VERA FAHRNBERGER | PHILIP HAHN | ALAN VOLDRICH

YEP – GRUPPE: INDUSTRIELLE PROZESSE (JAHR 2021)

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
<i>Der Handlungsdruck steigt: Ökologisch, ökonomisch und sozial.....</i>	<i>1</i>
<i>Die Bedeutung der Industrie in Europa und in Österreich.....</i>	<i>5</i>
Emissionen	5
Energiebedarf	7
Wertschöpfung	9
Beschleunigung der Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität	10
<i>Das nächste Jahrzehnt im Sinne der grünen Wirtschaft für sich entscheiden.....</i>	<i>11</i>
Strategien und Hebel für die Dekarbonisierung der Industrie	12
<i>Strategien und Technologieoptionen.....</i>	<i>12</i>
<i>Quellen der industriellen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen)</i>	<i>12</i>
<i>Strategien und Technologieoptionen zur Dekarbonisierung der Industrie</i>	<i>13</i>
1. Strategie: Direkte und indirekte Nutzung von Erneuerbarem Strom	14
2. Strategie: Kreislaufwirtschaft etablieren, Effizienz verbessern	14
3. Strategie: Kohlenstoffkreislauf schließen.....	14
Elektrifizierung.....	15
Grüner Wasserstoff – Wasserstoff aus erneuerbaren Energien	16
CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS).....	17
Kreislaufwirtschaft (Circular Economy).....	18
Erhöhung der Materialeffizienz	20
Materialsubstitution	21
Steigerung der Energieeffizienz	22
Einsatz von Biomasse.....	22
Handlungsfelder zur Dekarbonisierung der österreichischen Industrie	23
Best Practice Beispiele	26
<i>NEFI – New Energy for Industry</i>	<i>26</i>
<i>OXYSTEEL: Energieeffizienz und Demand Side Management in der Stahlindustrie</i>	<i>26</i>
<i>Gmunden High Temperature Link.....</i>	<i>27</i>
<i>Industry4Redispatch: Industrieflexibilität als Stabilisator für das Stromnetz</i>	<i>28</i>
<i>SolarAutomotive: Erneuerbare Energie für die Automobilindustrie</i>	<i>28</i>
<i>TORETech - Energieeffizienz in der Ziegelproduktion</i>	<i>30</i>
<i>Green Foundry 4.0. "envloTcast" – Grüne Gießerei der Zukunft.....</i>	<i>31</i>
Literaturverzeichnis	32

Einleitung

Die globale Jahrestemperatur war 2019 um 1,1°C wärmer als der Durchschnitt der Jahre 1850-1900, der zur Darstellung des vorindustriellen Niveaus herangezogen wird. Damit ist das Jahr 2019 das zweitwärmste Jahr seit Beginn der Aufzeichnungen. Nur das Jahr 2016 war wärmer aufgrund eines sehr starken El-Niño-Ereignisses, das im mittleren und östlichen Pazifik auftritt und Auswirkungen auf die Erwärmung sowie langfristige Umweltauswirkungen und den Klimawandel hat¹. Der Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre ist eine der Hauptursachen des Klimawandels und trägt zum Anstieg der jährlichen globalen Temperaturen bei. Insbesondere die Emissionen von fossilem Kohlendioxid (CO₂) haben in den letzten zwei Jahrhunderten stetig zugenommen, mit leichten Unterbrechungen aufgrund von wirtschaftlichen Abschwüngen während Rezessionen, Ölpreisschocks und der COVID-19-Pandemie. Im Zeitraum von 2009-2018, für den vollständige Daten vorliegen, beliefen sich die weltweiten Emissionen von fossilem CO₂ auf durchschnittlich 34,7 ± 1,8 GtCO₂ (Milliarden Tonnen) pro Jahr und stiegen mit einer durchschnittlichen Rate von 0,9% pro Jahr an, um 2018 den Rekordwert von 36,6 GtCO₂ zu erreichen².

Der Handlungsdruck steigt: Ökologisch, ökonomisch und sozial

Der Handlungsdruck steigt. Das Pariser Klimaabkommen, die EU-Klimaziele und #mission2030 sind nur wichtige Beispiele des grünen Wandels, und die Industrie kann einen essentialen Beitrag zur Errichtung dieser Ziele leisten. Für die österreichische Schwerindustrie ist der grünen Wandel eine Chance als globaler Innovationstreiber voranzugehen, um ihren Wettbewerbsvorteil zu sichern.

¹ World Meteorological Organization. (2020, January 15). WMO confirms 2019 as second hottest year on record [Press release]. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-2019-second-hottest-year-record>

² World Meteorological Organization. (2020). *WMO statement on the state of the global climate in 2019*. World Meteorological Organization (WMO).

Der Handlungsdruck steigt auch im Wirtschaftssektor. Die Stein- und keramische Industrie³, zum Beispiel, hatte einen Umsatz in 2018 von 3,53 Milliarden Euro (plus 4,6 Prozent) und beschäftigt 13.113 Beschäftigte (+ 2,8 Prozent). Trotz des derzeitigen Umsatzplus wird es schwierig dieses zu halten, ohne in die Zukunft der eigenen Ökologisierung zu investieren. Dieser Industriesektor besteht aus der Feuerfestindustrie, Transportbetonindustrie, Beton- und Fertigteilindustrie, Ziegel- und Fertigteilindustrie, Zementindustrie, Schotterindustrie, Putz- und Mörtelindustrie, Sand- und Kiesindustrie. Der Kostentreiber Logistik-, Energie-, und Personalkosten drücken auf das Ergebnis. Allein die Transportkosten stiegen bis zu 20 Prozent. [...] Als energieintensive Baustoffindustrie leiden die Produzenten vor allem unter den Preiserhöhungen von Strom und Gas. Die Gaspreise sind seit 2017 um 50 Prozent gestiegen, die CO₂-Preise haben sich vervierfacht. Die Stein- und keramische Industrie ist eine energieintensive Industrie und die Prozessemissionen der Produktion können nicht völlig verhindert werden⁴. Im Rahmen eines Forschungsprojekts mit dem Wegener Center für Klima und globalen Wandel an der Karl-Franzens-Universität Graz wird derzeit u. a. den Fragen nachgegangen, wie einzelne Schritte innerhalb des gesamten Lebenszyklus eines Baustoffs optimiert und wie die Wechselwirkungen zwischen Produktion, Transport und Verwendung besser aufeinander abgestimmt werden können.⁵

Die Zivilgesellschaft kommt in Bewegung. Zum Beispiel, in der Form von Fridays for Future die von der bekannten schwedischen Aktivistin Greta Thunberg inspiriert wurde. Greta Thunberg fing alleine als Aktivistin vor Parlamentsgebäude in Stockholm auf die Klimakrise aufmerksam zu machen. Es folgten Reden bei der Weltklimakonferenz in Katowice (Polen) Ende 2018 und Auftritte beim Weltwirtschaftsforum in Davos 2019. In Österreich haben die Bewegung Friday for Future und die Aktion #dasstreikendeklassenzimmer breite öffentliche Aufmerksamkeit und Zuspruch gewonnen und den Handlungsdruck auf die Politik erhöht.

³ Umsatzplus bei stein- und keramischer Industrie. (2019, März 19). handwerkundbau.at. Abrufbar unter: <https://www.handwerkundbau.at/betrieb/umsatzplus-bei-stein-und-keramischer-industrie-9862>

⁴ Umsatzplus bei stein- und keramischer Industrie. (2019, März 19). handwerkundbau.at. Abrufbar unter: <https://www.handwerkundbau.at/betrieb/umsatzplus-bei-stein-und-keramischer-industrie-9862>

⁵ Umsatzplus bei stein- und keramischer Industrie. (2019, März 19). handwerkundbau.at. Abrufbar unter: <https://www.handwerkundbau.at/betrieb/umsatzplus-bei-stein-und-keramischer-industrie-9862>

Unter diesen schwierigen Umständen führte die Europäische Kommission den Europäischen Grünen Deal ein. Ein grüner Wirtschaftsimpuls mit dem Ziel, dass die EU bis zur Mitte dieses Jahrhunderts der erste Handelsblock sein wird, der kohlenstoffneutral ist.

Der europäische Green Deal - "Die Kosten des Übergangs werden hoch sein, aber die Kosten des Nicht-Handelns werden viel höher sein".

Ursula von der Leyen, Präsidentin der Europäischen Kommission⁶.

Die Emissionsreduktionsbestrebungen der EU sind eine Investition in eine emissionsfreie Zukunft, die beispiellos ist, aber Untätigkeit wird beispiellose Folgen haben. Nichtsdestotrotz sind die Kosten der Bekämpfung der globalen Erwärmung unverhältnismäßig hoch. Das ist das Verhandlungsproblem hinter den Kosten einer grünen Wirtschaft: Wenn die Emissionen reduziert werden sollen, würden die armen Länder Vorteile erhalten, während die reichen Länder den größten Teil der Kosten tragen würden (Schelling, 1997)⁷. Trotzdem muss die EU beim Übergang zu einer grünen Wirtschaft weltweit die Führung übernehmen und andere internationale Partner davon überzeugen, das gleiche Ziel zu verfolgen. Andernfalls kann das Risiko einer Verlagerung von CO₂-Emissionen die von der EU unternommenen Anstrengungen gefährden. Die Unternehmen werden einfach in einem Land produzieren, in dem die Umweltvorschriften und CO₂-Reduktionsziele weniger streng sind als in der EU. Das Produkt kann zu geringeren Kosten als in der EU hergestellt werden, weil beispielsweise externe Umwelteffekte nicht in den Preis des Produkts einfließen. Die Reduzierung der globalen Emissionen ist also eine gemeinsame Anstrengung⁸.

Die EU strebt bis 2050 Netto-Null-Treibhausgasemissionen an. Das bedeutet, dass die Emissionen, die bis 2050 nicht eliminiert werden können, zum Beispiel durch natürliche Kohlen-

⁶ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6715

⁷ Schelling, T. C. (1997). The cost of combating global warming: Facing the tradeoffs. Foreign Affairs, 8-14.

⁸ https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf

stoffsinken wie Wälder und Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung beseitigt werden⁹. Die Maßnahmen und Optionen, die zur Erreichung der Klimaneutralität eingesetzt werden, müssen jedoch über verschiedene Dimensionen hinweg betrachtet werden, um durchführbar zu sein.

⁹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6723

Die Bedeutung der Industrie in Europa und in Österreich

Wachstum, Wohlstand und Arbeitsplätze können in Europa nur durch eine starke industrielle Basis gewährleistet werden. Ziel der europäischen Politik ist es daher, die Reindustrialisierung in den Mitgliedsländern zu forcieren und den Industriestandort Europa langfristig abzusichern. Grüne Technologien für eine CO₂-arme Produktion werden weltweit zunehmend nachgefragt. Innovationen für klimaschonende Produktionsweisen tragen dazu bei, den Technologievorsprung und die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie zu erhöhen. Gleichzeitig verringert der Einsatz erneuerbarer Energien die Abhängigkeit heimischer Unternehmen vom Import fossiler Energieträger¹⁰.

Zur Realisierung der europäischen Klimaschutzziele muss der Industriesektor die prozessbedingten Treibhausgasemissionen stark reduzieren. Obwohl in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt wurden, sind für die weitgehende Dekarbonisierung der Industrie weitere, teils radikale Innovationen und der Aufbau neuer Infrastrukturen erforderlich. Forschung und Industrie in Österreich entwickeln und testen laufend neue Konzepte und sogenannte „Breakthrough Technologies“ für die CO₂-arme Produktion. In einigen Sektoren (z. B. in der Eisen- und Stahlindustrie) zählen österreichische Industriebetriebe zu den Vorreitern für klimaschonende Produktionsverfahren. Die Energieeffizienz in industriellen Prozessen wird laufend gesteigert. Ziel ist es zunehmend, erneuerbare Energie zu integrieren und den Energiebedarf von industriellen Anlagen mit der Energieversorgung aus fluktuierenden, erneuerbaren Quellen abzustimmen¹¹.

Emissionen

Die Treibhausgas-Emissionen in Österreich sind von 2018 auf 2019 um 1,5 % gestiegen und liegen bei 79,8 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent, so die Treibhausgas-Bilanz des Umweltbundesamtes für das Jahr 2019. Insgesamt seit 1990 sind die Emissionen nur geringfügig zurückge-

^{10, 12} Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Klima- und Energiefonds (Hrsg.): energy innovation austria. Ausgabe 3/2019. Seite 3. Aufrufbar unter <https://www.energy-innovation-austria.at/issue/eia-2019-03-de/>

gangen, wobei der Rückgang stärker im Non-ETS Bereich war. Für 2020 gehen die ExpertInnen des Umweltbundesamts von einer – bedingt durch die Maßnahmen zur Bekämpfung der Coronapandemie – deutlichen Reduktion der CO₂-Emissionen um ca. minus 9 % aus¹².

Treibhausgas-Bilanz 2019 Österreichs nach Sektoren

Der Überblick der Sektoren Energie und Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Abfallwirtschaft und Fluorierte Gase zeigt ein einstiges Bild (siehe Abbildung 1). Der Sektor Energie und Industrie ist im Jahr 2019 mit rund 35 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent der größte Emittent an Treibhausgasen in Österreich. Gegenüber dem Jahr 2018 sind die Emissionen um circa 3,1 % (1,0 Mio. Tonne) gestiegen. Immerhin konnte der Sektor Energie und Industrie die Treibhausgasemissionen um minus 3,9 % seit 1990 senken.

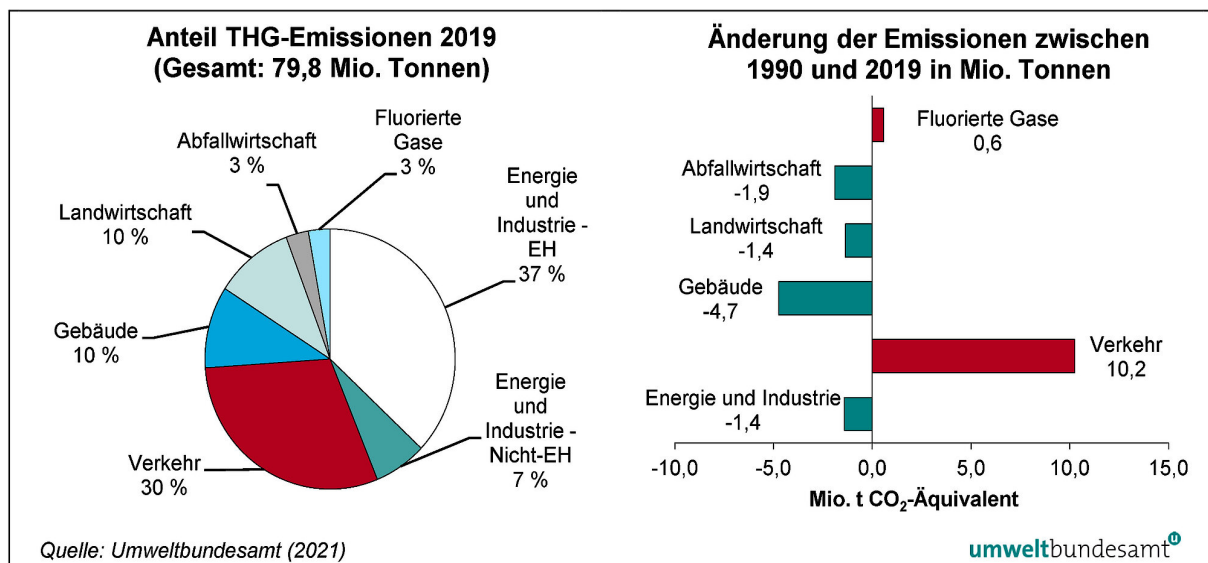


Abbildung 1: Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren¹³

Emissionshandelsbereich

Die Emissionshandelsbetriebe verursachten im Jahr 2019 Treibhausgas-Emissionen im Ausmaß von circa 29,6 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent (Energie: 9,2 Mio. Tonnen, Industrie: 20,3 Mio. Tonnen). Das sind um circa 4,1 % (1,2 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent) mehr als im Jahr 2018. Die Emissionen der Industriebetriebe im Emissionshandel sind um circa 5,1 % (1,0 Mio. Tonnen) gestiegen. Dies ist vor allem auf die höhere Produktion (nach der Revision eines

¹² Umweltbundesamt (19.01.2021). Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sektoren>

¹³ Umweltbundesamt (19.01.2021). Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sektoren>

Hochofens 2018) in der Eisen- und Stahlindustrie zurückzuführen. Die Emissionen der Energiebetriebe (Strom- und Wärmeproduktion in großen Anlagen sowie Raffinerie und Erdgasverdichterstationen) weisen ebenfalls einen Emissionsanstieg auf (2,0 % bzw. 0,2 Mio. Tonnen)¹⁴.

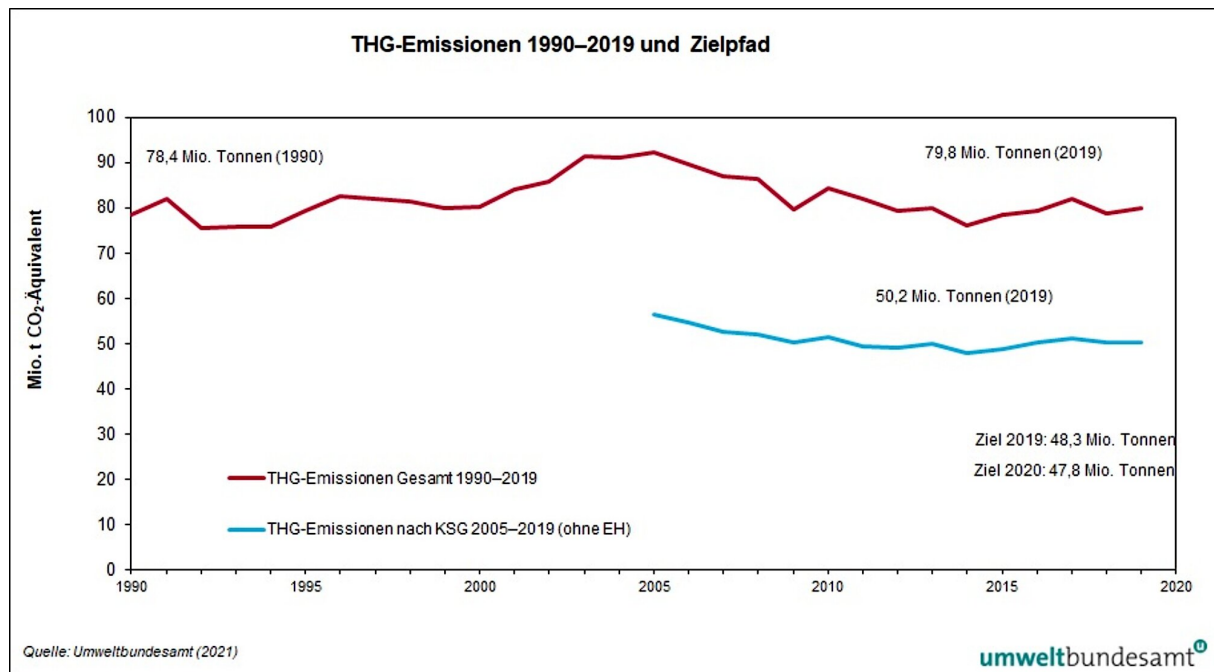


Abbildung 2: THG-Emissionen 1990-2019 und Zielpfad¹⁵

Wesentlich für den Anstieg der Emissionen bei den Energiebetrieben im Jahr 2019 war die höhere Stromproduktion aus Großgaskraftwerken. Insgesamt stieg die inländische Stromerzeugung im Jahr 2019 um 10,2 %. Der Inlandsstromverbrauch blieb im Jahr 2019 mit insgesamt 74 TWh nahezu unverändert. Stromimporte deckten 2019 rund 4 % des Verbrauchs ab.

Energiebedarf

Die österreichische Energieversorgung basiert auf einem ausgewogenen Energieträger-Mix. Von besonderer Bedeutung ist der sehr hohe Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoinlandsverbrauch (siehe Abbildung 3).

¹⁴ Umweltbundesamt (19.01.2021). Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sektoren>

¹⁵ Umweltbundesamt (19.01.2021). Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sektoren>

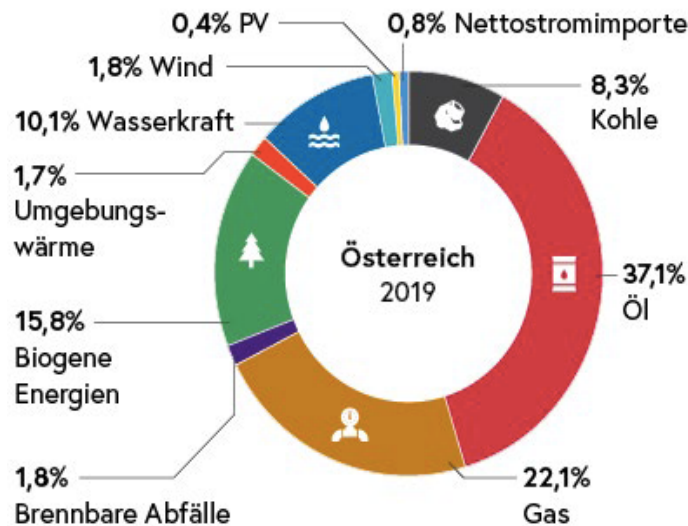


Abbildung 3: Bruttoinlandsverbrauch im Vergleich - Anteile der Energieträger in Österreich¹⁶

Der Energetische Endverbrauch in Österreich zeigt das Potential und die Notwendigkeit für Strategien zur Dekarbonisierung der Industrie (siehe Abbildung 4).

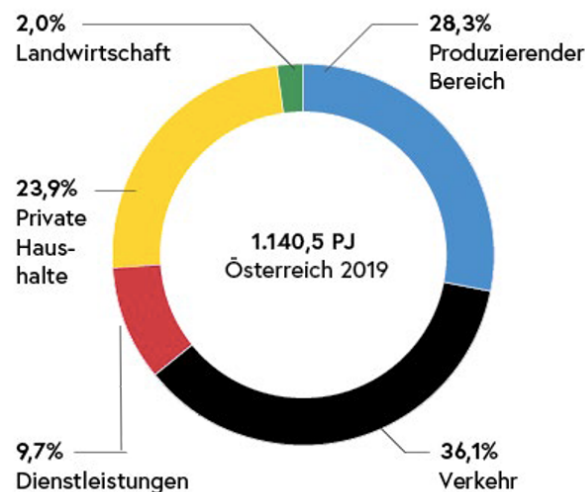


Abbildung 4: Struktur des energetischen Endverbrauches in Österreich nach wirtschaftlichen Sektoren in Prozent¹⁷

Die Struktur der heimischen Energieerzeugung zeigt eine deutliche Reduktion von fossilen Energieträgern und ein starkes Wachstum bei erneuerbaren Energien (siehe Abbildung 5).

¹⁶ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2020). Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten. Seite 12f. Abgerufen unter: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>

¹⁷ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2020). Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten. Seite 15f. Abgerufen unter: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>

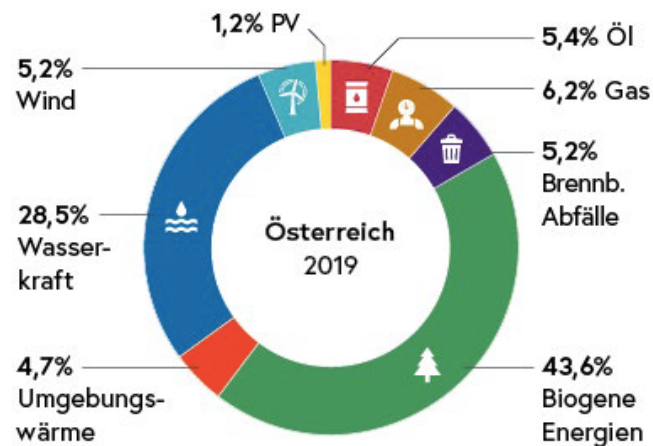


Abbildung 5: Primärenergieerzeugung im Vergleich - Anteile der Energieträger in Österreich¹⁸

Wertschöpfung

Bei der produzierenden Industrie werden die Treibhausgas-Emissionen aus dem Brennstoffverbrauch der Industrie und dem produzierenden Gewerbe sowie Emissionen aus industriellen Prozessen berücksichtigt. Sie umfassen ebenfalls die Emissionen aus mobilen Maschinen (z. B. Baumaschinen). Die Treibhausgas-Emissionen der Produzierenden Industrie sind zwischen 1990 und 2014 um 12 % auf 24,6 Mio. Tonnen (plus 2,7 Mio. Tonnen) angestiegen. Von 2013 auf 2014 sind die Emissionen um 0,5 Mio. Tonnen bzw. 2 % zurückgegangen. Zu den emissionsintensivsten Industrien zählen in Österreich die Eisen- und Stahlproduktion und die Mineralverarbeitende Industrie. Der wichtigste Einflussfaktor für den Anstieg der Emissionen ist die Steigerung der Wertschöpfung in den betroffenen Branchen.

Die Wertschöpfung ist über die gesamte Zeitreihe kontinuierlich gestiegen und erreichte 2008 das Maximum (60 % über dem Wert von 1990). Bedingt durch die Wirtschafts- und Finanzkrise ist die Wertschöpfung danach gesunken und lag im Jahr 2009 gegenüber dem Jahr 1990 immer noch um 39 % höher. 2013 ist die Wertschöpfung im Vergleich zu 2009 wieder angestiegen und lag um 50 % über 1990. In den Jahren 2005 bis 2008 ist es zu einer teilweisen Entkoppelung von Wertschöpfung bzw. Produktionsmengen und Emissionen gekommen. Diese ist im Wesentlichen auf den zunehmenden Einsatz kohlenstoffärmerer Brennstoffe (v.

¹⁸ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2020). Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten. Seite 10f. Abgerufen unter: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>

a. Erdgas) und erneuerbarer Energieträger sowie auf Effizienzsteigerungen zurückzuführen. 2009 sind aufgrund des krisenbedingten Rückgangs der Produktion energieintensiver Güter (Eisen, Stahl, Zement, etc.) sowohl Wertschöpfung als auch Emissionen zurückgegangen, in den Folgejahren 2010–2014 waren die Emissionen zwar wieder deutlich höher, blieben aber doch unter dem Niveau der Jahre 2005–2008.

Wichtigstes Instrument zur Zielerreichung 2020 bei der Produzierenden Industrie ist der Emissionshandel. Unternehmen, die vom Emissionshandel erfasst sind EH-Betriebe haben im Jahr 2014 rund 19,9 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent, und damit gleich viel wie im Vorjahr, gemeldet. Der Anteil des Nicht-EH-Bereichs lag im Jahr 2014 bei 4,7 Mio. Tonnen bzw. 19 % dieses Sektors. Für das Jahr 2014 ist eine Gratis-Zuteilung von Emissionszertifikaten im Ausmaß von 18,1 Mio. Tonnen erfolgt, die Emissionen der EH-Anlagen lagen damit um 1,9 Mio. Tonnen über der Zuteilung.¹⁹

Beschleunigung der Maßnahmen zur Erreichung der Klimaneutralität

Die verschiedenen Dimensionen werden als "vollständiges System" dargestellt, das alle Aspekte berücksichtigt, die vom grünen Wirtschaftswandel betroffen sind. Das Gesamtsystem setzt sich aus sechs Dimensionen zusammen. Diese sind: Nutzen für die Umwelt; technologischer Nutzen; wirtschaftlicher und finanzieller Nutzen; soziale und kulturelle Aspekte; institutionelle Machbarkeit; geophysikalischer Nutzen. Ein Zusammenspiel der verschiedenen Sphären schafft Räume für überspringende Technologien und innovative Ideen.

Die sechs Dimensionen im Gesamtsystem sind Indikatoren, die vor der Wahl einer Methode zur Erreichung der Klimaneutralität berücksichtigt werden müssen. Mit anderen Worten: Bevor eine Minderungs-, Anpassungs- oder Resilienzmethode gewählt wird, um Klimaneutralität zu erreichen, muss sie entlang der sechs Dimensionen untersucht werden. Darüber hinaus muss jede Dimension separat beschleunigt werden, um einen Spill-Over-Effekt und eine eigene Dynamik zu erzeugen.

¹⁹ Anderl, M., Gössl, M., Kuschel, V., Haider, S., et al. (2016). Klimaschutzbericht 2016. Wien: Umweltbundesamt.

Bei der Umweltdimension (ökologischer Nutzen) wird zum Beispiel geprüft, ob für den Übergang ausreichende Ressourcen im natürlichen System zur Verfügung stehen. Die technologische Dimension (technologische Nützlichkeit) muss bewerten, inwieweit die Technologie zur Beschleunigung des Übergangs zur grünen Wirtschaft entwickelt und verfügbar ist. Die wirtschaftliche und finanzielle Dimension (wirtschaftlicher und finanzieller Nutzen) befasst sich mit den wirtschaftlichen Auswirkungen und der Frage, ob die Option finanziell abbildbar ist. Die soziale und kulturelle Dimension (soziale und kulturelle Aspekte) konzentriert sich auf die Auswirkungen auf das menschliche Verhalten und die Gesundheit. Die institutionelle Dimension (institutionelle Machbarkeit) befasst sich mit der institutionellen und politischen Unterstützung, die für den Übergang zur grünen Wirtschaft erforderlich ist. Die geophysikalische Dimension (geophysikalische Nutzbarkeit) analysiert, ob die Landschaft und ihre physischen Bedingungen für die Minderungs-, Anpassungs- oder Resilienzoptionen geeignet sind.

Das nächste Jahrzehnt im Sinne der grünen Wirtschaft für sich entscheiden

1. Aufbau einer sektorübergreifenden Zusammenarbeit, um die „Green Acceleration“ (den grünen Wirtschaftswandel beschreiben wir als „Green Acceleration“) in Gang zu setzen;
 - 1.1. Sektor übergreifende Zusammenarbeit - Investitionen in Forschung und Entwicklung zur Förderung des Übergangs zur grünen Wirtschaft und adaptiver Lösungen;
2. Entwicklung interdisziplinärer Wege, um angemessene Lösungen zu finden
 - 2.1. Interdisziplinäre Wege, um angemessene Lösungen zu finden, wie der Schutz natürlicher Kohlenstoffsinken (z.B. Wälder, Ozeane, Böden) und die Reduzierung von Treibhausgasemissionen;
3. Lösungen mit dem "Gesamtsystem" in Einklang bringen;
 - 3.1. Testen der Lösungen im "Gesamtsystem", um die technologischen und verhaltensbezogenen Lösungen mit den Entwicklungszielen des Landes in Einklang zu bringen;
4. Bündelung der transnationalen Bemühungen zur Unterstützung der Green Acceleration;
 - 4.1. Suche und Beteiligung an der transnationalen Unterstützung durch die Erkundung und Schaffung lokaler und globaler Partnerschaften;
5. Die transnationalen Bemühungen der Green Acceleration und der Klimaneutralität widmen

Ein Engagement für die Diversifizierung des Energiemix mit einem effektiven Anteil erneuerbarer Energiequellen

Strategien und Hebel für die Dekarbonisierung der Industrie

Im nächsten Kapitel wird dargelegt, welche Strategien und Technologieoptionen zur Verfügung stehen, um die Treibhausgas-Emissionen der Industrie als Österreichs zweitgrößter Emittent nach dem Verkehrssektor reduziert werden können. Der Fokus liegt dabei auf den energieintensiven Branchen der Grundstoffindustrie.

Um das Ziel der Dekarbonisierung zu erreichen bedarf es dazu jedenfalls einer Kombination mehrerer oder sogar aller im Weiteren vorgestellten CO₂-Minderungsstrategien.

Strategien und Technologieoptionen

Quellen der industriellen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen)²⁰

Die Ansätze und Maßnahmen zur Dekarbonisierung in den unterschiedlichen Industriebranchen hängen maßgeblich davon ab, aus welchen Quellen die CO₂-Emissionen stammen. Dabei können die von der Industrie verursachten Emissionen wie folgt unterteilt werden:

1. Direkte energiebedingte Emissionen aus der Verwendung von Primärenergieträgern zur Bereitstellung von Energie (z.B. Prozesswärme, Dampf, elektrische Energie im Rahmen industrieller Eigenerzeugung)
2. Direkte (prozessbedingte) Emissionen aus der nicht-energetischen Verwendung von kohlenstoffhaltigen Energieträgern und sonstigen Rohstoffen, oder aus der prozessbedingten Freisetzung anderer Treibhausgase als CO₂ (z.B. Zementherstellung)
3. Indirekte energiebedingte Emissionen aus der vorgelagerten Erzeugung des verwendeten Stroms bzw. der verwendeten Wärme oder Kälte

Den größten Teil der industriellen THG-Emissionen stellen die direkten energiebedingten Emissionen dar.

Die indirekten energiebedingten Emissionen können durch eine Steigerung der Energieeffizienz der eingesetzten Technologien anteilig verringert werden. Der wesentliche Beitrag zur

²⁰ Vgl. Umweltbundesamt (2020): „Klimaschutz und Dekarbonisierung im Industriesektor“

Dekarbonisierung der indirekten energiebedingten Emissionen muss in der Energiewirtschaft durch die Umstellung auf erneuerbare Energien erfolgen. Österreich hat sich zum Ziel gesetzt, den Stromverbrauch bis 2030 bilanziell zu 100% aus Erneuerbaren zu decken.

Je nachdem um welche Art von Emissionen es sich handelt, eignen sich gemäß dem deutschen Umweltbundesamt unterschiedliche Strategien und kommen unterschiedliche Technologieoptionen in Frage:

Für **direkte energiebedingte THG-Emissionen**: Steigerung der Energieeffizienz durch Verwendung energieeffizienter Technik, Optimierung von Verfahren und Prozessen und konsequente Nutzung der Abwärme (inkl. Verstromung)

Für **indirekte energiebedingte THG-Emissionen**: Effizienzsteigerungen bei Energiewandlung und -nutzung in industriellen Anwendungen (die Effizienzsteigerung bei der Verwendung von Strom trägt natürlich auch zur Minderung der indirekten energiebedingten THG-Emissionen bei)

Für **direkte prozessbedingte THG-Emissionen**: Prozessumstellungen zur Vermeidung prozessbedingter THG-Emissionen durch grundlegende Verfahrensumstellungen, Substitution der emissionsverursachenden Rohstoffe oder Produkte sowie – falls Verfahrensumstellungen oder eine Substitution nicht möglich sind – ggf. die Anwendung von Carbon Capture and Utilization (CCU), was die Abscheidung und anschließende Verwendung von CO₂ bezeichnet, soweit dadurch an anderer Stelle THG-Emissionen vermieden werden können.²¹

Strategien und Technologieoptionen zur Dekarbonisierung der Industrie

Agora Energiewende (2019) kommt im Rahmen einer Studie den Technologie- und Politikoptionen für eine klimaneutrale Industrie zu dem Ergebnis, dass es jedenfalls einer Kombination unterschiedlicher Strategien bedarf, um das Ziel einer klimaneutralen Industrie zu erreichen. Gemäß den Ergebnissen von Agora Energiewende gibt es dabei spezifische Zusammenhänge zwischen den Strategieoptionen: je weniger auf Elektrifizierung gesetzt wird, desto mehr Kreislaufwirtschaft und CCS wird benötigt.

²¹ Vgl. Umweltbundesamt (13.02.2020): „Klimaschutz und Dekarbonisierung im Industriesektor“

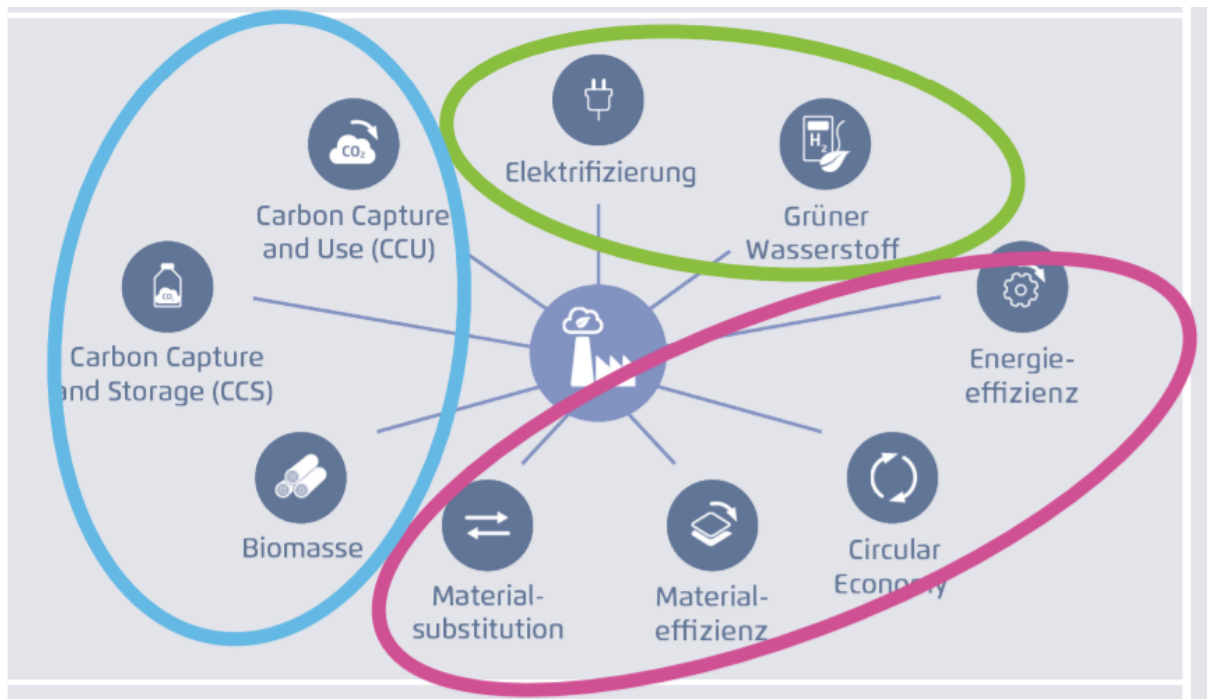


Abbildung 6: Strategien für eine klimaneutrale Industrie.²²

1. Strategie: Direkte und indirekte Nutzung von Erneuerbarem Strom

- a. Direkte Nutzung mit Grünstrom
- b. Indirekte Nutzung von Strom durch grünen Wasserstoff

2. Strategie: Kreislaufwirtschaft etablieren, Effizienz verbessern

- a. Circular Economy
- b. Energieeffizienz
- c. Materialeffizienz
- d. Materialsubstitution

3. Strategie: Kohlenstoffkreislauf schließen

- a. Carbon Capture and Storage (CCS)
- b. Carbon Capture and Utilization (CCU)
- c. Biomasse

Im Nachfolgenden werden die einzelnen **Strategie- und Technologieoptionen** Steckbrief-artig beschrieben. Dabei gilt zu beachten, dass die möglichen Beiträge zur Dekarbonisierung der einzelnen Technologien sich auch **in ihrer Fristigkeit unterscheiden**, wonach einzelnen Technologieoptionen kurzfristig zur CO₂-Reduktion beitragen können wohingegen andere

²² Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Seite 42

Strategieoptionen eher erst mittel- und langfristig ihren Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie werden leisten können.

Elektrifizierung²³

Bei der Strategie der Elektrifizierung wird der Einsatz fossiler Energieträger durch den (direkten) Einsatz von Strom ersetzt. Sofern dieser Strom aus erneuerbaren Energien stammt, können die CO₂-Emissionen vermieden werden.

Zwar wird die Forcierung des direkten Einsatzes von Strom in der öffentlichen Diskussion insbesondere im Zusammenhang mit dem Einsatz im Verkehrsbereich (Stichwort: Elektromobilität) und bei Bereitstellung von Raumwärme im Gebäudebereich über Wärmepumpen diskutiert, doch eröffnet die Strategie der Elektrifizierung auch für den Sektor Industrie relevante Potenziale zur Verminderung der CO₂-Emissionen.

Insbesondere kann durch den Umstieg auf Power-to-Heat Anlagen der Einsatz von Strom in zahlreichen Branchen der Industrie (Chemie, etc.) ermöglicht werden und dadurch die Erzeugung von Nieder- bis Hochtemperaturwärme dekarbonisiert werden. Konkret kommen dafür mehrere Technologien in Frage, wie beispielsweise Elektro- bzw. Elektrodenkessel aber auch Hochtemperaturwärmepumpen.

Ein wesentlicher Vorteil der Strategieoption „Elektrifizierung“ stellt der hohe Gesamtwirkungsgrad von Power-to-Heat Anlagen dar. Dies gilt insbesondere im Fall des Einsatzes von Hochtemperaturwärmepumpen mittels Abwärmenutzung. Auch im Vergleich zur alternativen Anwendung von Wasserstoff, dessen Erzeugung mit Umwandlungsverlusten einhergeht, bietet die Option der Elektrifizierung den Vorteil des höheren Gesamtwirkungsgrad. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz von Strom im Vergleich zu Verbrennungsprozessen in einigen Anwendungen eine präzisere Wärmebereitstellung gegenüber und kann somit zu Effizienzverbesserungen beitragen.

²³ vgl. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Seite 42 ff

Nicht zuletzt haben Elektro- bzw. Elektrodenkessel den Vorteil niedriger Investitionskosten, durch die ein (zunächst) komplementärer Einsatz zusätzlich zu bestehenden konventionellen Anlagen (z.B. KWK-Anlagen), zu vergleichsweise niedrigen Investitionskosten umsetzbar ist.

Die wesentliche technologische Herausforderung einer breit angelegten Elektrifizierungsstrategie ist der dadurch entstehende erhebliche Mehrbedarf an Strom aus erneuerbaren Energien, die einen ausreichend schnellen Ausbau der Erzeugungskapazitäten erfordert.

Grüner Wasserstoff – Wasserstoff aus erneuerbaren Energien²⁴

Der Einsatz von grünem Wasserstoff zur Erzeugung von Wärme kann trotz der gegenüber der direkten Nutzung von Strom verbundenen Wirkungsgradverluste in bestimmten Produktionsprozessen für das Erreichen einer klimaneutralen Grundstoffindustrie sinnvoll bzw. notwendig sein. Dies gilt v.a. für die wasserstoffbasierte Stahlerzeugung in sogenannten Direktreduktionsanlagen sowie als Ausgangsmaterial („feedstock“) in der Chemieindustrie.

Ein Vorteil der Wasserstoffstrategie besteht in ihrer Flexibilität: Der benötigte Wasserstoff kann zunächst zwar inländisch erzeugt werden, wird mittel- bis langfristig infolge eines starken Anstiegs des Bedarfs aber voraussichtlich überwiegend importiert werden. Sofern es hierfür eine gesellschaftliche Akzeptanz gibt, kann der Wasserstoff zudem zunächst auch aus blauer Erzeugung stammen, das heißt auf Basis von Erdgas unter Anwendung von CO₂-Abscheidung und -Speicherung (CCS).

Im Fall der Direktreduktionsanlagen zur Stahlerzeugung besteht ein Flexibilitätsvorteil darin, dass diese Anlagen relativ kurzfristig als Ersatz älterer Hochöfen zugebaut werden können und bei zunächst noch relativ geringer Wasserstoffverfügbarkeit zu Beginn noch mit hohen – im Zeitverlauf jedoch sinkenden – Erdgasanteilen betrieben werden könnten. Eine durch den absehbaren Bedarf an Wasserstoff in der Grundstoffindustrie entstehende Dynamik, die Investitionen in Wasserstofferzeugung und -infrastruktur anreizt, könnte zudem auch anderen Sektoren, insbesondere dem Verkehrssektor (v.a. Schwerlast- und Schifftransport) helfen, ihre Minderungspotenziale zu realisieren.

²⁴ Vgl. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Seite 44

Wesentliche Nachteile der Wasserstoffstrategie sind die derzeit gegenüber fossilen Energieträgern deutlich höheren Bereitstellungskosten sowie die Abhängigkeit von neuen Infrastrukturen, um große Mengen Wasserstoff an wichtigen Industriestandorten verfügbar zu machen. Die elektrolytische Wasserstofferzeugung benötigt zudem große Strommengen.

CO₂-Abscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS)

Bei der CCS-Strategie wird nicht auf einen Wechsel der Energieträger hin zu (potenziell) CO₂-freien Energieträgern wie Strom oder Wasserstoff gesetzt, sondern auf eine Abscheidung und dauerhafte Speicherung von energetischen oder prozessbedingten CO₂-Emissionen zum Beispiel in leeren Gasfeldern. Aufgrund der aus heutiger Sicht noch nicht ausreichend ausgereiften und getesteten Alternativen für eine weitgehende CO₂-Vermeidung durch andere Verfahren könnte CCS zukünftig insbesondere bei der Zementherstellung benötigt werden. Da Zementwerke im Vergleich zu anderen Industrieanlagen deutlich kleiner und oft in direkter Nähe der Abbaugebiete von Kalkstein und Ton lokalisiert sind, entstehen hier jedoch vergleichsweise hohe Abtrennungskosten sowie aus heutiger Sicht ein Bedarf an räumlich verzweigter Infrastruktur für den Abtransport des CO₂. Alternativ könnten jedoch möglicherweise auch dezentrale, lokalräumige Lagerstätten genutzt werden, die bisher nicht im Fokus von Untersuchungen zu potenziellen Standorten für CO₂-Speicher lagen.

Insgesamt gehen die Meinungen und Einstellungen zur möglichen zukünftigen Rolle der CCS-Technologie in der Grundstoffindustrie weiterhin stark auseinander.

Zur Situation der Technologieoption „CO₂-Speicherung“ in Österreich

Die Frage der Zukunft der umstrittenen CO₂-Abscheidetechnologie bleibt für Österreich vorerst offen. Aktuell ist die Abscheidung und unterirdische Speicherung von Kohlendioxid hierzulande verboten, doch ist dieses Verbot aktuell zunächst bis zum Jahr 2023 befristet und deren Verlängerung eine entsprechende Evaluierung geknüpft.

Wesentlich für die Evaluierung ist die Eingrenzbarkeit der Risiken der CCS-Technologie. Ob das Verbot nach 2023 verlängert wird, ist derzeit noch nicht absehbar. In Österreich ist die Anwendung von CCS verboten, allerdings nicht die Erforschung der Technologie.²⁵

Auf europäischer Ebene positioniert sich Österreich mit der Ablehnung von CCS und der Atomkraft anders als viele andere Mitgliedsstaaten und die EU-Kommission selbst. "Weil in einigen Industriebranchen die Grenzen der Effizienz erreicht sind und in einigen industriellen Prozessen keine Reduktion von Emissionen mehr möglich ist, kann CCS der einzige verfügbare Weg sein, in der Industrie direkte Emissionen zu senken, wie das langfristig notwendig ist", heißt es in einem aktuellen Klimaplan 2050 der EU-Kommission zum Thema CCS. Auch in der im Juli 2020 vorgestellten Wasserstoffstrategie der Europäischen Kommission heißt es, die Abscheidung und geologische Speicherung von CO₂ werde beim blauen Wasserstoff eine Rolle spielen. Bei der Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Energieträgern und strombasierten Wasserstoff werde auch die Abscheidung und Nutzung (CCU) zum Einsatz kommen.²⁶

Die Möglichkeit, die CCS-Technologie zu erforschen nutzt derzeit der Mineralölkonzern OMV für ein Pilotprojekt in Niederösterreich. In Aderklaa in der Nähe von Wien lotet die OMV Möglichkeiten aus, wie die Abgase aus der konzerneigenen Gasaufbereitungsanlage in einer Tiefe von 3.000 bis 3.500 Metern eingelagert werden könnten. Dort befindet sich ein leergepumptes Erdgasfeld. Auch der Speicher Zwerndorf käme für ein Forschungsprojekt in Frage.

Kreislaufwirtschaft (Circular Economy)

Die Strategie der Kreislaufwirtschaft zielt darauf ab, bereits erzeugte (und genutzte) Materialien möglichst weitgehend einer Wiederverwendung zuzuführen. Aktuelle Studien zufolge birgt die Kreislaufwirtschaft mittel- bis langfristig enorme Potenziale, zur Reduktion der CO₂-Emissionen im Industriesektor beizutragen. Und damit den CO₂-Fußabdruck von Materialien und Produkten erheblich zu verringern.

²⁵ Parlamentskorrespondenz Nr. 40 vom 18.01.2019: Keine CCS-Projekte in Österreich.

Parlamentskorrespondenz Nr. 277 vom 19.03.2019: Auch künftig keine geologische Speicherung von Kohlenstoffdioxid in Österreich.

²⁶ Europäische Kommission (2020): Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa.

So etwa kommt das Beratungsunternehmen Material Economics (2018) in seinen Analysen zu dem Ergebnis, dass in der Europäischen Union bis zum Jahr 2050 rund 70 % der Stahlnachfrage, 50 % des Aluminiumbedarfs und gut 56 % des Kunststoffbedarfs durch die Rückführung bereits produzierter Materialien gedeckt werden.²⁷

Kreislaufwirtschaft in der Stahlindustrie

Obwohl die Produktion von Stahl aktuell für einen großen Teil der industriellen Emissionen der Treibhausgase verantwortlich ist, ist Stahl auch heutzutage bereits ein verhältnismäßig zirkuläres Material. Das Potential zur Reduktion von Emissionen ist allerdings noch bei weitem nicht ausgeschöpft. Den Analysen von Material Economics (2019) zufolge könnten anstelle von derzeit rund 40% bis 2050 bis zu 70% der Stahlnachfrage durch Sekundärstahl, also recycelten Stahlschrott, gedeckt werden. Dabei wird Stahlschrott im sogenannten Elektrolichtbogenofen aufgeschmolzen und wieder zu Stahl verarbeitet. Im Vergleich zur Primärstahlerzeugung aus Eisenerz in der Hochofenroute (14 Gigajoule pro Tonne Rohstahl) benötigt die Sekundärstahlroute (2 Gigajoule pro Tonne Rohstahl) deutlich weniger Energie. Auch die direkten CO₂-Emissionen sind im Vergleich zur Hochofenroute (1,7 Tonnen CO₂ pro Tonne Rohstahl) in der Sekundärstahlroute (0,3 Tonnen CO₂ pro Tonne Rohstahl) gegenwärtig erheblich geringer.²⁸

Da die Sekundärstahlroute strombasiert ist, können über diese Route in Zukunft bei einer vollständigen Dekarbonisierung des Strommixes auch die indirekten Emissionen vermieden und somit nahezu treibhausgasneutral Stahl produziert werden.

Allerdings bestehen in Bezug auf eine deutliche Erhöhung der Sekundärstahlroute noch Herausforderungen: Dazu zählt etwa Vielfalt an Stählen und die oft strikten Anforderungen an die Qualität und Materialeigenschaften. Dies führt aktuell dazu, dass sekundärer Stahl häufig für Anwendungen mit niedrigeren Ansprüchen an die Materialqualität verwendet wird. Eine weitere Herausforderung stellt die Verunreinigung von Stahl mit anderen Elementen (z.B. Kupfer, Nickel). Kupfer gelangt meist während des Recyclingprozesses in den Stahl, da viele Komponenten oder Produkte beide Materialien enthalten. Beim Stahlschrott existieren große Qualitätsunterschiede. So ist ein großer Teil des Stahlschrotts mit anderen Elementen wie beispielsweise Kupfer verunreinigt. Da Kupfer aus dem Stahl praktisch nicht mehr zu gewinnen ist, führt die Verunreinigung zu einer dauerhaften Abwertung des Materials (Downcycling).²⁹

²⁷ Material Economics (2018)

²⁸ Wuppertal Institut (2018): Low-Carbon Infrastructure NRW. Dekarbonisierungsstrategien und -technologien für energieintensive Industrien. Seite 37

²⁹ Vgl. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Seite 52

Insgesamt kann die Strategie der Schließung von Stoffkreisläufen einen erheblichen Beitrag dazu leisten, sowohl den CO₂-Ausstoß als auch den Energiebedarf im Vergleich zur Primärproduktion der Grundstoffe erheblich zu reduzieren. Somit kann die Kreislaufwirtschaft einen erheblichen Beitrag zu Ressourcen- und Energieeffizienz liefern. Voraussetzungen dafür sind allerdings entsprechend hoher Recyclingquoten, Änderungen am Produktdesign, eine entsprechende Demontage von Produkten am Ende der Lebensdauer sowie eine verbesserte Recyclinglogistik und gegebenenfalls auch Änderungen globaler Stoffströme.

Erhöhung der Materialeffizienz³⁰

Die Strategieoption der Steigerung der Materialeffizienz dient dazu, die Funktion der eingesetzten Stoffe oder Dienstleistungen mit einem geringeren Materialbedarf erbringen zu können. Für die Erhöhung der Materialeffizienz gibt es unterschiedliche Ansatzpunkte:

- **Vermeidung von Materialverlusten im Herstellungsprozess:** Laut IPCC (2014) kommt es im Rahmen der Fertigung von Grundstofferzeugnissen zu durchaus erheblichen Materialverlusten. Diese werden etwa auf 10% in der Papierherstellung, auf rund 25% bei Stahl und sogar rund 40% bei Aluminium geschätzt. Diese Verluste, könnten beispielsweise durch Anpassungen in den Herstellungsprozessen und durch Änderungen des Designs einzelner Komponenten reduziert werden.³¹
- **Minderung der Materialintensität von Produkten:** Mittels Optimierung von Design und Produktionsprozessen könnte eine Vielzahl an Produkten ohne Leistungseinschränkungen mit einem erheblich geringeren Gewicht hergestellt werden. Der Realisierung dieser Potenziale stehen jedoch oftmals die im Vergleich zu den Materialkosten relativ hohen Arbeitskosten für Design und Adaptierung der Herstellungsprozesse entgegen.
- **Intensivierung der Produktnutzung:** Das Ziel, mit einer verringerten Anzahl an Produkten, die gleiche Menge an Dienstleistungen zu erbringen beschreibt den Ansatz einer intensiveren Produktnutzung. Konkrete Beispiele dafür sind eine platzsparende Gestaltung von

³⁰ Vgl. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Seite 53

³¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Industry. In: Edenhofer, O. et al. (Hrsg.). Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.)

Gebäuden, die Forcierung der Multifunktionalität von Geräten oder die Erhöhung der Nutzungsraten von Produkten durch gemeinsame Nutzung (z.B. Carsharing)

- **Schritte in Richtung einer Kreislaufwirtschaft:** Auch eine zunehmende Kreislaufführung von Produkten und Materialien steigert die Materialeffizienz.

Materialsstitution³²

Eine weitere Strategie stellt die Substitution von Materialien dar, mit dem Ziel die Emissionsintensität bestimmter Produkte zu reduzieren. Als ein Anwendungsbereich kann zum Beispiel die Nutzung von Holz im Gebäudebau als Ersatz (vollständig oder teilweise) von Beton und Stahl genannt werden. Weitere Beispiele sind die Nutzung biobasierter Naturdämmstoffe anstelle konventioneller Dämmstoffe sowie der (schrittweise) Umstieg von einer massiven Bauweise auf eine Leichtbauweise etwa durch den Einsatz von Carbonbeton.

Einsatz von Carbonbeton³³

Carbonbeton ist ein relativ neuer Baustoff, der es erlaubt, bei deutlich geringerem Materialeinsatz die Nutzung von Stahlbeton zu reduzieren beziehungsweise Stahlbeton zu substituieren. Da Stahl bei Kontakt mit Regen und Sauerstoff rostet, wird der Stahl im Stahlbeton in der Regel mit deutlich mehr Beton ummantelt, als für die statischen Eigenschaften des Bauteils eigentlich notwendig wäre. Eine mögliche Alternative dazu ist der Einsatz von Carbonbeton (auch Textilbeton genannt). Dabei wird aus Carbonfaser oder Textilfaser eine Gitternetzstruktur gewebt und mit Beton aufgefüllt. So kann der Einsatz von Beton um bis zu drei Viertel reduziert werden, wobei Textilbeton vergleichbare oder teilweise sogar bessere statische Eigenschaften als Stahlbeton besitzt.

Nach Herstellerangaben können so beispielsweise bei der Herstellung und Instandsetzung von Gebäuden knapp die Hälfte der Emissionen eingespart werden. Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld wäre auch die Sanierung von Stahlbetonbrücken.

Durch Potenzialgrenzen bei der nachhaltigen Nutzung von Holz und anderen Nutzpflanzen sowie Begrenzungen in der Substitutionsfähigkeit bei bestimmten Nutzungsarten sind der

³² Vgl. Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Seite 53

³³ Carbon Concrete Composite, 2019

Strategie der Materialsubstitution jedoch klare Grenzen gesetzt. Bei der Bewertung einzelner Maßnahmen der Materialsubstitution sollte grundsätzlich eine umfassende Analyse der Lebenszyklusemissionen der verwendeten Materialien erfolgen.

Steigerung der Energieeffizienz

Die Steigerung der Energieeffizienz ist für signifikante Emissionsminderungen in der Industrie eine wichtige Strategie, doch sind in energieintensiven Branchen bereits heute die physikalischen Grenzen erreicht und auch prozessbedingte Emissionen können mittels Energieeffizienz eliminiert werden. Nichtsdestotrotz kann Energieeffizienz vor allem kurz- bis mittelfristig einen bedeutsamen Beitrag zur Minderung des Energiebedarfs und damit der CO₂-Emissionen leisten.

Einsatz von Biomasse

Über den Ersatz fossiler Energieträger durch Biomasse können auch in der Grundstoffindustrie Minderungen der CO₂-Emissionen erreicht werden. Der Einsatz von Biomasse zur Minderung der CO₂-Emissionen in der Industrie eignet sich insbesondere für die Wärmebereitstellung (Nieder- und Mitteltemperaturwärme). Allerdings sind hier auch die Begrenzungen des nachhaltig verfügbaren Biomassepotentials zu beachten. Berechnungen zur Höhe des Biomassepotentials sind dabei stark abhängig davon, inwieweit Nutzungskonkurrenzen um Anbauflächen sowie nachteilige Auswirkungen auf Wasser, Boden, Biodiversität und Naturschutz berücksichtigt werden und entsprechend gegen den Anbau von Biomasse zum alleinigen Zweck einer energetischen Nutzung in die Bewertung einfließen. Darüber hinaus gilt zu bedenken, dass die CO₂-Emissionen von Biomasse über den gesamten Lebenszyklus betrachtet erheblich sein können, unter anderem wenn große Mengen an Düngemittel und Pestiziden beim Anbau der Biomasse eingesetzt werden oder wenn lange Transportwege anfallen.

Für die österreichische Industrie haben das AIT und die AEA eine ausführliche Analyse und auch Berechnungen angestellt, welche Technologie- und Strategieoptionen für die Dekarbonisierung der heimischen Industrie von Bedeutung sind und welche Mengen an Energie dafür benötigt werden.

Insgesamt haben das Austrian Institute of Technology (AIT) und die Österreichische Energieagentur (Austrian Energy Agency, AEA) fünf Handlungsfelder zur Erreichung der Klimaneutralität identifiziert (siehe Abbildung 7). Insgesamt entsprechen die in der Analyse enthaltenen Technologie- und Strategioptionen jenen der Aufbereitung der Denkfabrik Agora Energiewende für die deutsche Industrie.

Beitrag zur Klimaneutralität 5 Handlungsfelder

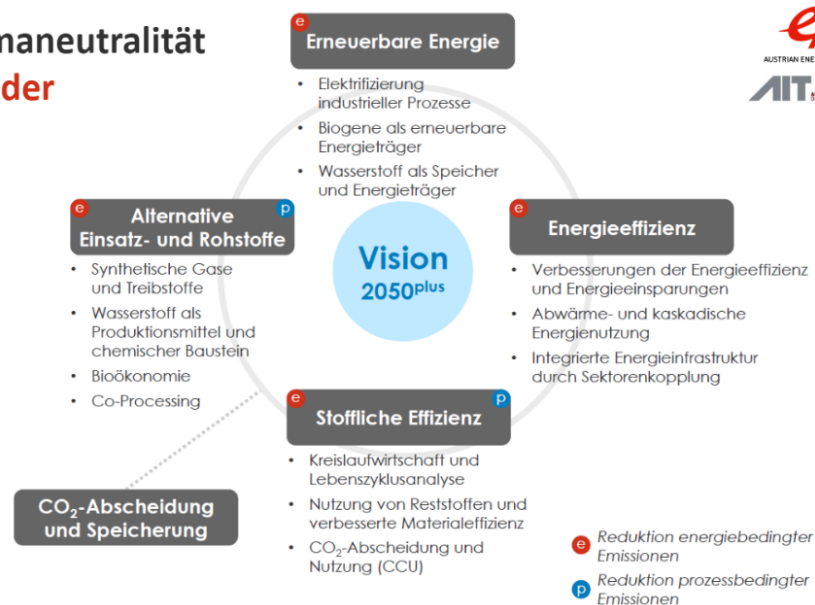


Abbildung 7: Beitrag zur Klimaneutralität. 5 Handlungsfelder.³⁴

Vor dem Hintergrund der nach aktuellem Stand bestehenden Optionen kommen das AIT und AEA zu dem Ergebnis, dass aus heutiger Sicht die zentrale Herausforderung am Weg zur Dekarbonisierung der Industrie sowie der Wirtschaft insgesamt in der Abdeckung der bilanziellen Lücke zwischen Strombedarf und Stromaufbringung liegt. Um diese Herausforderung zu bewältigen braucht es einen enormen Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien aber auch eine stärkere europäische Integration, nicht zuletzt, um die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie zu gewährleisten und nachhaltige Kostenstrukturen zu entwickeln.

AIT und AEA betrachten in ihrer Studie den notwendigen Strombedarf als auch die mögliche Aufbringung an elektrischer Energie bis 2050. Das im aktuellen Regierungsprogramm ausge-

³⁴ Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Österreichische Energieagentur (AEA) (2019): Im Wettbewerb um die Zukunft. Seite 5

rufene Ziel der Klimaneutralität 2040 findet demnach noch keine Berücksichtigung. Die Aussagen der Studie sind davon allerdings unberührt gültig, lediglich die Umsetzungsdynamik ist aufgrund der Vorverlegung des Ziels der Klimaneutralität von 2050 auf 2040 noch zusätzlich erhöht.

Insgesamt zeigt sich, dass der direkte als auch der indirekte Einsatz von Strom, sowohl in der Industrie aber auch in den anderen Bereichen wie Verkehr und Raumwärme eine zentrale Rolle für die Erreichung der Klimaziele spielen wird und demnach der Bedarf an Strom, trotz begleitender Energieeffizienzbemühungen, stark ansteigen wird:

Abschätzungen zu Stromverbrauch und erneuerbaren Erzeugungspotenzialen in Österreich 2050*

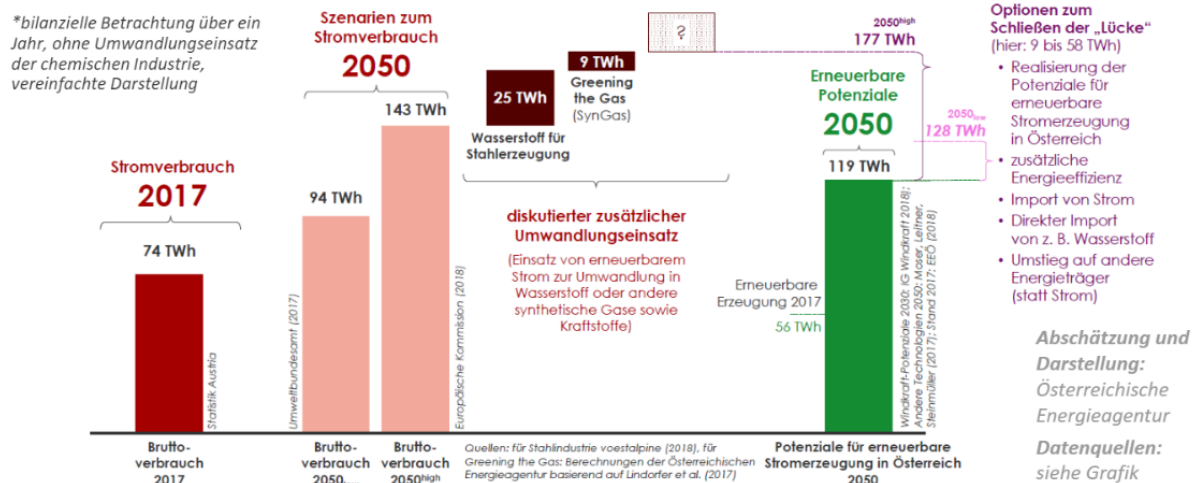


Abbildung 8: Abschätzung zu Stromverbrauch und erneuerbaren Erzeugungspotenzialen in Österreich 2050³⁵

Gemäß den Abschätzungen der Österreichischen Energieagentur (AEA) zufolge wird der Bruttostrombedarf in Österreich im Jahr 2050 in einer Bandbreite von 94 Terawattstunden³⁶ (TWh) bis 143 TWh³⁷ liegen (siehe obige Abbildung). Hinzuzurechnen wäre dann noch der Bedarf zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wasserstoff sowie andere synthetische Gase (z.B. Kraftstoffe), wobei die AEA hierfür einen zusätzlichen Bedarf in Höhe von 50 TWh annimmt. Daraus ergibt sich gemäß den Schätzungen der AEA ein Gesamtstrombedarf im

³⁵ Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Österreichische Energieagentur (AEA) (2019): Im Wettbewerb um die Zukunft. Seite 6

³⁶ Vgl. Umweltbundesamt (2017) Szenario „Transition 2050“

³⁷ Vgl. Europäische Kommission (2018), Szenario „Fokus: Elektrifizierung“

Jahr 2050 von 144 bis 193 TWh. Demgegenüber steht ein auf aktuellen Berechnungen beruhendes Gesamtpotenzial zur inländischen Stromerzeugung 2050 von rund 119 TWh.

Die daraus resultierende Lücke (25 bis 74 TWh) zwischen Aufbringung und Verwendung könnte durch zusätzliche Energieeffizienz, den Wechsel auf andere Energieträger anstatt Strom und durch Importe elektrischer Energie gedeckt werden. Alternativ zur inländischen Herstellung aus erneuerbarem Strom mittels Elektrolyse könnte der Bedarf an Strom auch durch den direkten Import von Wasserstoff reduziert werden. Auch für die Option gilt, dass die Realisierung wettbewerbsfähige Kosten voraussetzt.³⁸

Wie die österreichische Industrie CO₂-neutral werden kann, zeigte das AIT auch in der Studie IndustRiES 2019. Das AIT Center for Energy stellt im Projekt **Energieinfrastruktur für 100% erneuerbare Energie in der Industrie** eine interaktive Web-Applikation zur Verfügung. Diese zeigt auch weniger versierten Personen mit wenigen Klicks, welche Auswirkungen die Dekarbonisierung der Industrie auf einzelne Energieträger und den Endenergiebedarf haben. Diese Web-Applikation ist abrufbar unter <https://klimafonds.respond.mara.at/email/links/7cbc5d12e16c5b3a84b28df7270cb6a3/78b0e0c82ccdc675010fa7765cec449a>.

³⁸ Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Österreichische Energieagentur (AEA) (2019): Im Wettbewerb um die Zukunft. Seite 5

Best Practice Beispiele

Im folgenden Abschnitt werden Forschungsprojekte und Best Practice Beispiele vorgestellt, die einen vielversprechenden Beitrag für die Dekarbonisierung der Industrie beitragen können.

Die Best Practice Beispiele sind in folgende Kategorien einordenbar.

- Energieeffizienzsteigerung und Prozessoptimierung
- Umstellung der Primärenergieträger von fossilen Energieträgern auf Erneuerbare Energieerzeugung, Speicherung und Verbrauchsflexibilisierung DSM
- Materialinnovation zu biogenen Materialien und Kreislaufwirtschaft/ Recycling

NEFI – New Energy for Industry³⁹

Die Vorzeigeregion Energie NEFI demonstriert innovative Technologien zur Effizienzsteigerung und Emissionsreduktion in der heimischen Industrie.

Im Zentrum der Entwicklung stehen dampferzeugende Wärmepumpen, die Abwärme wieder in den Prozess einbinden, Trocknungsprozesse, die mit neuartiger Sensorik und digitalen Methoden energetisch optimiert werden, sowie die Entwicklung und Demonstration des Konzepts einer grünen Gießerei. Das Ziel ist eine zunehmende Dekarbonisierung der Produktion zu erreichen. Ein weiterer Fokus ist die optimale Nutzung sowohl von Flexibilitäten als auch von volatilen erneuerbaren Energieträgern sowie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle an der Schnittstelle zwischen Industrie und Stromnetz. Die Technologien werden in der Faserproduktion, in der Dämmstoffproduktion, in der Lebensmittelindustrie sowie in der Aluminiumverarbeitung demonstriert und haben zudem ein hohes Multiplikationspotential.

OXYSTEEL: Energieeffizienz und Demand Side Management in der Stahlindustrie⁴⁰

Im Projekt OxySteel werden unter Leitung der Montanuniversität Leoben – Lehrstuhl für Energieverbundtechnik in Kooperation mit der Breitenfeld Edelstahl AG und der Messer Austria GmbH Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz und Senkung der CO₂-Emissionen im Elektrostahlwerk erforscht und getestet.

³⁹ www.nefi.at

⁴⁰ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Klima- und Energiefonds (Hrsg.): energy innovation austria. Ausgabe 3/2019. Seite 6f. Abrufbar unter <https://www.energy-innovation-austria.at/issue/eia-2019-03-de/>

Das Projektteam entwickelt ein neuartiges Prozessdesign, das Sauerstoffverbrennung und CO₂-Abscheidung (CCU/Carbon Capture and Utilisation) in den Produktionsprozess einbindet. Zusätzlich wird das Potenzial für Demand Side Management in der Stahlproduktion analysiert.

QxySteel ist ein Projekt der Vorzeigeregion NEFI – New Energy for Industry⁴¹, einem Innovationsverbund aus Wissenschaft, Technologieanbietern und Unternehmen zur Entwicklung und Demonstration von Schlüsseltechnologien für die Dekarbonisierung der Industrie.

Gmunden High Temperature Link⁴²

Das Projekt Gmunden High Temperature Link stellt ein effizientes Beispiel von Energieeffizienzsteigerung und Prozessoptimierung in der Vorzeigeregion Energie NEFI dar.

Das Zementwerk Gmunden hat ein Abwärme-Potential von ca. 10 MW-th bei 400°C. Im Projekt werden Konzepte und Technologien entwickelt und analysiert, mit denen eine möglichst große CO₂-Reduktion erzielt werden kann. Die Abwärme aus dem Industriebetrieb soll auf hohem Temperaturniveau über eine 1,5 Kilometer lange Wärmetransportleitung zu Großabnehmern im Stadtgebiet von Gmunden geleitet werden.

Für die Hochtemperatur-Wärme-Auskopplung aus Zement-Abgas werden sowohl Schmutzgas- als auch Heißgas-Filtration in Kombination mit einem Reingas-Wärmetauscher analysiert. Die ganzjährige Wärmeversorgung ist eine Herausforderung, da Industriebetriebe geplante und ungeplante Produktionsschwankungen haben, die es durch Speicher wirtschaftlich und ökologisch nachhaltig zu überbrücken gilt.

Zur Maximierung der CO₂-Einsparung werden Konzepte mit Wärmespeichern unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Größe (von 4 MWh bis 5500MWh) evaluiert. Die Speichertechnologie für den Langzeitspeicher wird im Projekt entwickelt. Zusätzlich wird versucht, möglichst viele industrielle Abnehmer in das Konzept einzubinden.

⁴¹ www.nefi.at

⁴² <https://www.nefi.at/gmunden/>

Die Abwärme wird auf Basis der Analysen des Projekts in Form von Dampf über eine Distanz von 1,5 Kilometern, auch über nichtbetrieblichen Grund, zu möglichen industriellen Abnehmern transportiert – dies stellt ebenfalls ein Novum dar. Mit dieser Herangehensweise wird aufgrund der hohen Temperaturen technisch und rechtlich Neuland betreten.

Da sich der Standort in einem Fremdenverkehrsgebiet nahe einem See befindet, müssen höchstmögliche Umwelt- und Sicherheitsstandards erreicht werden. In den nicht-technischen Betrachtungen werden die Themen der Partizipation und der regionalen Wertschöpfung eruiert.

Industry4Redispatch: Industrieflexibilität als Stabilisator für das Stromnetz

Im elektrischen Stromnetz müssen sich die Erzeugung und der Verbrauch der elektrischen Energie zu jedem Zeitpunkt decken. Nur dann ist das elektrische Energiesystem im Gleichgewicht und stabil. Die erneuerbaren Erzeugungsanlagen aus Windkraft und Photovoltaik sind volatil und Wetterabhängig und nur begrenzt veränderbar. Die Speicherung von elektrischen Strom in großen Mengen ist aufwändig, teuer und eine noch ungelöste technische Herausforderung. Wird der Energieverbrauch zeitlich verschoben und an die Erzeugung angepasst, so spricht man von Demand-Side-Management (DSM). Dieses Feld bietet ein großes Optimierungspotential, besonders bei energieintensiven industriellen Prozessen.

Im Fokus steht die zeitliche Anpassung des Energieverbrauchs der Produktionsprozesse an die Erzeugungsspitzen der Erneuerbaren Erzeugung.

SolarAutomotive: Erneuerbare Energie für die Automobilindustrie⁴³

Ziel des D-A-CH Kooperationsvorhabens ist es, die Integration von solarer Prozesswärme in der Automobilindustrie sowie in der vorgelagerten Zulieferindustrie zu forcieren.

Durch das Aufzeigen konkreter Anwendungsbeispiele und der Realisierung von Leuchtturmprojekten sollen Impulse zur Dekarbonisierung gesetzt und Potenziale für die CO₂-freie Produktion aufgezeigt werden.

⁴³ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Klima- und Energiefonds (Hrsg.): energy innovation austria. Ausgabe 3/2019. Seite 4f. Abrufbar unter <https://www.energy-innovation-austria.at/issue/eia-2019-03-de/>

Gemäß den Angaben der Projektpartner sind durchaus signifikante Potenziale für solare Prozesswärme vorhanden: Basierend auf dem Endenergieverbrauch der europäischen Industrie ergibt sich unter der Annahme, dass der gesamte industrielle Wärmebedarf unter 200 °C solarthermisch versorgt werden kann, ein CO₂-Einsparungspotenzial von 25 Millionen Tonnen pro Jahr. Rein in der Automobilindustrie (ohne Zulieferindustrie) bedeutet das 4,2 Mio.m² installierte Kollektorfläche und eine Leistung von 2,4 Gigawatt (GW) Solarwärme für industrielle Prozesse.

Da die Branche sehr viele unterschiedliche Produktionszweige und -verfahren umfasst, können die Erkenntnisse auf andere Industriesektoren (wie z. B. Lebensmittel und Getränke, Textil, Leiterplatten, Metallverarbeitung) übertragen werden.

Im Rahmen von SolarAutomotive wurden 25 detaillierte Fallstudien in unterschiedlichen Ländern durchgeführt und mögliche Integrationspunkte für die solarthermische Versorgung verschiedener Produktionsprozesse identifiziert. Die detaillierten Simulationen berücksichtigen zahlreiche Prozessparameter (Temperaturniveau, Spreizung, Aufheizraten, etc.) sowie prozesstechnische Besonderheiten und die Produktqualität. Daraus ergibt sich die Wahl der geeigneten Kollektortechnologie und -fläche, der Speicher, des Aufstellungsorts und der Ausrichtung der Anlage.

Das große Potenzial der solaren Prozesswärme für die Automobil- und Zulieferindustrie konnte durch die Fallstudien bestätigt werden. Die Analysen zeigen sowohl technisch als auch wirtschaftlich sinnvolle Anlagenkonzepte in unterschiedlicher Größe (solar-thermische Flächen zwischen 50 m² und 3.200 m²). Nach positiver innerbetrieblicher Evaluierung sollen die Konzepte im nächsten Schritt realisiert werden.

Auf Basis der Ergebnisse wurde ein Leitfaden erstellt, der die Verbreitung von solarer Prozesswärme in der Automobil- und Zulieferindustrie unterstützen soll. Neben Informationen zu den Einsatzmöglichkeiten und Integrationskonzepten, werden einfache, maßgeschneiderte Werkzeuge für die Auslegung und wirtschaftliche Bewertung einer Anlage zur Verfügung gestellt. Ein Vorauslegungstool sowie ein detailliertes Simulationstool (SolarSOCO) ermöglichen die schnelle bzw. die detaillierte Berechnung.

Mehr Informationen zu dem Projekt im Detail finden sich auch unter www.energiefor-schung.at/projekte/847/solare-prozesswaerme-fuer-die-automobil-und-zulieferindustrie

TOREtech - Energieeffizienz in der Ziegelproduktion⁴⁴

In der Ziegelproduktion konnten durch den Einsatz neuer Technologien in den letzten Jahren erhebliche Energieeinsparungen erzielt werden. Das österreichische Unternehmen Wienerberger ist Innovationsführer und verbessert laufend sein Angebot an energieeffizienten, hochisolierenden Ziegeln und nachhaltigen Systemlösungen.

Parallel zur technischen Verbesserung seiner Produkte konnte Wienerberger auch den spezifischen Energieverbrauch in der Produktion deutlich reduzieren: Verglichen mit 2010 wurde bis 2018 eine Reduktion von 23 % im Ziegelbereich und 16 % im Dachziegelbereich erzielt. Die Herstellung von grobkeramischen Produkten ist weiterhin energieintensiv und weist zusätzliches Optimierungspotenzial auf. Neben der Zerkleinerung der Rohstoffe erfordert das Trocknen und Brennen der Ziegel einen relevanten Energieeinsatz.

Im Rahmen des Projektes TOREtech beschäftigt sich das österreichische Unternehmen und Innovationsführer Wienerberger mit der Optimierung des Brennofens zur Ziegelherstellung. In Kooperation mit dem Institut für Verfahrenstechnik an der Technischen Universität Wien und dem Ingenieurbüro DrS3 wird ein innovatives Tunnelofen-Energiekonzept mit einem neuartigen, speziell für Tunnelöfen entwickelten Gasbrenner und energieeffizienter Prozesstechnik erarbeitet. Ziel ist es, den Primärenergiebedarf bei der Ziegelproduktion weiter abzusenken.

Das Unternehmen Wienerberger erwartet, dass diese Gasbrenner-Neuentwicklung eine um mindestens 10 % höhere thermische Effizienz aufweist und damit der Gasverbrauch und der CO₂-Ausstoß der Ziegelöfen nachhaltig weiter reduziert werden können. Insgesamt hat die Technologie das Potenzial mittelfristig den Energieeinsatz in Tunnelöfen zu reduzieren und damit Kosten- und Wettbewerbsvorteile zu erzielen.

⁴⁴ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Klima- und Energiefonds (Hrsg.): energy innovation austria. Ausgabe 3/2019. Seite 10f. Abrufbar unter <https://www.energy-innovation-austria.at/issue/eia-2019-03-de/>

Green Foundry 4.0. "envloTcast" – Grüne Gießerei der Zukunft⁴⁵

Als ein Vorzeige-Forschungsprojekt gilt die Modellfabrik "envloTcast" am Standort des Leichtmetallkompetenzzentrums Ranshofen (OÖ). Ziel ist es, ein neues Energiekonzept für den Aluminiumdruckguss zu demonstrieren, welches es ermöglicht, anstelle von Erdgas als Primärenergieträger den Gießereibetrieb ausschließlich mithilfe von erneuerbaren Energien (Ökostrom, Biomasse und grünen Wasserstoff) zu bewerkstelligen.

Die Energieeffizienz wird durch Hochtemperaturisolierung, konturnahes Kühlen und einem innovativen Abwärmenutzungskonzept mit Latentwärmespeichern und Hochtemperaturwärmepumpen erheblich gesteigert. Zudem ermöglicht ein Prozessleitsystem basierend auf Augmented Reality eine smarte Datenvisualisierung und Steuerung der gesamten Gießerei.

Die Green Foundry 4.0 ist zum Nachrüsten (Retrofitting) geeignet, auf andere Branchen übertragbar und umfasst mehrere exportierbare österreichische Technologien, darunter ein industrielles Hochtemperatur-Wärmeverteilungssystem, eine innovative, energieoptimierte, langlebige Gießform und einen vollständig abwärmeintegrierten Wärmebehandlungssofen.

⁴⁵ NEFI – New Energy for Industry: NEFI Factsheet (2020), abrufbar unter: NEW ENERGY FOR INDUSTRY <https://www.nefi.at/>

Literaturverzeichnis

Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, November 2019. Abrufbar unter https://static.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2018/Dekarbonisierung_Industrie/164_A-EW_Klimaneutrale-Industrie_Studie_WEB.pdf

Anderl, M., Gössl, M., Kuschel, V., Haider, S., et al. (2016). Klimaschutzbericht 2016. *Wien: Umweltbundesamt.*

Austrian Institute of Technology GmbH (AIT) (2019): IndustRIES. Energieinfrastruktur für 100 % Erneuerbare Energie in der Industrie. Erstellt im Auftrag des Klima- und Energiefonds. Abrufbar unter: https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/Studie_IndustRIES-2019_neu-1.pdf

Austrian Institute of Technology GmbH (AIT), Österreichische Energieagentur (AEA) (2019): Im Wettbewerb um die Zukunft. Klimapolitische Perspektiven für den Beitrag der österreichischen Industrie zur Treibhausgasneutralität und ihre Vision 2050plus. Abrufbar unter: <https://www.wko.at/branchen/industrie/zukunft-policy-paper.pdf>

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Klima- und Energiefonds (Hrsg.): energy innovation austria. Ausgabe 3/2019. Abrufbar unter <https://www.energy-innovation-austria.at/issue/eia-2019-03-de/>

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2020). Energie in Österreich - Zahlen, Daten, Fakten. Abgerufen unter: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>

Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) e.V., The Boston Consulting Group (BCG), Prognos. (2018): Klimapfade für Deutschland. Abrufbar unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/>

Carbon Concrete Composite. (2019). Was ist Carbonbeton. Abrufbar unter: <https://www.bauen-neu-denken.de/was-ist-carbonbeton/>

E3G (2020): Die politische Ökonomie der Dekarbonisierung der deutschen Industrie. Dezember 2020. Abrufbar unter: https://9tj4025ol53byww26jdkao0x-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/DE_2020_E3G_Germany-Industry-PEMM.pdf

Energate-messenger.de (03.09.2020): Zukunft von CCS in Österreich bleibt offen“. Abrufbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/205224/zukunft-von-ccs-in-oesterreich-bleibt-offen>

Energate-messenger.de (12.02.2020): OMV treibt CCS-Projekt im Marchfeld voran. Abrufbar unter <https://www.energate-messenger.de/news/200261/omv-treibt-ccs-projekt-im-marchfeld-voran>

Europäische Kommission (2018). Ein sauberer Planet für alle Eine Europäische strategische, langfristige Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft. Abrufbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0773&from=EN>

Europäische Kommission (2020): Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa. Abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0301&from=EN>

Material Economics. (2018). The Circular Economy. Abrufbar unter: <https://media.sitra.fi/2018/06/12132041/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation.pdf>

Material Economics. (2019). Industrial Transformation 2050. Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. Im Auftrag von: University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership. Abrufbar unter: <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050#:~:text=Industrial%20Transformation%202050%20seeks%20to,overall%20economic%20development%20and%20performance>

NEFI – New Energy for Industry: NEFI Factsheet (2020), abrufbar unter: NEW ENERGY FOR INDUSTRY. Abrufbar unter: <https://www.nefi.at/>

Parlamentskorrespondenz Nr. 40 vom 18.01.2019: Keine CCS-Projekte in Österreich. Abrufbar unter https://www.parlament.gv.at/PAKT/PR/JAHR_2019/PK0040/index.shtml

Parlamentskorrespondenz Nr. 40 vom 18.01.2019: Keine CCS-Projekte in Österreich. Abrufbar unter https://www.parlament.gv.at/PAKT/PR/JAHR_2019/PK0040/index.shtml

Schelling, T. C. (1997). The cost of combating global warming: Facing the tradeoffs. Foreign Affairs, 8-14.

The European Green Deal. (2019). https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/european-green-deal-communication_en.pdf
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6723

Umsatzplus bei stein- und keramischer Industrie. (2019, März 19). handwerkundbau.at. Abrufbar unter: <https://www.handwerkundbau.at/betrieb/umsatzplus-bei-stein-und-keramischer-industrie-9862>

Umweltbundesamt et al. (2017). Energie- und Treibhausgas-Szenarien im Hinblick auf 2030 und 2050. Wien. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0628.pdf>

Umweltbundesamt (2018). Klimaschutzbericht 2018, www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub_id=2258

Umweltbundesamt (13.02.2020): „Klimaschutz und Dekarbonisierung im Industriesektor“, abrufbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/klimaschutz-dekarbonisierung-im-industriesektor>

Umweltbundesamt (2019b): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE, abrufbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf

Umweltbundesamt (UBA) (2019a): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2017. Abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28_cc_23-2019_nir-2019_0.pdf

Umweltbundesamt (19.01.2021). Treibhausgas-Bilanz 2019 nach Sektoren. Abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news210119/sektoren>

What if we do not act? The European Green Deal (December 2019). https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_19_6715

World Meteorological Organization. (2020, January 15). WMO confirms 2019 as second hottest year on record [Press release]. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-confirms-2019-second-hottest-year-record>

World Meteorological Organization. (2020). WMO statement on the state of the global climate in 2019. World Meteorological Organization (WMO)

Wuppertal Institut (2018): Low-Carbon Infrastructure NRW. Dekarbonisierungsstrategien und -technologien für energieintensive Industrien. Abrufbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7197/file/7197_Low-Carbon_Infrastructure.pdf