

Global Energy Perspectives

gefördert aus Kapitel 2302, Titel 687 01

BMZ-Abschlussreport / Basisdokument

Global Energy Solutions e.V.

Teil 2: Wesentliche treibhausgasverursachende
Branchen

Kapitel 3-2

Stand 30.Juni 2023

Autorenteam:	
Siddhant Bane	Joern Becker
Ulrich Begemann	Leon Berks
Simon Göss	Prof. Dr. Estelle Herlyn
Dr. Wilfried Lyhs	Dr. Ludolf Plass
Dr. Jens Wagner	Dr. Hans Jürgen Wernicke

Erklärung zum Urheberrecht

Das nachfolgende Dokument ist grundsätzlich ausschließlich für den Empfänger bestimmt. Eine Weitergabe an Dritte oder die Nutzung für Dritte ist – auch auszugsweise – nicht gestattet.

Dem Empfänger des Dokuments wird eine einfache, nicht übertragbare, nicht unterlizenzierbare, eingeschränkte Lizenz gewährt, das Dokument für persönliche, nicht kommerzielle, private Zwecke zu nutzen.

Ulm, im Juni 2023

Global Energy Solutions e.V.

Lise-Meitnerstr. 9

89081 Ulm

Vorsitzender: Christof v. Branconi (Christof.Branconi@Global-Energy-Solutions.org)

3.2 Wesentliche Prozessindustrien

3.2.1 Stahl

Die Stahlindustrie ist in allen Teilen der Welt tätig und verarbeitet eine Reihe von Produkten, die im Jahr 2019 für einen Gesamtwert von 2,5 Billionen US-Dollar verkauft wurden. Im Jahr 2017 beschäftigte die Branche weltweit mehr als sechs Millionen Menschen.⁴⁴ Für jeden 1 US-Dollar an Wertschöpfung, der durch die Arbeit in der Stahlindustrie selbst entsteht, werden weitere 2,50 US-Dollar an Wertschöpfung in anderen Sektoren der Weltwirtschaft durch den Kauf von Rohstoffen, Waren, Energie und Dienstleistungen unterstützt. Für jeden zweiten Arbeitsplatz in der Stahlindustrie werden 13 weitere Arbeitsplätze in der gesamten Lieferkette unterstützt – das bedeutet, dass insgesamt etwa 40 Millionen Menschen in der globalen Lieferkette der Stahlindustrie im Jahr 2017 arbeiteten.⁴⁵ Laut dieser Analyse von Oxford Economics trug die globale Stahlindustrie im Jahr 2017 zwischen 4 % und 10 % zum globalen BIP bei.

Der Bausektor ist einer der wichtigsten stahlverarbeitenden Industrien, auf die mehr als 50 % der weltweiten Stahlnachfrage entfallen.⁴⁶ Stahl findet seine Anwendung in einer Reihe wichtiger Infrastrukturen wie Brücken, Offshore-Ölplattformen, Tiefbau- und Baumaschinen, Eisenbahnwaggons, Tanks und Druckbehälter, Kernkraft-, Wärme- und Wasserkraftwerke.

3.2.1.1 Darstellung der globalen Produktionsmengen und Emissionen

Die weltweite Stahlproduktion hat sich in den letzten 50 Jahren mehr als verdreifacht, obwohl Länder wie die USA und Russland ihre heimische Produktion zurückgefahren haben und stärker auf Importe angewiesen sind. In den frühen 1960er Jahren wurde die weltweite Stahlproduktion von den USA, Europa und der USSR dominiert (siehe Abbildung 1). China überholte Anfang der 1990er Jahre Japan und wurde zum führenden Stahlproduzenten. In der Zwischenzeit haben China und Indien ihre Produktion kontinuierlich gesteigert, so dass sie im Jahr 2021 die beiden weltweit größten Stahlproduzenten sind.

⁴⁴ Vgl. Oxford Economics, 2019.

⁴⁵ Vgl. Oxford Economics, 2019.

⁴⁶ Vgl. World Steel Association, 2022.

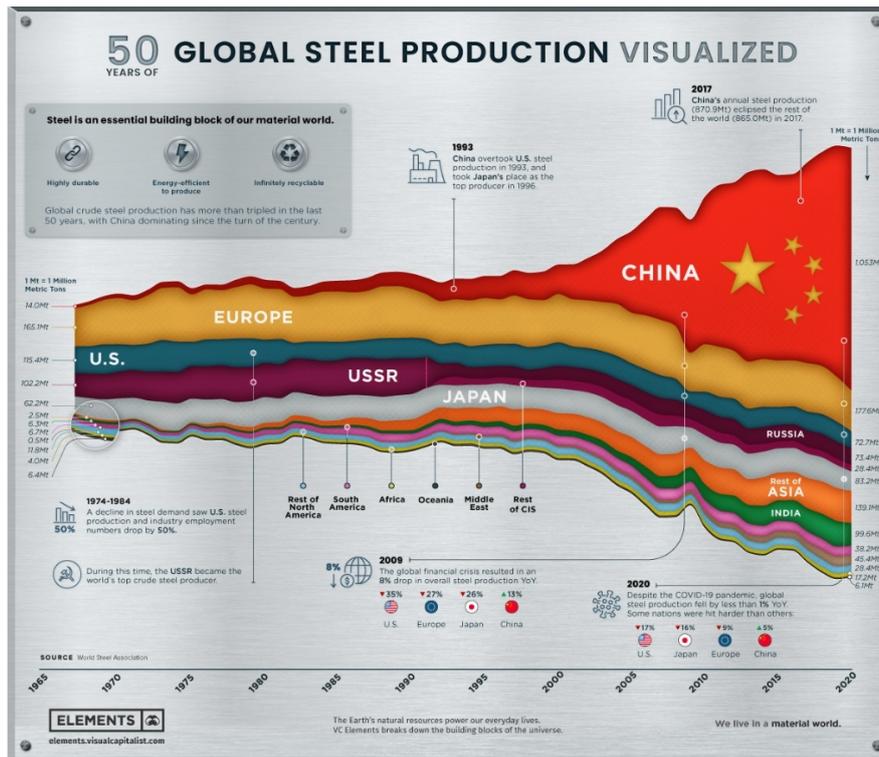


Abbildung 1: Entwicklungen in der globalen Stahlproduktion in den letzten 50 Jahren.

Quelle: Visual Capitalist, 2021.

Die erste Emissionsquelle in der Stahlindustrie ist die Förderung von Eisenerz aus der Erde. Studien gehen von Emissionen zwischen 9 und 13 kg/t Eisenerz aus.⁴⁷ Lebenszyklusanalysen von Bergwerken in China ergaben höhere Emissionen von durchschnittlich 270 kg/t mit einem 90%igen Vertrauensbereich von 210 bis 380 kg/t.⁴⁸

Es gibt vier Haupttypen von Eisenerzlagern: massives Hämatit, das am häufigsten abgebaut wird, Magnetit, Titanmagnetit und pisolitischer Eisenstein.⁴⁹ Für die Gewinnung von Magnetit werden 0,3 GJ/t Erz benötigt und für die Gewinnung von Hämatit die Hälfte davon.⁵⁰ Die Kokserzeugung ist ein wichtiger Bestandteil der integrierten Eisen- und Stahlwerke, die die BF-BOF-Route nutzen, da sie als Reduktionsmittel und Wärmeenergiequelle dient. In modernen Hochöfen werden 460–480 kg Reduktionsmittel pro Tonne von Roheisen benötigt, der weltweite Durchschnitt liegt bei 500 kg/t von Roheisen. In modernen Hochöfen mit zusätzlicher Brennstoffeinspritzung kann der Koksverbrauch weniger als 300 kg/t Roheisen betragen.⁵¹ Koks wird durch mehrstündiges Erhitzen von Kokskohle auf 1000 bis 1200 °C in Koksöfen hergestellt, um flüchtige Verbindungen und Feuchtigkeit auszutreiben. Für jede Tonne Koks werden etwa 3,5 bis 5,0 GJ Energie und etwa 1,6 Tonnen Kokskohle verbraucht. Die Koksproduktion macht etwa 10 % des Energiebedarfs in einer BF-BOF-Anlage aus.

⁴⁷ Emissionen entsprechen den CO₂ Emissionen; vgl. Michael et al., 2018.

⁴⁸ Vgl. Gan & Micheal, 2017.

⁴⁹ Vgl. BHP, 2022.

⁵⁰ Vgl. Engeco, 2021.

⁵¹ Vgl. Industrial Efficiency Technology Database, 2022.

Nach Angaben der World Steel Association (WSA) betrug die Emissionsintensität bei der Herstellung von Stahl aus Eisenerz 1,89 t/t Rohstahl und der Wasserverbrauch 3,3 m³/t Rohstahl.⁵² Je nach dem Stahlproduktionsprozess werden zwischen 10 und 20 GJ pro t Rohstahl zur Herstellung benötigt. Die Gesamtproduktion der Stahlindustrie lag im Jahr 2021 weltweit bei 1.890 Mt Rohstahl und führte zu 2,6 Gt betrieblicher CO₂-Emissionen. Tabelle 1 fasst alle wichtigen Zahlen der Stahlindustrie zusammen.

Parameter	Werte
Emissionen durch Eisenerz Förderung	9–13 kg-CO ₂ /t-Eisenerz In China 270 kg-CO ₂ /t-Eisenerz
Energieverbrauch zur Förderung von Magnetit (Fe ₃ O ₄)	0,3 GJ/t-Eisenerz <ul style="list-style-type: none"> • Förderung durch die Nutzung von Diesel – 41 % • Zerkleinerung – 43 % • Sonstige Verarbeitung – 16 %
Energieverbrauch zur Förderung von Hämatit (Fe ₂ O ₃)	0,15 GJ/t-Eisenerz <ul style="list-style-type: none"> • Förderung durch die Nutzung von Diesel – 90 % • Sonstige Verarbeitung – 10 %
Koksbedarf	Ca. 500 kg-koks/ t-Roheisen
Energiebedarf zur Koks-erzeugung	3 bis GJ/t-koks 1,6 t-kohle/ t-koks
Emissionsintensität von Stahl (2020)	1,89 t-CO ₂ /t-Rohstahl
Energieintensität	Für den Hochofen Ca. 20 GJ/ t-Rohstahl Für die Direktreduktion (Erdgas + E-Ofen) Ca. 15 GJ/ t-Rohstahl, Basis Eisenerz Für die Route (Elektrischer Ofen) Ca. 9 GJ/ t-Rohstahl, Basis Schrott
Wasserverbrauch (2019)	3,3 m ³ /t-Rohstahl
Gesamtstahlproduktion (2021)	1.951 Mt
Gesamtemissionen (2021)	2,6 Gt CO ₂

Tabelle 1: Zusammenfassung wichtiger Zahlen der globalen Stahlindustrie.

⁵² Vgl. World Steel Association, 2022; Wenqiang et al., 2019.

3.2.1.2 Quellen der CO₂-Emissionen

Der erste Schritt in der Eisenmetallurgie ist das Erhitzen des Erzes, um Wasser zu entfernen und die Kalziumkarbonate in Oxide zu zerlegen, das sog. Sintern. Die Oxide werden dann in einem Hochofen reduziert, in den das geröstete Erz (Sinter), Koks und Kalkstein kontinuierlich von oben zugeführt werden.^{53 54} Das geschmolzene Eisen und die Schlacke werden am Boden entnommen. In der Nähe des Bodens eines Ofens befinden sich Düsen, durch die vorgewärmte Luft in den Ofen geblasen wird. Sobald die Luft eintritt, wird der Koks im Bereich der Düsen unter Freisetzung von großer Wärme zu Kohlendioxid oxidiert. Das heiße Kohlendioxid fließt nach oben durch die darüber liegende Schicht aus heißem Koks, wo es zu Kohlenmonoxid reduziert wird. Das Kohlenmonoxid dient als Reduktionsmittel in den oberen Bereichen des Ofens. Im oberen Bereich des Ofens werden die Eisenoxide reduziert. Im mittleren Bereich zersetzt sich Kalkstein, und das dabei entstehende Kalziumoxid verbindet sich mit der Kieselsäure und den Silikaten des Erzes zu Schlacke. Die verschiedenen chemischen Reaktionen, die im Hochofen ablaufen, sind in Abbildung 2 dargestellt.

Die Sauerstoffblasstahlerzeugung, auch bekannt als *Linz-Donawitz-Stahlerzeugung*, ist ein Verfahren der primären Stahlerzeugung, bei dem kohlenstoffreiches geschmolzenes Roheisen aus dem Hochofen zu Stahl verarbeitet wird.⁵⁵ Durch das Einblasen von Sauerstoff in geschmolzenes Roheisen wird der Kohlenstoffgehalt der Legierung gesenkt und in kohlenstoffarmen Stahl umgewandelt. Das *Linz-Donawitz* Verfahren wird in der englischen Sprache als „*Basic Oxygen Furnace*“ bezeichnet, weil Flussmittel aus gebranntem Kalk oder Dolomit, die chemische Basen sind, durch den Boden hinzugefügt werden, um die Entfernung von Verunreinigungen zu fördern und die Auskleidung des Konverters zu schützen.⁵⁶ Der Energiebedarf von BF-BOF* liegt bei 18,8 GJ/t-HRC.⁵⁷

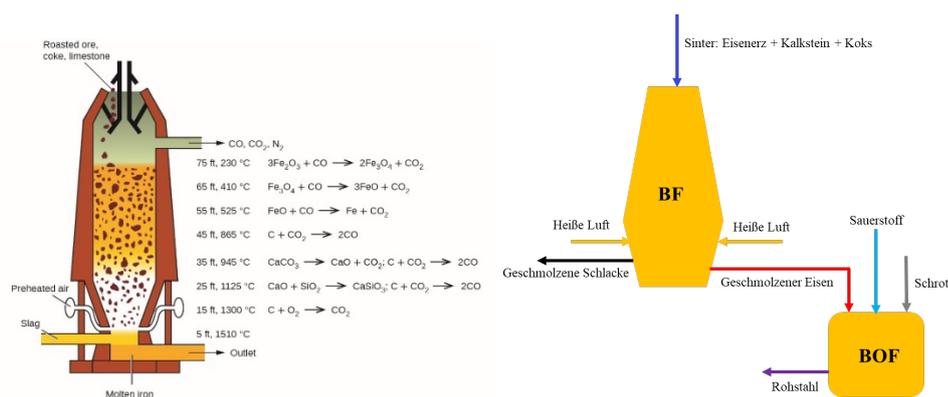


Abbildung 2: Verschiedene chemische Reaktionen in einem Hochofen (links). Zusammenfassung der Hochofen-Sauerstoffaufblaskonverter Route zur Stahlherstellung. BF – Blast Furnace. BOF – Basic Oxygen Furnace.

Quelle: Libretext Chemistry, 2020.

⁵³ BF – Blast Furnace (Hochofen)

⁵⁴ Kalkstein besteht überwiegend aus CaCO₃

⁵⁵ BOF – Basic Oxygen Furnace (Stahlkonverter)

⁵⁶ Vgl. Wikipedia, 2022.

⁵⁷ Vgl. Fabrice & Oliver, 2020.

Unter Direktreduktion von Eisenerz versteht man die Umwandlung von festem Eisenerz (sog. Eisenerzpellets) in metallisches Eisen ohne Umwandlung in die flüssige Phase. Der größte Teil des direkt reduzierten Eisens (DRI) wird durch Reaktion von Eisenoxid mit kohlenwasserstoffbasierten Reduktionsgasen aus der Reformierung von Erdgas oder der Kohlevergasung hergestellt.⁵⁸ Mit der DRI-Technologie werden im Jahr 2020 104 Mt weltweit hergestellt.⁵⁹ Mit dem sinkenden Preis für Schiefergas hat die Errichtung von DRI-Anlagen in den USA einen Aufschwung erlebt.⁶⁰ Für die Direktreduktion von Eisenerz werden Schachtofen, Drehrohröfen, Drehherdöfen und Wirbelschichtreaktoren eingesetzt. Die meisten DRI-Anlagen verwenden die von MIDREX™ und HYL-Energiron entwickelten Schachtofenreaktoren.⁶¹

Ein vereinfachter Prozessablauf der Direktreduktion von Eisenerz ist in Abbildung 3 dargestellt. Das Produkt der Direktreduktion ist Eisenschwamm, der dann zur Weiterverarbeitung in den Elektrolichtbogenofen (EAF) geleitet wird. Etwa ein Viertel des weltweit produzierten Stahls wird nach dem EAF-Verfahren hergestellt,⁶² bei dem mit Hilfe von Hochstromlichtbögen Stahlschrott und/oder Eisenschwamm geschmolzen und in flüssigen Stahl umgewandelt werden. Die externe Lichtbogenbeheizung ermöglicht eine bessere thermische Kontrolle als das Basic-Oxygen-Verfahren.⁶³

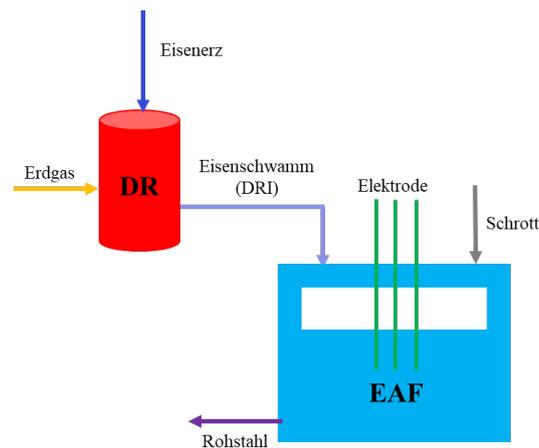


Abbildung 3: Stahlherstellung durch Direktreduktion mit Erdgas und Elektrolichtbogenofen. Quelle: Autor

3.2.1.3 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Etwa 75 % des weltweit produzierten Eisens wird in Hochöfen hergestellt, das in einem Sauerstoffblasofen veredelt wird. Die BF-BOF-Emissionen betragen 1,6–2,0 t-CO₂/t-Stahl, je nach den verwendeten Technologien. Das MIDREX NG™-Direktreduktionsverfahren in Verbindung mit einem

⁵⁸ Syn-Gas

⁵⁹ Vgl. MIDREX®, 2020.

⁶⁰ Vgl. Reuters, 2013.

⁶¹ Vgl. Abhinav et al., 2020.

⁶² Vgl. Britanica, 2021.

⁶³ Vgl. Britanica, 2021.

EAF hat die niedrigsten CO₂-Emissionen aller kommerziell erprobten Stahlerzeugungsrouten auf Basis von Eisenerz mit 1,1–1,2 t-CO₂ /t-Stahl.⁶⁴

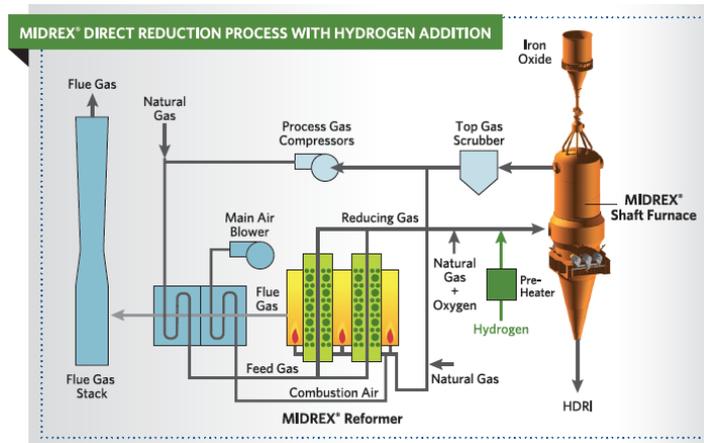


Abbildung 4: Direktreduktion mit MIDREX® Verfahren.

Quelle: MIDREX®, 2022.

Laut Primetals und MIDREX® kann die Direktreduktions-Elektrolichtbogenofen-Route (DR-EAF), bei der Erdgas im DR-Prozess verwendet wird, die Kohlenstoffintensität für Flüssigstahl im Vergleich zur herkömmlichen BF-BOF-Route um 60–70 % senken (siehe Abbildung 5). Durch die Verwendung von „grünem“ Wasserstoff anstelle von Erdgas können die Emissionen auf derselben Route um 85–90 % gegenüber der BF-BOF-Route gesenkt werden.

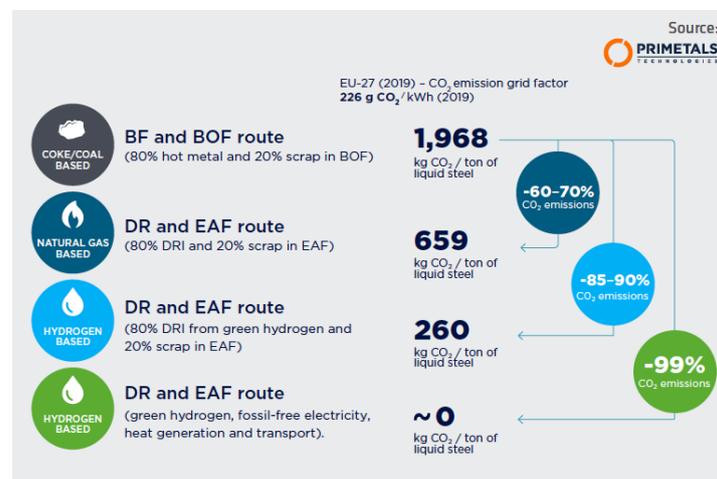


Abbildung 5: Senkung der Emissionen der Stahlproduktion mit der Nutzung des MIDREX®-Verfahrens.

Für die Direktreduktion von Eisenerz mit Wasserstoff werden 54–58 kg-H₂/t-Eisenerz benötigt.⁶⁵ Der durch dieses Verfahren entstehende Eisenschwamm wird in einem Elektrolichtbogenofen geschmolzen. Der Netto-Energiebedarf liegt bei diesem Verfahren zwischen 13 und 15 GJ/ t-HRC.⁶⁶ Der Strombedarf für die Herstellung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse beträgt etwa

⁶⁴ Vgl. MIDREX®, 2020.

⁶⁵ Vgl. Fabrice & Oliver, 2020.

⁶⁶ Vgl. Fabrice & Oliver, 2020. HRC – Hot Rolled Steel

50 kWh/kg H₂. Falls genügend grüner Strom auch zum Betrieb des E-Ofens verfügbar wäre, würden die CO₂-Emissionen praktisch vollständig eliminiert.

Das Abgas aus dem Hochofen enthält in der Regel etwa 20–30 % Kohlenmonoxid und etwa 2–6 % Wasserstoff als brennbare Bestandteile sowie eine beträchtliche Menge an Inertgasen mit etwa 45–60 % Stickstoff und 20–25 % Kohlendioxid.^{67 68} Aufgrund des hohen Inertgasanteils und des bereits relativ niedrigen Heizwerts der brennbaren Hauptkomponente CO hat es einen unteren Heizwert im Bereich von 3–4 MJ/m³.⁶⁹ Bisher liegen erst wenige Erfahrungen mit dem Einsatz der Carbon Capture Technologie am Hochofen vor. Da diese Stahlherstellungsrouten jedoch auch langfristig mit einem Anteil von heute ca. 70 % an der Roheisenherstellung als die Bedeutsamste angesehen wird, sind Entwicklungsarbeiten zum Einsatz von Carbon Capture-Technologie am Hochofen von essenzieller Bedeutung. ArcelorMittal, BHP und Mitsubishi Heavy Industries haben hierzu kürzlich eine Entwicklungszusammenarbeit publiziert.⁷⁰

Anwendungsbeispiele

Bekanntere Unternehmen wie ArcelorMittal, Voestalpine, Tata Steel, SSAB und ThyssenKrupp haben Projekte, die bis 2030 in Betrieb genommen werden sollen, um vor allem in Europa kohlenstoffarmen Stahl zu produzieren, indem Erdgas in Direktreduktionsöfen durch grünen Wasserstoff ersetzt wird. Darüber hinaus haben ThyssenKrupp und ArcelorMittal Projekte in Duisburg bzw. Dünkirchen angekündigt, bei denen blauer Wasserstoff für die Direktreduktion von Eisenerz eingesetzt werden soll. Salzgitter hat ebenfalls Demoprojekte zur Herstellung von grünem Stahl mit grünem Wasserstoff geplant. Eine umfassende Liste der angekündigten Projekte für Produktion des kohlenstoffarmen Stahls ist in Anhang 2 aufgeführt.

3.2.1.4 Entwicklungsrelevanz

Laut IEA wird die weltweite Stahlnachfrage bis 2050 voraussichtlich um mehr als ein Drittel steigen⁷¹. Die Covid-19-Krise hat die globalen Lieferketten erschüttert und zu einem geschätzten Rückgang der weltweiten Rohstahlproduktion um 5 % im Jahr 2020 im Vergleich zu 2019 geführt. Die prozessbedingten Emissionen können durch die Verwendung von grünem Wasserstoff, Erdgas mit geringem Methanaustritt und den Einsatz von Kohlenstoffabscheidung und -sequestrierung verringert werden. Dies erfordert die groß angelegte Installation von Wind- und Solarkraftwerken zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, den Aufbau einer Infrastruktur für den Wasserstofftransport und die

⁶⁷ Blast Furnace

⁶⁸ Vgl. Huth & Heilos, 2013.

⁶⁹ Unterer Heizwert von Methan – 35,8 MJ/Nm³

⁷⁰ Vgl. Business Green, 2022.

⁷¹ Vgl. IEA, 2021.

Einführung einer CO₂-Bepreisung, um Unternehmen zur Einführung umweltfreundlicher Alternativen für die Stahlproduktion zu bewegen.⁷² Bei dieser Aufgabe können die Industrieländer die Einführung dieser Alternativen durch Know-how-Transfer erleichtern.

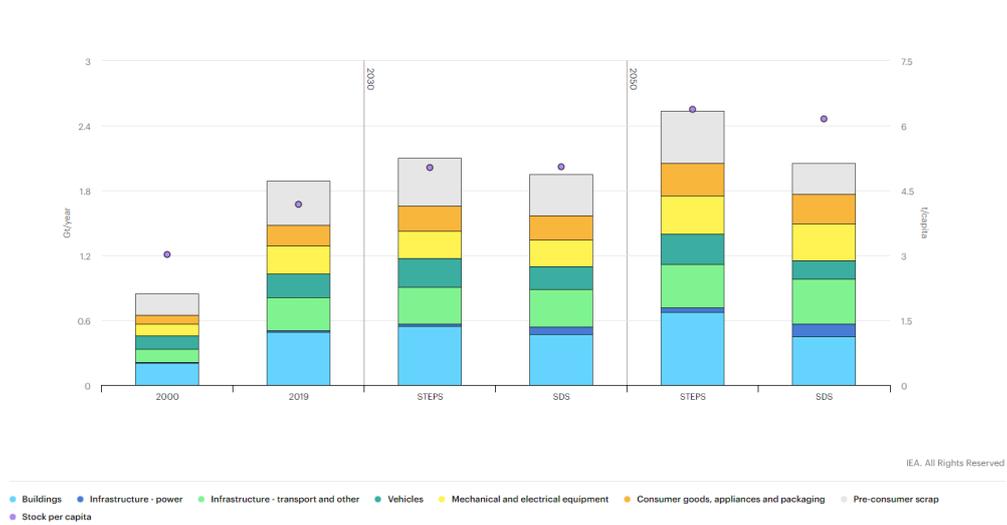


Abbildung 6: Globale Stahlnachfrage im Jahr 2050 laut IEA in Stated Policies und Sustainable Development Szenarien.

Quelle: IEA, 2021.

Die genannten technischen Maßnahmen tragen jedoch kaum dazu bei, die Umweltzerstörung, die Wasserverschmutzung und den Verlust der biologischen Vielfalt durch den Eisenerzabbau zu verringern. In einer Studie untersuchten die Autoren die räumliche und zeitliche Verteilung des Abbaus von neun Metallerzen in rund 3.000 Abbaustätten weltweit zwischen 2000 und 2019.⁷³

Es zeigte sich, dass 79 % des globalen Metallerzabbaus im Jahr 2019 aus fünf der sechs artenreichsten Biome stammten, wobei sich das Abbauvolumen in tropischen Feuchtwaldökosystemen seit 2000 verdoppelt hat.⁷⁴ Chhattisgarh zum Beispiel beherbergt einige der wertvollsten Wälder Indiens, ist aber auch ein Gebiet, das reich an Mineralien wie Eisenerz ist. Der Wettlauf um den Abbau dieser Ressourcen verschlingt jedoch diese Wälder. Aus den jüngsten Daten der Forstbehörde von Chhattisgarh geht hervor, dass in den letzten Jahren mindestens 4.920 Hektar Waldfläche in dem zentralindischen Bundesstaat für den Abbau von Eisenerz abgeholzt wurden.⁷⁵

3.2.2 Zement

3.2.2.1 Darstellung der globalen Produktionsmengen und Emissionen

Einer der wichtigsten Baustoffe der modernen Welt ist Beton. Für die Herstellung von Beton wird neben Kies, Sand und Wasser auch Zement als Bindemittel benötigt. Obwohl der Zement nur einen

⁷² Vgl. Argus, 2022.

⁷³ Bauxit, Kupfer, Gold, Eisen, Blei, Mangan, Nickel, Silber und Zink

⁷⁴ Vgl. Luckeneder et.al., 2021.

⁷⁵ Vgl. Mongaby, 2021.

geringen Anteil an Betonmischungen ausmacht (etwa 12 vol%), ist er fast ausschließlich für die entstehenden CO₂-Emissionen verantwortlich.

Seit 1990 hat sich die weltweite Produktion von Zement von etwas über 1 Gt auf mehr als 4 Gt vervierfacht. Im Jahr 2021 wurden weltweit knapp 4,3 Gt Zement produziert. Seit 2014 hat sich Produktion und Verbrauch von Zement stabilisiert und wächst global nur noch langsam (Abbildung 7).

China dominiert die weltweite Produktion von Zement mit über 50 % der produzierten Mengen. Das Land hat seit 1990 etwa zwei Drittel des gesamten Zements weltweit produziert und für die rapide Industrialisierung und Urbanisierung des Landes verwendet. Allein zwischen 2011 bis 2013 hat China mehr Zement verbraucht als die USA im gesamten 20. Jahrhundert. Derzeit stagniert die chinesische Produktion oder nimmt gar leicht ab (Abbildung 8). Indien ist zweitgrößter Produzent mit 8 % der Mengen.⁷⁶

Vor allem die europäischen und nordamerikanischen Zementwerke sind oft schon über 30 Jahre alt, während die Anlagen in China und weiteren Schwellenländern noch relativ jung sind (Abbildung 9).

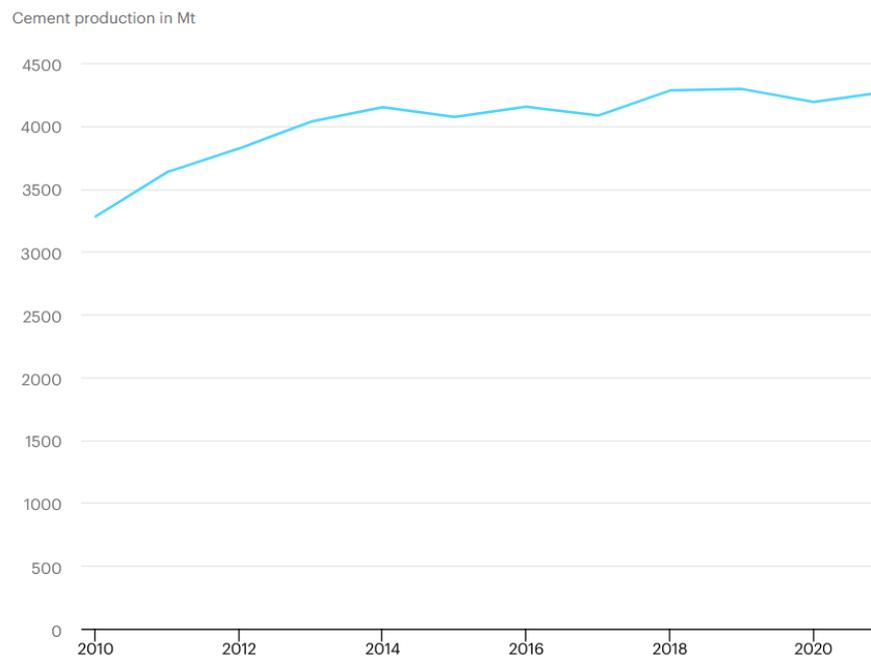


Abbildung 7: Weltweite Zementproduktion 2010–2021.

Quelle: IEA, 2022a.

⁷⁶ Vgl. IEA, 2022a.

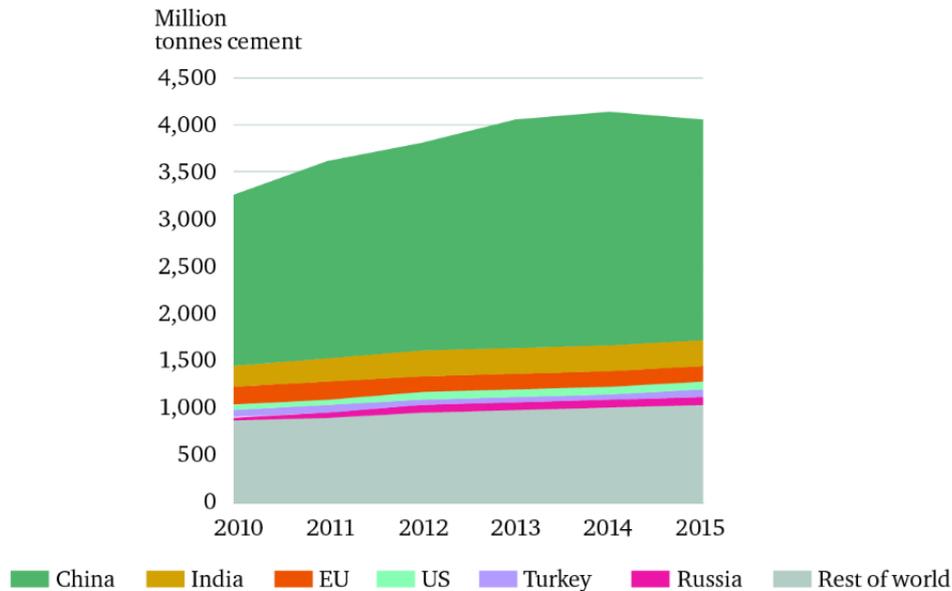


Abbildung 8: Zementproduktion und CO₂-Emissionen nach Land (2010–2015).

Quelle: CarbonBrief, 2018.⁷⁷

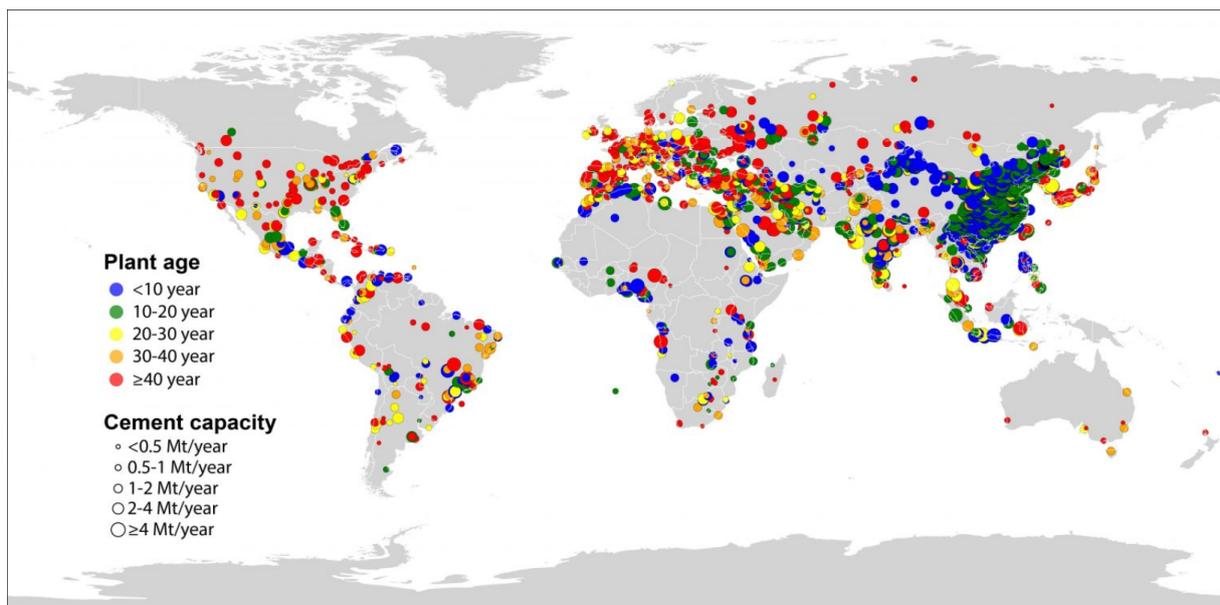


Abbildung 9: Globale Zementproduktionsinfrastruktur in 2019.

Quelle: Global Infrastructure Emission Database, 2021.

Besonders könnte die Produktion von Zement in Indien und anderen Schwellenländern weiter zunehmen. Ein Anstieg um bis zu 25 % auf über 5 Gt bis 2050 ist möglich (Abbildung 10). Dabei nimmt der Anteil von Indien, Afrika und pazifischen Staaten zu. Im Net Zero Szenario der IEA wird jedoch bis 2030 von stagnierenden Zementverbräuchen von etwa 4,3 Gt ausgegangen. Gründe hierfür liegen in der höheren Bau- und Materialeffizienz, wie auch der Nutzung alternativer Baumaterialien.

⁷⁷ Die angegebenen CO₂-Emissionen betreffen nur die prozessbedingten Emissionen in der Zementproduktion, jedoch nicht die brennstoffbedingten Emissionen. Die Gesamtemissionen aus der Zementproduktion liegen um den Faktor 2 höher.

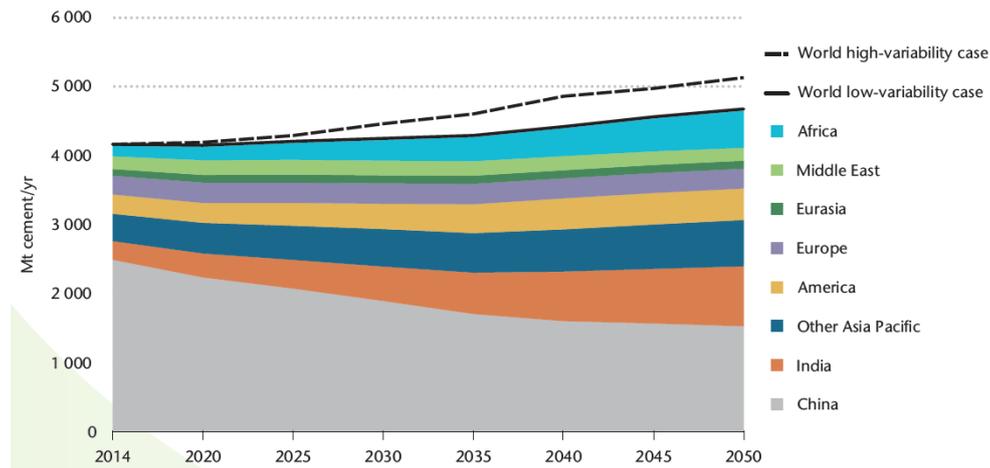


Abbildung 10: Zementproduktion 1990 bis 2006 und Prognose bis 2050.

Quelle: IEA und Cement Sustainability Initiative, 2018.

Seit 1990 haben sich die CO₂-Emissionen aus der Zementindustrie mehr als verdreifacht und sind von 0,86 Gt auf fast 2,9 Gt im Jahr 2021 gestiegen (Abbildung 11). Dies entspricht 6–8 % der weltweiten CO₂-Emissionen. Somit ist die Zementproduktion eine der größten Quellen von Treibhausgasemissionen.⁷⁸

Die Produktion einer Tonne Zement hat CO₂-Emissionen zwischen 0,65 t und 0,95 t zur Folge. Effizienzunterschiede bei den Herstellern, die Verwendung unterschiedlicher Brennstoffe, die Art des hergestellten Zements oder auch die Systemgrenzen bei Berechnung führt zu den Unterschieden in der spezifischen CO₂-Intensität der Zementproduktion. Die CO₂-Intensität der Zementproduktion hat seit 1990 global um 18 % abgenommen,⁷⁹ in Deutschland sogar um 22 %.⁸⁰ Global betrachtet liegen die durchschnittlichen CO₂-Emissionen pro Tonne Zement jedoch um 20 % höher als bei der Produktion mit der besten verfügbaren Technologie.⁸¹ Dies bedeutet, dass allein mit heute verfügbarer Technologie eine Emissionseinsparung in der Zementproduktion von etwa einem Fünftel möglich wäre.

⁷⁸ Wäre die Zementproduktion ein Land, wäre sie drittgrößter CO₂-Emittent nach China und den USA.

⁷⁹ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

⁸⁰ Vgl. VDZ, 2022.

⁸¹ Vgl. CarbonBrief, 2018.

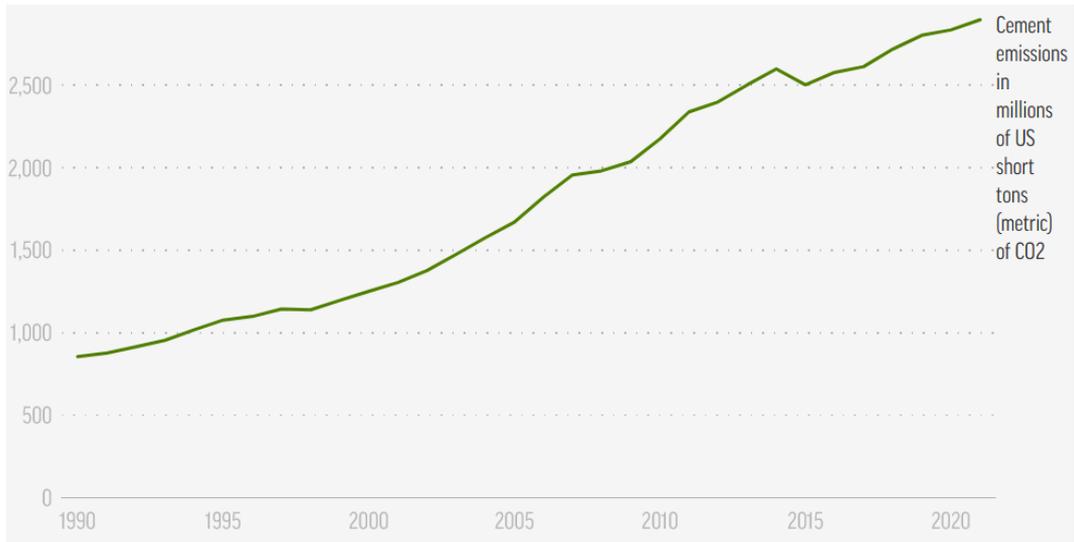


Abbildung 11: Weltweite CO₂-Emissionen der Zementproduktion (energie- und prozessbedingt) in MST (Million Short Tons).

Quelle: Borenstein, 2022.

Die wichtigsten energetischen und emissionsbedingten Parameter der Zementproduktion sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Parameter	Werte
Emissionen und Energieverbrauch (Förderung bis Ofen)	185 MJ/Tonne Zement 28 kg CO ₂ /Tonne Zement
Emissionen und Energieverbrauch (Kalzinierung im Ofen)	3150 MJ/Tonne Zement Kalzinierung: 479 kg CO ₂ /Tonne Zement (prozessbedingt) Brennstoffe: 319 kgCO ₂ /Tonne Zement (energiebedingt)
Emissionen und Energieverbrauch (Kühler bis Transport Endprodukt)	560 MJ/Tonne Zement 99 kg CO ₂ /Tonne Zement
Emissionsintensität von Zement (2020)	650–950 kg CO ₂ /Tonne Zement (je nach Zementart und Brennstoffen)
Zementproduktion (2021)	4.270 Mt
Gesamtemissionen (2021)	2.897 Mt

Tabelle 2: Energie- und emissionsbedingte Parameter der Zementproduktion.

3.2.2.2 Quellen der CO₂-Emissionen

Grundsätzlich werden nur die direkt mit der Zement-/Betonherzeugung zusammenhängenden Emissionen betrachtet (Scope 1). Indirekte Emissionen (Scope 2, 3) wie z.B. Logistik werden nur kurz angerissen, bleiben aber für die Emissionsminderungsstrategien an dieser Stelle unberücksichtigt.

Die wichtigsten Rohstoffe für Zement sind Kalkstein, Kalkmergel, Kreide, Sand, Gips, Ton und diverse andere Zuschlagstoffe. Die Rohstoffe werden gemahlen und anschließend zu Zementklinkern gesintert. Die Klinkerherstellung ist der energieintensivste und mit den höchsten CO₂-Emissionen verbundene Herstellungsschritt. Bei diesem Schritt wird das Kalziumkarbonat des Kalksteines in

Kalziumoxid umgewandelt. Maßgeblich zwei Prozesse verursachen also die hohen Treibhausgasemissionen bei der Produktion von Zement:

- Energiebedingte Emissionen aus dem Brennstoffverbrauch für den Brennvorgang: 30–40 % der Gesamtemissionen
- Prozessbedingte Freisetzung von CO₂ während der Entsäuerung des Kalksteins: 50–60 % der Gesamtemissionen (CaCO₃ + Wärme → CaO + CO₂)

Etwa 10 % der Emissionen der Zementwertschöpfungskette stammen aus dem Abbau, dem Mahlen und dem Transport der Materialien. Entlang der Wertschöpfungskette der Zementindustrie gibt es unterschiedliche Prozesse bei welchen CO₂-Emissionen entstehen. Abbildung 12 stellt die Prozessschritte sowie deren spezifische Energiebedarfe und Emissionen dar.

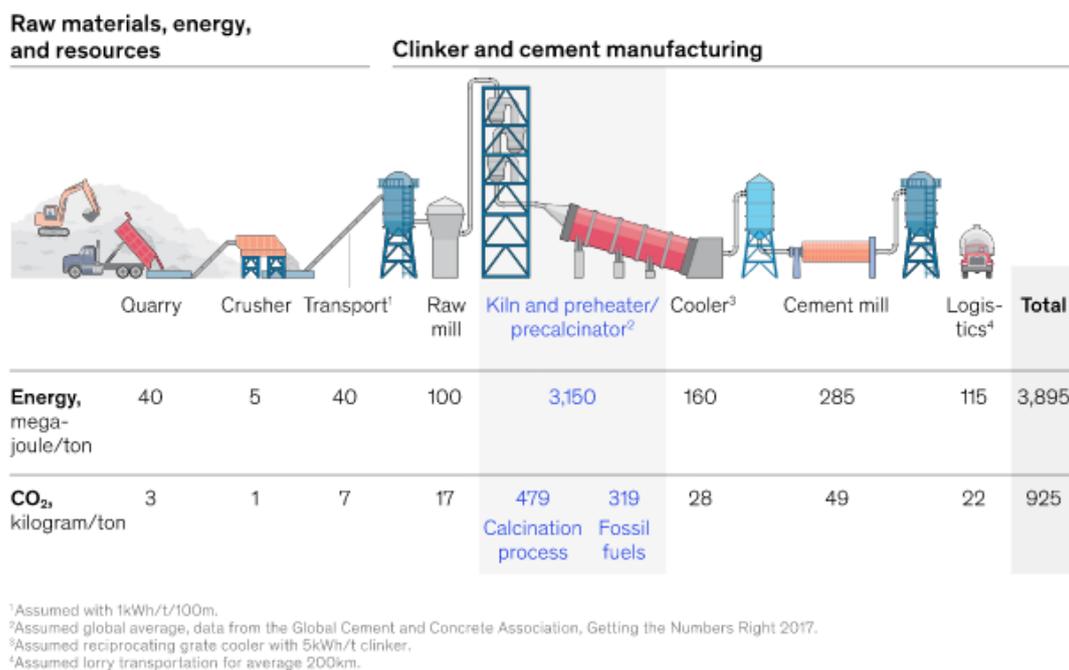


Abbildung 12: Prozess der Zementproduktion mit spezifischen Energieverbräuchen und CO₂-Emissionen der einzelnen Prozessschritte.

Quelle: McKinsey, 2020.

Zuerst wird Kalkstein in Steinbrüchen abgebaut und anschließend zerkleinert. Das Rohmaterial wird dann in Drehrohröfen bei sehr hohen Temperaturen von etwa 1450 °C zu Zementklinker gebrannt. Dabei bilden sich die chemischen Eigenschaften aus, die dem Zement seine Leistungsfähigkeit sowie dem späteren Beton seine hohe Stabilität verleihen. Während des Brennvorgangs entstehen prozessbedingte CO₂-Emissionen bei der Kalzinierung des Kalksteins zu Branntkalk, einer Vorstufe des Zementklinkers. Klinker wird anschließend unter Zusatz weiterer Zuschlagstoffe wie Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und Gips zum Endprodukt vermahlen. Um Zementsorten mit bestimmten Eigenschaften zu erhalten, können vor dem Mahlen Hüttensand, Flugasche, Kalkstein und Gips in unterschiedlicher Dosierung und Mahlfeinheit zugegeben werden. Anschließend wird der

Zement zu den Verwendungsstellen transportiert. Klar ersichtlich sind die hohen Anteile des Ofens und des Kalzinierungsprozesses am Energieverbrauch und an den CO₂-Emissionen.

Eine weitere Darstellung der CO₂-Emissionen in der Zementwertschöpfungskette ist in Abbildung 13 zu sehen. Neben den Prozessschritten der Zementproduktion und den entstehenden CO₂-Emissionen werden auch mögliche Lösungsansätze für die Minderung der CO₂-Emissionen gezeigt.

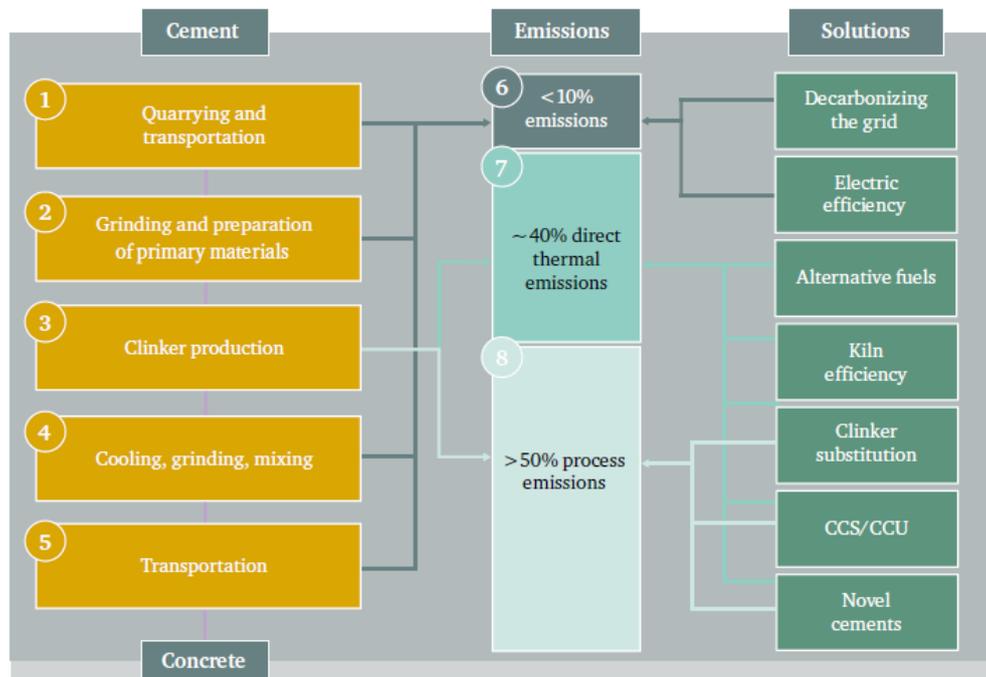


Abbildung 13: Schritte der Zementproduktion, CO₂-Emissionen und mögliche Lösungsansätze für CO₂-Emissionsminderung.

Quelle: Lehne & Preston, 2018.

3.2.2.3 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Die Reduktion der CO₂-Emissionen in der Produktion von Zement sind für ein klimaneutrales Energiesystem von großer Bedeutung. Die Zementindustrie verfolgt dabei vor allem fünf Pfade:⁸²

- Erhöhte thermische und elektrische Effizienz in allen Prozessschritten (Abbau, Transport, Brennung, Mahlen)
- Nutzung alternativer Brennstoffe (Wechsel von fossilen Brennstoffen wie Kohle zu Biomasse oder Abfällen)
- Substitution des Zementklinkers mit anderen Stoffen (Flugasche, Kalkstein oder granuliert Hochofenschlacke)

⁸² Vgl. Lehne & Preston, 2018; McKinsey, 2020; VDZ, 2022; Global Cement and Concrete Association, 2021.

- Kohlenstoffabscheidung, -speicherung und -nutzung (CCUS) für prozessbedingte Emissionen
- Entwicklung neuer Zement- und Betonarten (Ersatz des Klinkerzements mit kohlenstoffarmen Stoffen mit ähnlichen Eigenschaften)

Fortschritte in den ersten drei Pfaden haben die CO₂-Emissionen der globalen Zementindustrie seit 1990 um 18 % geringer ausfallen lassen als ohne die Fortschritte. Die Entwicklung von CCUS in der Zementindustrie, sowie die Entwicklung von Ersatzstoffen für Zement befindet sich noch im Entwicklungsstadium.

Thermische und elektrische Effizienz

Der erste Hebel zur Emissionsreduktion besteht darin, die Öfen und Anlagen so zu verbessern, dass weniger Energie zur Herstellung von Zement benötigt wird, um Zement zu produzieren. Eine Änderung des Anlagenkonzepts, die Umstellung auf Trockenöfen mit höherem Wirkungsgrad, Aufrüstung von Motoren und Mühlen sowie der Einsatz von Antrieben mit variabler Drehzahl können den Energieverbrauch und die Kosten erheblich senken. Unternehmen setzen zunehmend Geräte zur Verfolgung und Überwachung des Betriebs ein und können somit ihren Produktionsprozess effizienter gestalten. Effizientere Mahlprozesse können zu Stromeinsparungen führen, was sich positiv auf die gesamte Energieeffizienz auswirkt.⁸³ Die Verwendung erneuerbaren Stroms für die elektrischen Verbraucher erlaubt ebenfalls eine Emissionsreduktion. Auch die Optimierung der Abwärmenutzung kann die Betriebskosten von Zementwerken um 10 bis 15 % senken.⁸⁴

Obwohl die Industrie stark in die Optimierung von Produktionsprozessen investiert hat, bleibt eine Effizienzlücke bestehen. Die Herstellung von Zement nach der derzeit besten verfügbaren Technologie (BVT) und der Praxis ergibt einen thermischen Energieverbrauch von etwa 2,9 GJ/Tonne Klinker. Im Vergleich dazu lag der weltweite Durchschnitt im Jahr 2014 bei 3,5 GJ/Tonne Klinker und somit um knapp 20 % darüber. Die Effizienzlücke spiegelt weitgehend den Einsatz älterer Anlagen in Europa und den USA wider. Unterdessen ist die indische Zementindustrie eine der energieeffizientesten der Welt mit einem durchschnittlichen thermischen Energieverbrauch von etwa 3,0 GJ/Tonne Klinker.⁸⁵

Nutzung alternativer Brennstoffe

Die zweite Möglichkeit die Emissionen in der Zementproduktion zu reduzieren, liegt in der Umstellung von fossilen Brennstoffen auf Alternativen wie Biomasse und Abfall. In vielen Fällen wird hauptsächlich Kohle als Brennstoff verwendet, aber Zementöfen können ebenfalls Biomasse und Abfälle

⁸³ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

⁸⁴ Vgl. IFC, 2014.

⁸⁵ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

anstelle von fossilen Brennstoffen verbrennen, da die hohe Verarbeitungstemperatur und das Vorhandensein von Kalkstein die freigesetzten Gase reinigen. Die Art des verwendeten alternativen Brennstoffs hängt jedoch von der lokalen Verfügbarkeit und der Qualität der Alternativen ab. Häufig liegen diese außerhalb der unmittelbaren Kontrolle der Zementhersteller. Die Verwendung alternativer Brennstoffe bei der Zementherstellung in verschiedenen Regionen ist in Tabelle 3 dargestellt.⁸⁶

Region	Europa	Nord-amerika	China, Südkorea und Japan	Indien
Anteil alternativer Brennstoffe	43 %	15 %	8 %	3 %

Tabelle 3: Verwendung alternativer Brennstoffe in der Zementproduktion nach Region.

Quelle: Lehne & Preston, 2018.

Durch den Einsatz alternativer Brennstoff kann insbesondere in Schwellenländern wie China und Indien noch eine starke Emissionsreduktion stattfinden. Es gibt jedoch auch noch Spielraum für Verbesserungen in Europa. Ein durchschnittliches Zementwerk könnte hier etwa 60 % seines Brennstoffs durch Alternativen ersetzen. Einige europäische Hersteller arbeiten bereits über längere Zeiträume mit mehr als 90 % Abfallbrennstoffen.⁸⁷

Substitution des Zementklinker mit anderen Stoffen

Auch die verwendete Menge von Zementklinker kann reduziert werden durch die Substitution mit Klinkerersatzstoffe wie Flugasche, granulierter Hochofenschlacke und Kalkstein. Wie viel Klinkerersatz dem Zement oder Beton beigemischt werden kann, hängt von der Art des Ersatzstoffes und der gewünschten Betongüte ab. Einige Ersatzstoffe – z. B. granuliert Hochofenschlacke – ermöglichen theoretisch Substitutionsgrade von über 70 %, wodurch die Emissionen bei der Herstellung um über 60 % gesenkt werden könnten.⁸⁸

Bislang hat die Substitution von Klinker gegenüber den 1980er Jahren im Durchschnitt zu einer Verringerung der CO₂-Emissionen pro Tonne Zement um 20–30 % beigetragen. Während der Rückgang des Klinkerverbrauchs in den 1990er Jahren stärker war, hat er sich in letzter Zeit eingependelt oder ist gar wieder leicht gestiegen (Abbildung 14).⁸⁹

In den meisten Regionen gibt es noch erheblichen Spielraum für Verbesserungen, wie das in der 2018 Technology Roadmap festgelegte Ziel zeigt: Bis 2050 soll global ein durchschnittlicher Klinkeranteil von 0,60 erreichen werden.⁹⁰ Die Haupthindernisse für die Substitution von Klinker sind in

⁸⁶ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

⁸⁷ Vgl. Ecofys & Cembureau, 2016.

⁸⁸ Vgl. Schuldyakov et al., 2016.

⁸⁹ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

⁹⁰ Vgl. IEA and Cement Sustainability Initiative, 2018.

der Regel die Zementqualität, Verfügbarkeit und Kosten der Ersatzstoffe je nach Region, die Verbraucherakzeptanz sowie Normen und Vorschriften.

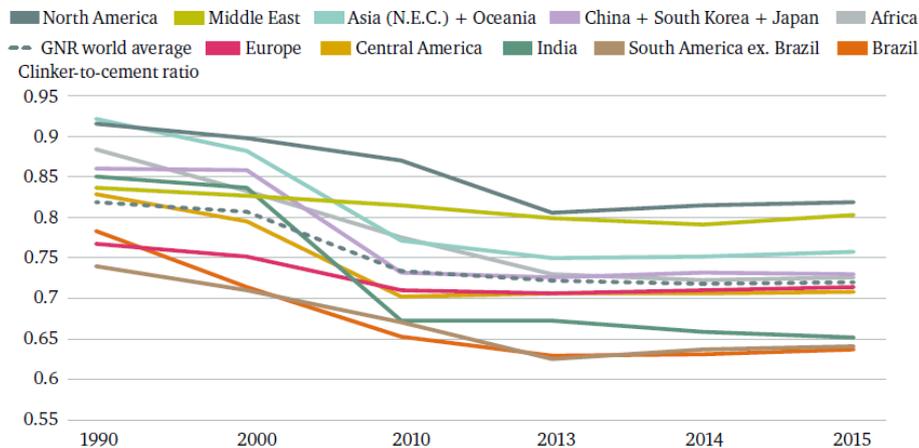


Abbildung 14: Klinker-zu-Zement-Anteil in unterschiedlichen Regionen (1990–2015).

Quelle: Lehne & Preston, 2018.

CCUS (siehe auch Kapitel 2.8)

Da die Prozessemissionen beim Erhitzen von Kalkstein zur Klinkerherstellung nicht durch einen einfachen Wechsel des Brennstoffs und einer Verbesserung der Energieeffizienz vermieden werden können, ist die Anwendung von Technologien zur Abscheidung von CO₂ unumgänglich. Selbst bei einer groß angelegten Substitution von Zementklinker in großem Maßstab würden die Emissionen aus dem Anteil des Klinkers, der weiterhin produziert wird, eine Herausforderung darstellen. Generell wird bei bestehenden und älteren Anlagen (vergleiche Abbildung 9) der Fokus auf end-of-pipe-Technologien wie CCS gesetzt, da der Kostendruck keine Entwicklung und nicht den Bau völlig neuartiger Anlagen erlaubt. Bei der Abscheidung von CO₂ in der Zementproduktion ist mit Kosten von 40–70 USD/t CO₂ zu rechnen.⁹¹

Die Zementindustrie hat sich an mehreren Projekten zur Entwicklung von CCUS beteiligt. Allerdings verlief wie in anderen Sektoren auch, die Entwicklung von CCUS bis 2020 nur langsam. Die meisten CCS-Technologien und -Anwendungen befinden sich noch in der Grundlagenforschung oder im Demonstrationsstadium (eine gute Zusammenstellung von CCS-Anwendungen in der Zementproduktion sind bei Plaza et. al zu finden). Bei Nutzung von Pre-Combustion CCS-Anlagen wäre nur die Abscheidung von Brennstoffemissionen möglich. Da jedoch auch die Abscheidung prozessbedingter Emissionen bei der Kalzinierung relevant ist, sind CCS-Verfahren, wie Post-Combustion oder Oxyfuel erfolgversprechender.⁹²

⁹¹ Vgl. CCS Institute, 2021.

⁹² Vgl. Plaza et al., 2020.

Post-Combustion

Konventionelle Öfen bestehender und neuer Zementwerke können mit Post-Combustion-CO₂-Abscheidungstechnologien nachgerüstet werden, ohne den Zementherstellungsprozess wesentlich zu verändern. Lediglich die Energiemanagementstrategien sowie die An- und Abfahrverfahren wären davon betroffen. Die Tatsache, dass viele Anlagen noch einige Jahre Lebensdauer vor sich haben (erwartete Lebensdauer 30–50 Jahre), verstärken das Potenzial von Post-Combustion-Abscheidungstechnologien insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern mit Anlagen geringen Alters. Verschiedene Technologien zur Abscheidung der Ofengas können verwendet werden. Insbesondere die chemische Absorption durch Aminwäsche (Abbildung 15), Membranen und die Sorption an Feststoffen wird dabei in Demonstrationsanlagen verwendet.⁹³

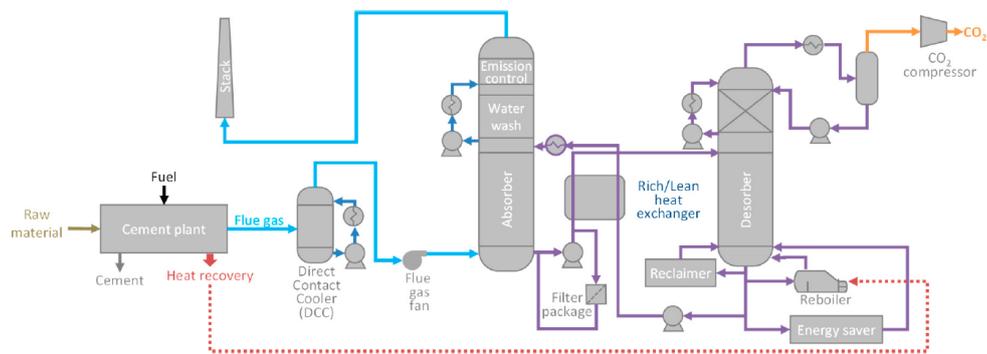


Abbildung 15: Schema eines Zementwerks mit Abscheidungsprozess von CO₂ mit Aminwäsche.

Quelle: Plaza et al., 2020.

Oxyfuel-Verfahren (siehe auch Kapitel 2.8)

Beim Oxyfuel-Verfahren wird anstatt Luft, reiner Sauerstoff für den Verbrennungsprozess genutzt. Dadurch besteht das Verbrennabgas zu großen Anteilen aus CO₂, welches dann einfacher abgeschieden werden kann (Abbildung 16). Die Oxyfuel-Verbrennung verbessert die Brennstoffeffizienz, setzt jedoch den Neubau und die Umgestaltung des Zementwerks voraus, um den Lufteintritt zu minimieren und das Wärmerückgewinnungssystem zu optimieren. Die wichtigsten wirtschaftlichen und energetischen Nachteile ergeben sich aus dem Bedarf an einer Luftzerlegungsanlage und der Notwendigkeit, neue Öfen, die an die Bedingungen der Oxyfuel-Verbrennung angepasst sind, zu entwickeln.⁹⁴

⁹³ Vgl. Plaza et al., 2020.

⁹⁴ Vgl. Plaza et al., 2020.

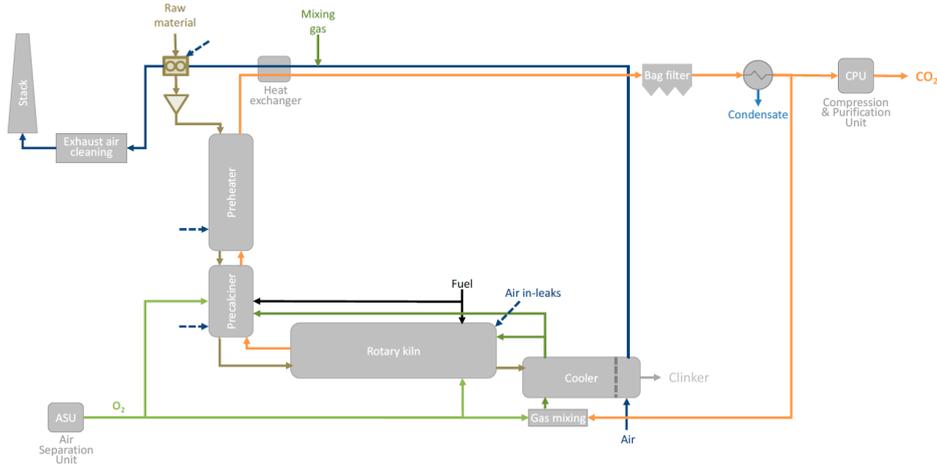


Abbildung 16: Schema eines Zementwerks mit Oxyfuel-Verfahren zur CO₂-Abscheidung.

Quelle: Plaza et al., 2020.

Kalzium-Looping

Kalzium (Calcium)-Looping (CaL) ist eine der vielversprechendsten CO₂-Abscheidungstechnologien für den Zementsektor. CaL basiert auf der reversiblen Karbonisierung in zwei miteinander verbundenen Reaktoren: einem Karbonator und einem Kalzinator. Dabei wird eine Reaktion genutzt, die bei mittleren Temperaturen zwischen Kalk (CaO) und CO₂ stattfindet, um Kalkstein (CaCO₃) zu bilden. Bei höheren Temperaturen kann die Reaktion umgekehrt werden, um reines CO₂ freizusetzen. Im Karbonator wird CaO mit dem CO₂-haltigen Rauchgas bei 600–700 °C in Kontakt gebracht. Das gebildete CaCO₃ wird dann in den Kalzinierungsreaktor geleitet, wo es auf 890–930 °C erhitzt wird, um das CO₂ zurückzugewinnen. Anschließend wird das abgetrennte CO₂ gereinigt und kann konzentriert weitertransportiert werden. Das regenerierte CaO wird in den Karbonator-Reaktor zurückgeführt.⁹⁵

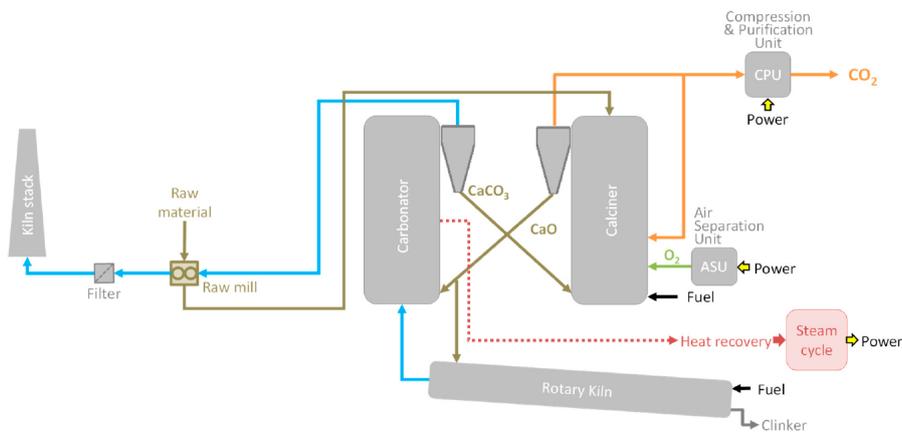


Abbildung 17: Schema des Kalzium Loopings.

Quelle: Plaza et al., 2020.

⁹⁵ Vgl. Plaza et al., 2020; Fransson & Detert, 2014.

Direkte Abscheidung

Eine weitere Möglichkeit CO₂-Emissionen in der Zementproduktion abzuscheiden, bietet die direkte Abscheidung. Dabei wird ein herkömmlicher Kalzinator so umgestaltet, dass der Kalkstein indirekt erhitzt wird (Abbildung 18). Der Direktabscheider-Reaktor, im Prinzip ein spezielles Stahlrohr fungiert als großer Wärmetauscher. Auf diese Weise kommen die Prozessemissionen, die bei der Kalzinierung von Kalkstein entstehen nicht in Kontakt mit den Emissionen aus der Brennstoffverbrennung. Die letzteren könnten ebenfalls mit anderen CCS-Technologien abgeschieden werden. Der Hauptvorteil der Technologie ist der geringe Energieaufwand, der nur mit den Wärmeverlusten zusammenhängt. Andererseits besteht die größte Herausforderung in der notwendig hohen Temperatur für die Kalzinierung von Kalkstein.⁹⁶

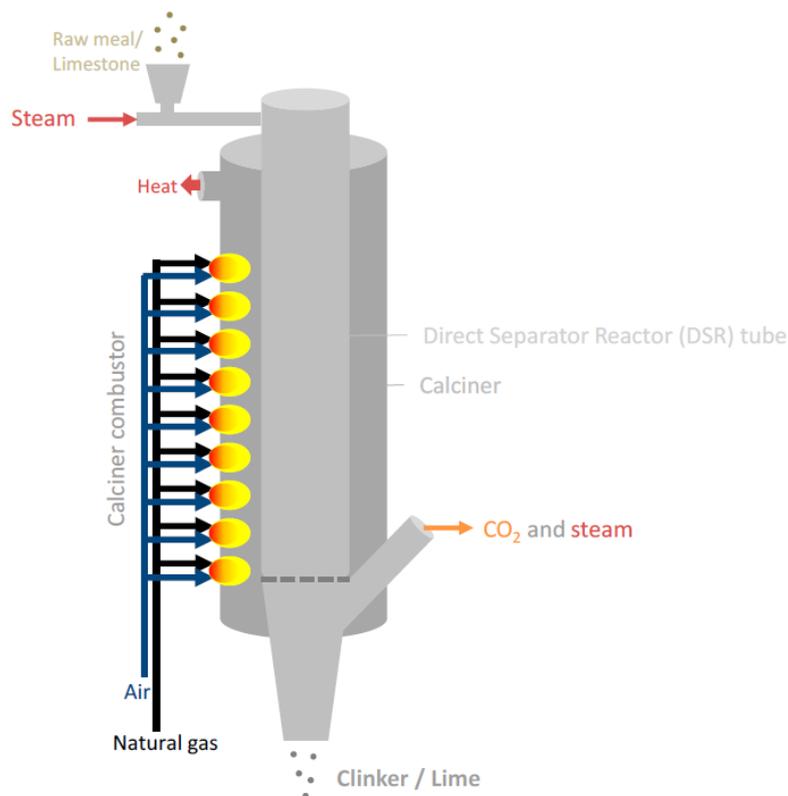


Abbildung 18: Schema der direkten Abscheidung (LEILAC).

Quelle: Plaza et al., 2020.

Haupt Hindernisse für die großtechnische Anwendung von CCS waren bisher die höheren Kosten durch Abscheidung des CO₂ (40–90 USD/t CO₂).⁹⁷ Durch entsprechende Bepreisung von Emissionen kann die Anwendung von CCS in der Zementindustrie jedoch angereizt werden. Der fehlende oder nicht angemessene Rechtsrahmen für die CO₂-Speicherung in manchen Ländern stellt ebenfalls eine Herausforderung dar.⁹⁸ Viele Zementwerke sind außerdem zu klein, um den Bau der

⁹⁶ Vgl. Plaza et al., 2020.

⁹⁷ Vgl. Plaza et al., 2020.

⁹⁸ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

notwendigen Transportinfrastruktur für abgeschiedenes CO₂ allein zu rechtfertigen.⁹⁹ Dies ist kein Problem, wenn eine Bündelung mit anderen industriellen CO₂-Quellen möglich ist. Oftmals befinden sich Zementproduktionsanlagen jedoch möglicherweise nicht an einem geeigneten Standort. Das anfallende CO₂ könnte dann lokal für CCU etwa in der Herstellung synthetischer Kraftstoffe genutzt werden (siehe auch Anwendungsbeispiel in 3.2.2.4).

Entwicklung neuer Zement- und Betonarten

Auch neuartige Zement- und Betonarten können die Gesamtemissionen im Produktionsprozess reduzieren. Kohlenstoffarme oder neuartige Zemente sind Stoffe, die aus Alternativen zu Zementklinker hergestellt werden, weniger Energieaufwand und Emissionen in der Produktion freisetzen und dennoch die herkömmlichen Zementeigenschaften aufweisen. Durch die Änderung der verwendeten Rohstoffe (in den meisten Fällen wird der Anteil von Kalkstein reduziert), können diese Klinker die Prozessemissionen aus der Kalksteinkalziniierung und die Emissionen aus der Brennstoffverbrennung verringern.¹⁰⁰

Zum Beispiel können karbonisierbare Kalziumsilikatklinker (CCSC), wie in Beton von der Firma Solidia verwendet, die Prozessemissionen um 43 % senken.¹⁰¹ Eine ähnliche Entwicklungsrichtung hat auch das KIT mit dem Celitement eingeschlagen. Die Herstellung des Bindemittels erfolgt dabei bei Temperaturen von nur 150 bis 300 °C. Allerdings ist der Celitement noch kein genormter Baustoff.¹⁰²

Auch aus Magnesiumsilikaten gewonnene Magnesiumoxide (MOMS) könnten theoretisch aus Materialien hergestellt werden, die keinen Kohlenstoff enthalten. Diese von der Firma Novacem entwickelte Technologie, konnte jedoch bislang keinen durchschlagenden Erfolg vorweisen. Das entsprechende Wissen und die Patente wurden im Jahr 2012 vom Technologie- und Industriekonzern Calix erworben.¹⁰³

Geopolymer- oder alkalisch aktivierte Bindemittel können ebenfalls einen 80–90 % geringeren Fußabdruck haben als normaler Portlandzement. Sowohl CCSC als auch MOMS können durch Karbonisierung gehärtet werden (unter Verwendung von CO₂ anstelle von Wasser). Dies bedeutet, dass sie mehr CO₂ absorbieren und enthalten könnten, als bei der Herstellung emittiert wird. Dies würde diese Arten von Zement „kohlenstoffnegativ“ machen.¹⁰⁴ Eine weitere Möglichkeit Emissionen in der Zement- und Betonindustrie einzusparen, ist der Einsatz von Altbeton-Recycling. Abbruchbeton von Gebäuden kann hierbei sowohl helfen die Produktion von neuem Zement zu verringern als auch die

⁹⁹ Vgl. Global CCS Institute, 2016.

¹⁰⁰ Vgl. Lehne & Preston, 2018.

¹⁰¹ Vgl. Solidia, 2022.

¹⁰² Vgl. Celitement, 2022.

¹⁰³ Vgl. Majcher, 2015.

¹⁰⁴ Vgl. Zajac et al., 2022; Lehne & Preston, 2018.

Brenntemperaturen auf nur 1000 °C zu reduzieren.¹⁰⁵ Abbildung 19 zeigt die Prozessemissionen alternativer Klinker im Vergleich mit Portlandklinker.

Große Marktanteile konnten diese neuartigen Zemente und Betone jedoch bislang nicht erreichen. Qualitätsprobleme bei neuen Zementarten und Mischungen verhindern eine höhere Marktdurchdringung. Viele der neuen Produkte stoßen auf den Widerstand der Verbraucher, da fast alle Normen, Vorschriften und Protokolle für die Prüfung von Zementbindemitteln und Beton auf der Verwendung von Portlandzement basieren. Dies erschwert den Umgang und Experimente mit den neuartigen Produkten. Nicht alle dieser neuartigen Bindemitteltechnologien haben einen Reifegrad erreicht, der auch in großem Maßstab eingesetzt zu werden. Schließlich gibt es auch Widerstand und Schwierigkeiten die Interessengruppen über die Hersteller neuartiger Zemente und Betone hinaus zu erweitern.¹⁰⁶

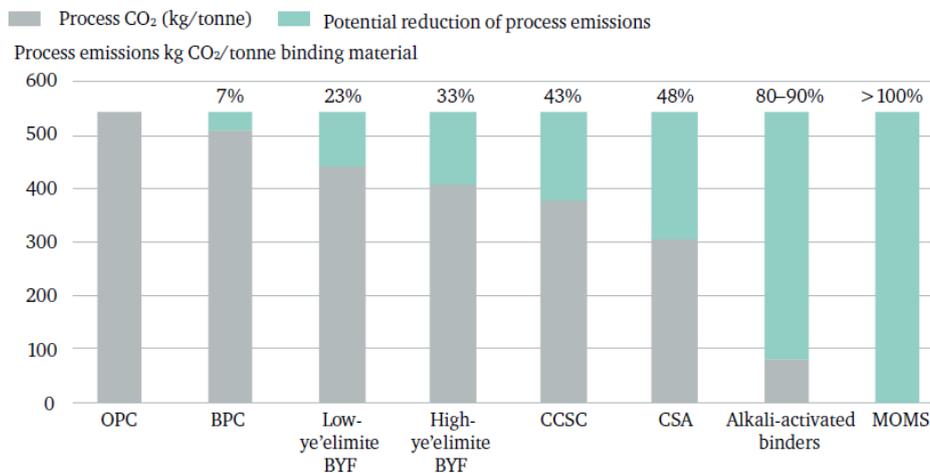


Abbildung 19: Prozessemissionen alternativer Klinker im Vergleich mit Portlandklinker (OPC: Ordinary Portland Clinker, BPC: Belite-rich Portland Clinker, BYF: belite ye'elimite-ferrite, CCSC: Carbonatable Calcium Silicate Clinkers, CSA: Calcium Sulphoaluminate Clinker, MOMS: Magnesium Oxides derived from Magnesium Silicates).

Quelle: Lehne & Preston, 2018.

Substitution von Beton und Planung von Bauwerken

Auch bei Design und Konstruktion von Bauwerken besteht ein nicht zu unterschätzender Hebel die Verwendung von Zement an sich einzuschränken. Diese Hebel lassen sich mit den aktuellen Normen und Vorschriften umgesetzt. Die Reduzierung der CO₂-Emissionen im Bau eines Gebäudes muss neben Qualität, Kosten und Geschwindigkeit ein wichtiger Design- und Entwurfsparameter werden. Die Planer von Gebäuden und Infrastrukturen können CO₂-Emissionen durch Wahl der Geometrie und des Systems des Bodens, der Abstände von Stützpfeilern und der Optimierung von Betonfestigkeit und Elementgröße einsparen. Dies kann erreicht werden, während gleichzeitig alle

¹⁰⁵ Vgl. KIT, 2022.

¹⁰⁶ Vgl. Lehne & Preston, 2018; Rose, 2022.

Leistungsvorteile des Betonbaus zu erhalten.¹⁰⁷ Ebenfalls möglich ist die Substitution von Zement mit anderen weniger CO₂-intensiven Baumaterialien, wie Lehm, Holz oder anderer Verbundstoffe.¹⁰⁸

Net Zero Pfad der Zementindustrie

Die Reduktion und womöglich komplette Vermeidung von CO₂-Emissionen bei der Produktion des Zements bedarf eines Zusammenspiels aller oben ausgeführten Möglichkeiten. Abbildung 20 zeigt den Net Zero Pfad der Global Cement and Concrete Association (GCCA) mit unterschiedlichen Möglichkeiten der Emissionsreduktion und deren Anteile am Gesamtpfad.

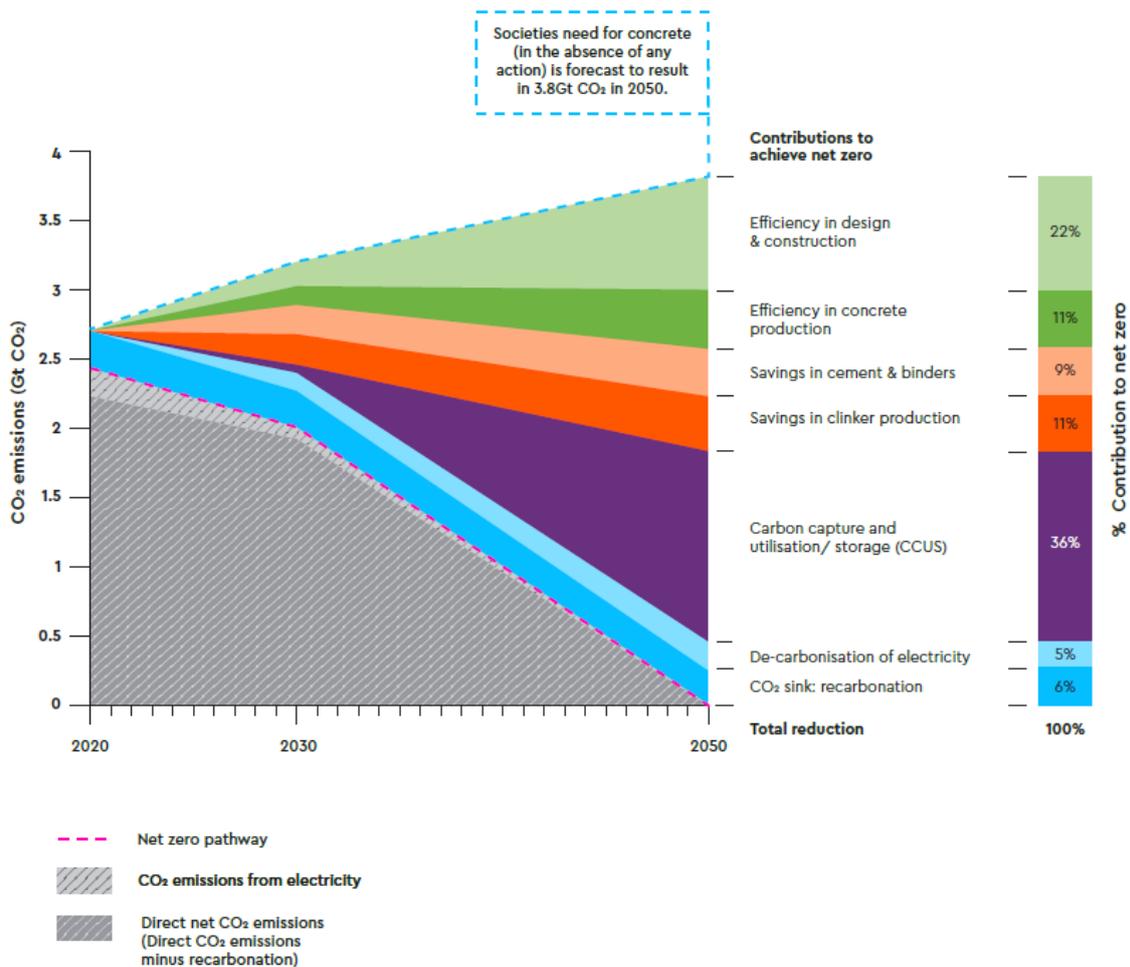


Abbildung 20: Net-Zero-Pfad für die Zement- und Betonindustrie.

Quelle: Global Cement and Concrete Association, 2021.

Die Einsparung von Emissionen in der Produktion und der Verwendung von Zement soll zusammen 20 % der Gesamtreduktion ausmachen. Eine erhöhte Effizienz bei Mischung von Beton und auch die sparsamere Verwendung in Bauwerken durch geändertes Design selbst sollen bis zu 33 % der Emissionen reduzieren. 11 % des Emissionsrückgangs stammt aus einem dekarbonisierten Strombezug und der Speicherung von CO₂ in Beton (Rekarbonisierung). Diese Maßnahmen sollen schon

¹⁰⁷ Vgl. Global Cement and Concrete Association, 2021.

¹⁰⁸ Vgl. McKinsey, 2020.

bis 2030 verstärkt Wirkung zeigen, während CCUS vor allem ab dem Jahr 2030 auf den notwendigen Gt-Maßstab skaliert wird. Der Einsatz von CCUS in der Zementindustrie ist vor allem für die prozessbedingten Emissionen notwendig und soll laut Net Zero Pfad 36 % der Gesamteinsparungen ausmachen.

3.2.2.4 Anwendungsbeispiel Schwenk Zement

Am Standort von SCHWENK Zement in Mergelstetten in Baden-Württemberg arbeiten vier Zementhersteller Buzzi Unicem SpA - Dyckerhoff GmbH, HeidelbergCement AG, SCHWENK Zement GmbH & Co. KG und Vicat S.A unter einer neu gegründeten Forschungsgesellschaft „Cement Innovation for Climate“, kurz CI4C zusammen. Eine Demonstrationsanlage im halbindustriellen Maßstab soll dort gebaut und Anfang 2024 in Betrieb gehen. Prozessbedingtes CO₂ in der Zementproduktion in Mergelstetten soll dann durch ein Oxyfuel-Verfahren abgeschieden werden (Abbildung 21).



Abbildung 21: Darstellung der Oxyfuel-Anlage für das Demonstrationsprojekt „catch4climate“ in Mergelstetten.

Quelle: HeidelbergCement, 2022.

Für das neuartige Klinkerproduktionsverfahren wird eine neue Ofenanlage benötigt. Die „polysius pure oxyfuel“-Ofenanlage wird von Thyssenkrupp realisiert. Anstatt Umgebungsluft mit 21 % Sauerstoffgehalt wird in der neuen Anlage reiner Sauerstoff im Verbrennungsprozess genutzt (Oxyfuel). Dadurch erhöht sich der Anteil von CO₂ in den prozessbedingten Abgasen von 25–30 % auf nahezu 100 %.¹⁰⁹ Hochreines CO₂ kann in diesem Verfahren abgeschieden werden. Die Projektpartner planen mit Investitionen von 130 Mio. EUR.¹¹⁰

Mittelfristiges Ziel des „catch4climate“-Projekts ist die anschließende Nutzung des abgeschiedenen CO₂ als Rohstoff für die Herstellung von klimaneutralen synthetischen Kraftstoffen unter Verwendung von erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff direkt am Standort. Dadurch entfällt auch die Notwendigkeit des Transports des CO₂. Da die Zementproduktionsanlage im Süden

¹⁰⁹ Vgl. HeidelbergCement, 2022.

¹¹⁰ Vgl. Heidenheimer Zeitung, 2022.

Deutschlands steht, müsste das CO₂ zur Verpressung in Norddeutschland oder Norwegen erst dorthin transportiert werden. Die Kosten für den Bau einer CO₂-Pipeline für die abgeschiedenen Emissionen aus dem Zementwerk, wären aufgrund der zu geringen Menge zu teuer. Ein Abtransport via LKW wäre ebenfalls aus Logistik- und Kostengründen nicht darstellbar. Der Partner für die Produktion des Kraftstoffs ist SkyNRG und der Flughafen Stuttgart. Ab 2028 soll das klimaneutrale Kerosin dann auch im industriellen Maßstab (50.000 Tonnen/Jahr) am Flughafen Stuttgart eingesetzt werden.¹¹¹

Für die beiden Anlagen (Oxyfuel-Abscheidung und synthetische Kraftstoffherstellung) wird SCHWENK Zement über 330 Mio. EUR investieren.¹¹²

3.2.2.5 Entwicklungsrelevanz

Nur knapp 10 % der globalen Zementproduktion findet in den US oder der EU statt. Viele Zementproduktionsanlagen stehen in Schwellen- und Entwicklungsländern und weisen zudem im Durchschnitt auch ein geringeres Alter auf (vergleiche Abbildung 9). Gleichzeitig wird der projizierte Bedarf nach Zement und Beton vor allem auch in den Ländern steigen, die bislang noch keine oder wenig Infrastrukturen entwickelt haben. Ein Großteil der Dekarbonisierung in der Zementindustrie muss sich demnach in den Schwellen- und Entwicklungsländern abspielen. Die in den Industrieländern, aber auch in China und Indien entwickelten Methoden zur Einsparung von Energie und Emissionen in der Zementproduktion müssen weltweit angewandt und stark ausgebaut werden. Die Realisierung von CO₂-Einsparmaßnahmen in der Zementindustrie gehen allerdings mit erheblichen Mehrkosten einher – hier muss für die Entwicklungs- und Schwellenländer ein Mechanismus zum Finanzausgleich geschaffen werden.

Die IEA geht z.B. davon aus, dass für die Erreichung des 2 Grad-Ziels bis 2050 zusätzliche Aufwendungen für die Zementindustrie von 283 bis 361 Mrd. USD notwendig sind im Vergleich zu dem Fall, dass keine weiteren Maßnahmen ergriffen würden (IEA (2018): Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry).

In Abbildung 22 werden die kumulativen Investmentbedarfe der Zementindustrie bis 2050 in drei unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Sollten im Vergleich zu dem „no action“ Szenario heutige Energieverbrauch-Trends sowie Verpflichtungen der Länder zur CO₂-Emissionsbegrenzung nach dem Pariser Übereinkommen berücksichtigt werden, ergebe sich ein zusätzlicher Finanzbedarf von 107 bis 127 Mrd. USD. Dieses als Basisszenario beschriebene RTS führte zu einem geschätzten Temperaturanstieg von 2,7 Grad Celsius bis 2100.

¹¹¹ Vgl. Heidenheimer Zeitung, 2022.

¹¹² Vgl. SWR, 2022.

Wollte man die Erderwärmung auf 2 Grad Celsius beschränken (2DS) erhöhten sich die globalen Investitionen um weitere 176 Mrd. bis 244 Mrd. USD.

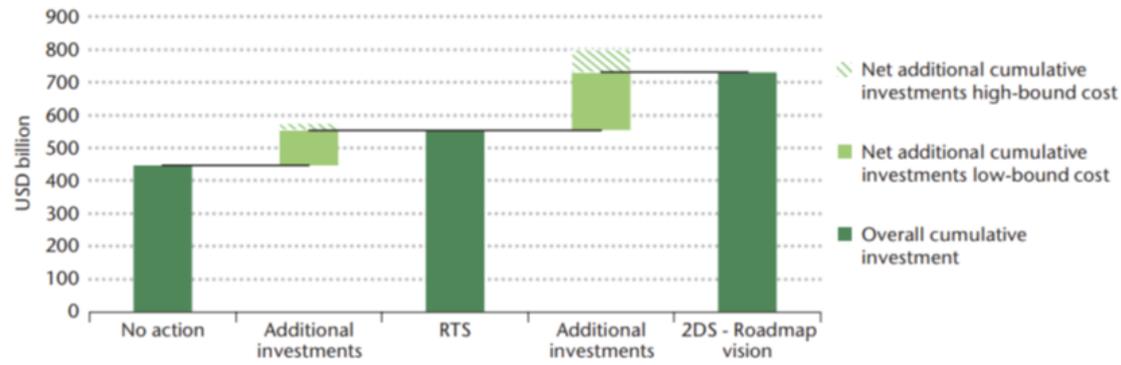


Abbildung 22: Gesamter kumulativer Investitionsbedarf nach Szenario bis 2050.

Quelle: IEA (2018): *Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry*

Zur Realisierung dieses global zusätzlichen Investitionsbedarf sind sowohl auf politischer und privatwirtschaftlicher Ebene als auch im Rahmen von Entwicklungszusammenarbeit großer Anstrengungen notwendig. Regierungen müssen in Zusammenarbeit mit der Industrie Möglichkeiten finden, wie private Investition in CO₂-Minderungsmaßnahmen getätigt werden, die ohne Anreize nur wenig wahrscheinlich sind. Z.B. sollten sie durch nachhaltige Finanzierung und unterstützende Risikominderungsmechanismen sicherstellen, dass die Entwicklung und Demonstration neuer Technologien und Prozesse gefördert werden, die das Potenzial zur Reduzierung der CO₂-Emissionen zeigen. Alle Beteiligten sollten die Zusammenarbeit intensivieren, um die Implementierung modernster Technologien zu verbessern und bewährte Betriebspraktiken auszutauschen.

Von ganz zentraler Bedeutung ist weiter die Intensivierung aller Anstrengungen zur Entwicklung und Einführung wirksamer internationaler CO₂-Bepreisungsmodelle. Hiermit muss u.a. sichergestellt werden, dass eine lokale Zementproduktion mit geringerem CO₂-Ausstoß gegenüber Zementimporten mit höheren CO₂-Emissionen wettbewerbsfähig bleibt und zuvor getätigte Investitionen refinanziert werden können. Weiterhin sollten Regierungen sicherstellen, dass Vorschriften und Standards vorhanden sind, um eine stärkere Verwendung von alternativen Bindemitteln für Zemente zu ermöglichen, um bei Erhalt der Produktqualität den Klinkergehalt von Zement und Beton zu senken. Letztlich kommt der Entwicklungszusammenarbeit eine große Rolle bezüglich Wissensaustausch und Know-How-Transfer unter anderem in folgenden Bereichen zu:

- Förderung des fachlichen Austauschs zwischen Ländern und Produzenten
- Entwicklung von Machbarkeitsstudien und Dekarbonisierungsfahrplänen
- Unterstützung bei Demonstrations- und Anwendungsbeispielen zur Emissionsminderung
- Finanzierung von Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und der Emissionseinsparung

3.2.3 Chemie

3.2.3.1 Darstellung der globalen Produktionsmengen und Emissionen

Die globale Chemieindustrie ist geprägt von großer Heterogenität und Komplexität bezüglich der hergestellten Produkte, Verfahren und Prozesse wie auch der verwendeten Rohstoffe und Energieträger. Eine vollumfängliche Analyse der Dekarbonisierungspotenziale in der Chemieindustrie kann in diesem Kapitel daher nicht geleistet werden, jedoch ein Überblick über die wichtigsten Themen und Wege zu einer klimaneutralen chemischen Industrie. Eine Segmentierung der globalen chemischen Industrie ist in Abbildung 23 zu sehen und verdeutlicht die Komplexität der Wertschöpfungskette. Die Wertschöpfungskette der chemischen Industrie reicht von der Extraktion der benötigten Rohstoffe zur Herstellung von Grundchemikalien über die Produktion von Industrie- und Verbrauchserzeugnissen bis zur Abfallbeseitigung dieser Stoffe. Im Folgenden ist vor allem die Herstellung der Grundchemikalien von Relevanz da dort der größte Energieeinsatz und die meisten Emissionen auftreten.

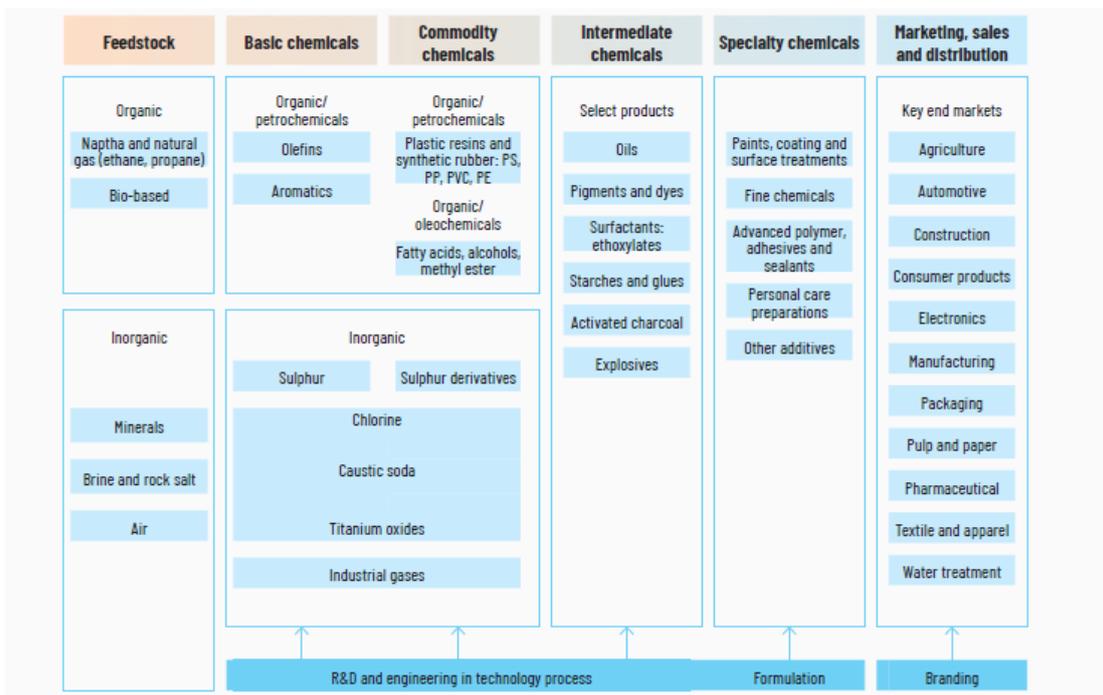


Abbildung 23: Segmentierung der globalen Wertschöpfungskette der chemischen Industrie.

Quelle: UNEP, 2019.

Die Produktion von Chemikalien hat sich seit dem Jahr 2000 beinahe verdoppelt und ist bis 2017 auf knapp 2.300 Mt angestiegen, wie Abbildung 24 zeigt. Der größte Wachstumsmarkt war in diesem Zeitraum China, mit einer jährlichen Wachstumsrate von 11,8 %. Jedoch zeigten auch der Mittlere Osten und Indien eine rasante Entwicklung mit einem jährlichen Wachstum von jeweils etwa 8 %.¹¹³

¹¹³ Vgl. UNEP, 2019.

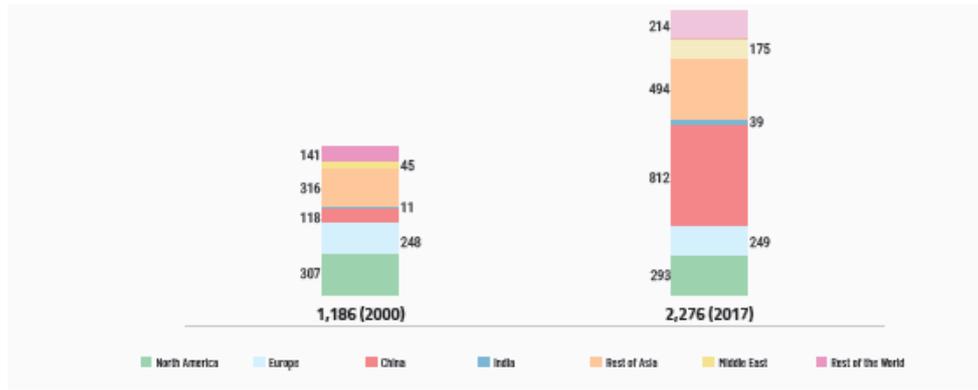


Abbildung 24: Produktionskapazität der globalen chemischen Industrie.

Quelle: UNEP, 2019.

Die Verschiebung der Wertschöpfung, der Produktion und des Verkaufs von Nordamerika und Europa vor allen nach China und andere asiatische Schwellenländer ist unübersehbar. Auch für die Zukunft wird ein wachsender Markt prognostiziert. Besonders der Bedarf nach wichtigen Grundchemikalien – Ausgangsprodukte für viele weitere Stoffe – also Ammoniak, Ethylen, Propylen, Methanol, Harnstoff sowie BTX (Benzene, Toluene, Xylene), werden bis 2050 um etwa 50–100 % zunehmen.¹¹⁴ Dies zeigen auch die Szenarien der Internationalen Energieagentur für 2030 und 2050 (Abbildung 25).

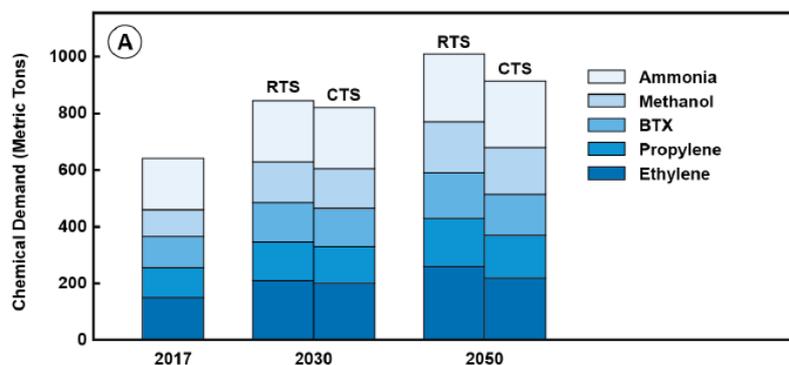


Abbildung 25: Bedarf nach wichtigen Grundstoffchemikalien in verschiedenen Szenarien (RTS: Reference Technology Scenario, CTS: Clean Technology Scenario).

Quelle: Mallapragada et al., 2022.

Die Treibhausgasemissionen (THG) der weltweiten chemischen Industrie werden in der Literatur je nach Systemgrenze zwischen 1,6–3,3 Gt CO₂-äq angegeben.¹¹⁵ Somit ist die chemische Industrie für 3–6 % der globalen THG-Emissionen verantwortlich, ähnlich wie die Stahl- und Zementindustrie.

Abschätzungen für zukünftige THG-Emissionen der globalen chemischen Industrie sind stark abhängig von den Annahmen zur Vermeidung von Emissionen, der Energieeffizienz und dem Einsatz anderer Energieträger. Ein Anstieg der Emissionen um 50–340 % also im Extremfall auf beinahe 8

¹¹⁴ Vgl. Mallapragada et al., 2022; University of Tokyo, Center for Global Commons and Systemiq, 2022; Saygin & Gielen, 2021.

¹¹⁵ Vgl. McKinsey&Company, 2018; Gonzalez-Garay et al., 2021; Saygin & Gielen, 2021; Eryazici et al., 2021.

Gt unter einem Business-as-usual-Szenario bis 2050 zeigt, dass der Dekarbonisierung der weltweiten chemischen Industrie für eine klimaneutrale Wirtschaft eine sehr wichtige Rolle zukommt.¹¹⁶

3.2.3.2 Quellen der CO₂-Emissionen

Etwa ein Drittel der THG-Emissionen in der Chemieindustrie sind prozessbedingt, der Rest stammt aus der energetischen Nutzung fossiler Rohstoffe zur Erzeugung von Wärme oder Strom.¹¹⁷ Ebenfalls werden Rohstoffe wie Gas oder Öl auch direkt als Rohstoff für weitere Produkte genutzt. Abbildung 26 zeigt eine detaillierte Darstellung des Energieverbrauchs und der resultierenden THG-Emissionen nach Anwendungen in der chemischen Industrie.

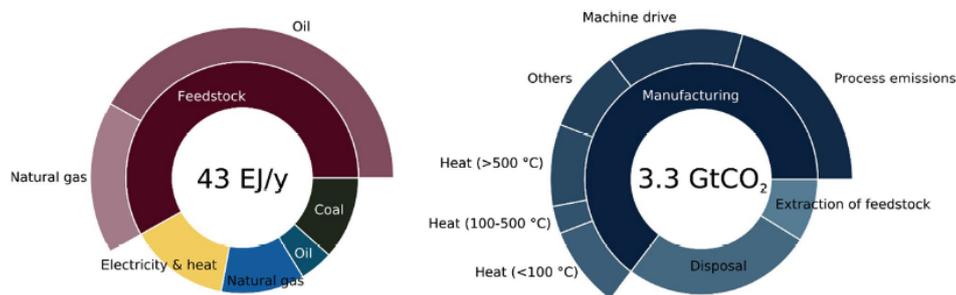


Abbildung 26: Energieverbrauch und Emissionen der chemischen Industrie in 2015.

Quelle: Gonzalez-Garay et al., 2021.

Ebenso erhellend ist die Darstellung der Emissionen nach Produktstufe in Abbildung 27. Klar ersichtlich ist der hohe Anteil der Rohstoffnutzung und der Grundchemikalien an den Gesamtemissionen.

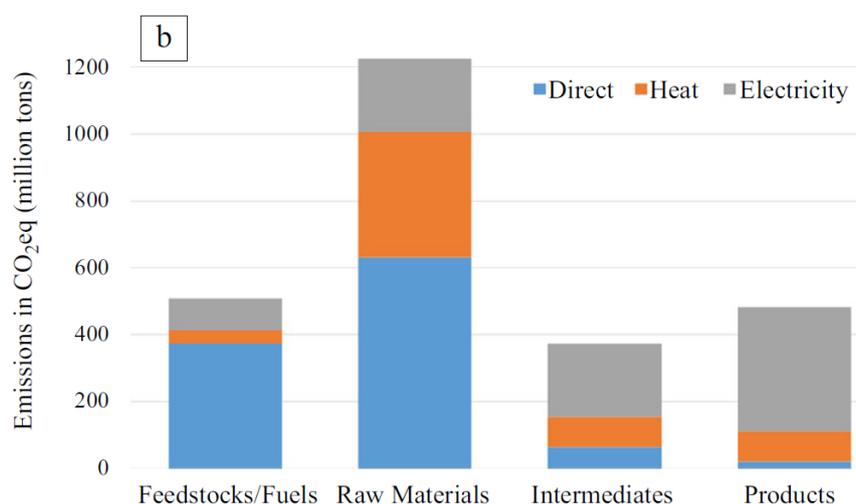


Abbildung 27: THG-Emissionen in der Wertschöpfungskette der chemischen Industrie.

Quelle: Eryazici et al., 2021.

¹¹⁶ Vgl. Saygin & Gielen, 2021; Mallapragada et al., 2022; University of Tokyo, Center for Global Commons and Systemiq, 2022.

¹¹⁷ Vgl. McKinsey&Company, 2018; Saygin & Gielen, 2021.

Global stammen 35 % aller THG-Emissionen der chemischen Industrie aus dem Stromverbrauch über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Je nach Land und Energiemix schwankt dieser Wert. Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Brennstoffen für die Erzeugung von Prozesswärme machen 23 % der Emissionen aus. Der größte Teil davon entsteht bei der Rohstoffproduktion von Ammoniak, Methanol und Olefinen, welche alle Hochtemperaturprozesse sind. Für 42 % der gesamten Emissionen sind direkte Emissionen in der Wertschöpfungskette verantwortlich. Der Großteil der direkten Emissionen – etwa ein Drittel der gesamten THG-Emissionen – entsteht entweder bei der Rohstoffproduktion oder bei der Gewinnung und Raffinierung von Rohstoffen und Brennstoffen. Weitere direkte THG-Emissionen aus Rohstoffen stammen hauptsächlich aus entweichendem und abgefackeltem Methangas aus Extraktionsprozessen, die durch weltweite Vorschriften und Verpflichtungen der Öl- und Gasunternehmen reduziert werden könnten.¹¹⁸

Besonders relevante THG-Quellen und Energieverbraucher sind die Herstellungsprozesse von Grundstoffchemikalien wie Ammoniak, Ethylen, Propylen, Methanol, Harnstoff sowie BTX (vergleiche Abbildung 28 und Abbildung 29). Diese Chemikalien sind die meistproduzierten weltweit und machen über die Hälfte der Gesamtemissionen der Chemieindustrie aus. Auch eine Analyse zur Chemieindustrie in der EU kommt zum Schluss, dass nur acht Grundchemikalien für 75 % der sektoralen THG-Emissionen verantwortlich sind.¹¹⁹

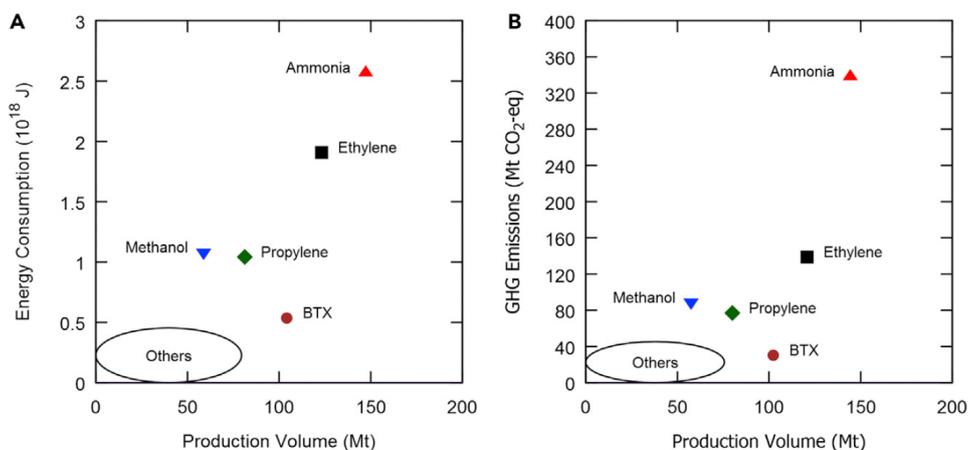


Abbildung 28: Energieverbrauch und THG-Emissionen der fünf meistproduzierten Chemikalien im Jahr 2010.

Quelle: Schiffer & Manthiram, 2017.

¹¹⁸ Vgl. Eryazici et al., 2021.

¹¹⁹ Vgl. Accenture and NexantECA, 2022.

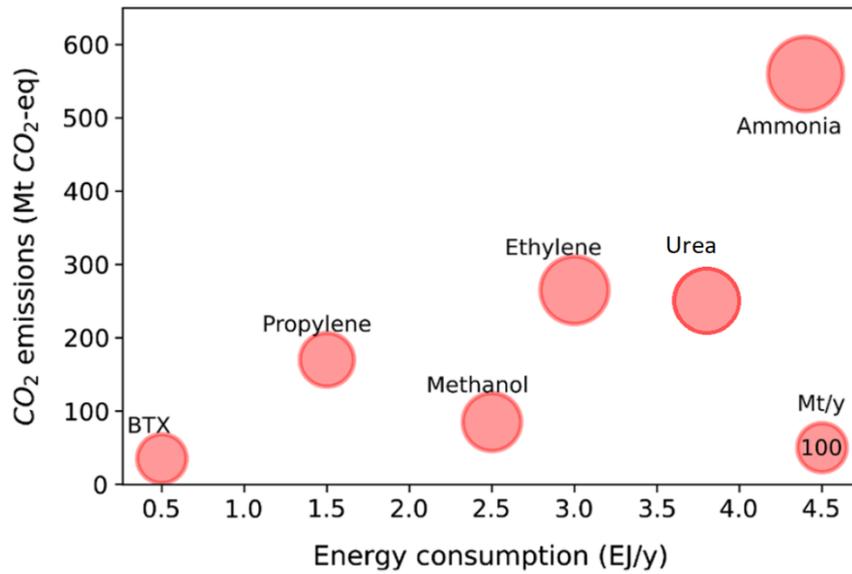


Abbildung 29: Energieverbrauch und THG-Emissionen der sechs meistproduzierten Chemikalien im Jahr 2018.

Quelle: Gonzalez-Garay et al., 2021; Daten zu Urea/Harnstoff eingefügt durch Autor, basierend auf S&P Global, 2022; Menegat et al., 2022; Baboo, 2015, DownToEarth, 2019).

Im Vergleich der beiden Grafiken wird der Anstieg des Produktionsvolumens wie auch der THG-Emissionen zwischen 50–100 % für die unterschiedlichen Chemikalien innerhalb des Zeitraums 2010–2018 deutlich.

3.2.3.3 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Trotz der hohen Komplexität der Produktionsprozesse in der chemischen Industrie kann aufgrund der obenstehenden Quellenbetrachtung von THG-Emissionen ein Rahmen für die technischen Minderungspfade entwickelt werden. Dabei sind besonders bedeutsam: die Nutzung nicht-fossiler Kohlenstoffquellen, die Verwendung nicht-fossiler Energieträger in der Produktion und die Abscheidung weiterhin nicht vermeidbarer Emissionen (Abbildung 30). Die Ansätze sind komplementär und können sich gegenseitig unterstützen.

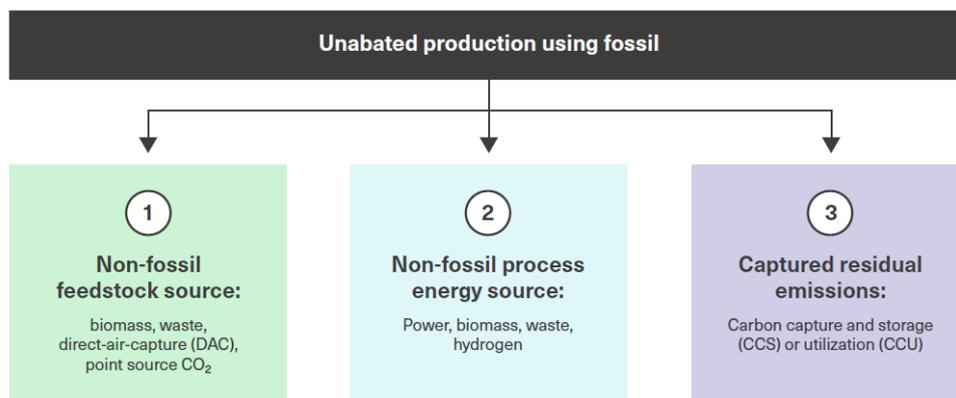


Abbildung 30: Pfade zur Minderung von THG-Emissionen in der chemischen Industrie.

Quelle: University of Tokyo, Center for Global Commons and Systemiq, 2022.

Die nachfolgenden fünf Themenkomplexe spielen für die Minderung der THG-Emissionen in der Chemieindustrie dabei die größte Rolle:¹²⁰

- Verbesserte Effizienz und Elektrifizierung von Prozessen
- Einsatz erneuerbaren oder CO₂-freien Stroms zur Reduktion der Emissionen der elektrischen Verbraucher
- Einsatz von CO₂-freien Wasserstoffs als Grundrohstoff
- Nutzung nicht-fossiler Kohlenstoffquellen
- Kohlenstoffabscheidung, -speicherung und -nutzung (CCUS)

Verbesserte Effizienz und Elektrifizierung von Prozessen

Die Erhöhung der Energieeffizienz in allen Prozessen der chemischen Industrie, insbesondere durch Wärmerückgewinnung, neue Katalysatoren, Prozessinnovationen und bessere Prozess- und Anlagensteuerung kann einen großen Beitrag zur Emissionsminderung leisten. Ebenso kann die Elektrifizierung bestimmter Prozesse wie auch der Wärmeerzeugung dazu beitragen, weniger fossile Brennstoffe zu verwenden (z.B. durch industrielle Wärmepumpen). Auch die Verbesserung der Trenn- und Recyclingverfahren kann die Ressourcen- und Energieeffizienz stark verbessern und zu einer THG-Minderung beitragen (z.B. Rückführung von Abfällen wie Kunststoffen, gebrauchten Ölen oder Lösungsmitteln als Rohstoffe und Kohlenstoffquellen).

Einsatz erneuerbaren oder CO₂-freien Stroms zur Reduktion der Emissionen der elektrischen Verbraucher

Die Nutzung von CO₂-freiem Strom ist besonders für die Reduktion der Emissionen aus elektrischen Verbrauchern wichtig. Der Einsatz erneuerbar oder CO₂-frei erzeugten Stroms hat in Verbindung mit Elektrifizierung eine große Hebelwirkung. Die Verfügbarkeit von CO₂-freiem Strom ist jedoch nicht allein Thema für die chemische Industrie, sondern für die Minderung in vielen anderen Sektoren ebenso notwendig.

Einsatz CO₂-freien Wasserstoffs als Grundrohstoff

CO₂-freier Wasserstoff ist für die Minderung der THG-Emissionen in der chemischen Industrie von sehr großer Bedeutung. In der chemischen Industrie wird Wasserstoff vor allem als Grundstoff für die Herstellung von Ammoniak verwendet. Wie in Abbildung 28 und Abbildung 29 zu sehen, ist die

¹²⁰ Vgl. Eryazici et al., 2021; Gonzalez-Garay et al., 2021; Saygin & Gielen, 2021; WEF and Accenture, 2022; A.SPIRE, 2021; University of Tokyo, Center for Global Commons and Systemiq, 2022; Vooradi et al., 2019.

Herstellung von Ammoniak die größte singuläre THG-Quelle in der Chemieindustrie. Die Substitution dieses oftmals grauen Wasserstoffs aus Dampfreformierung von Erdgas durch grünen (erneuerbar erzeugt) oder blauen (Abscheidung von CO₂ bei Dampfreformierung) Wasserstoff hat demnach hohes Minderungspotenzial. Auch für weitere Prozesse in der chemischen Industrie verspricht der Einsatz CO₂-freien Wasserstoffs die Möglichkeit hoher CO₂-Einsparungen.

Nutzung nicht-fossiler Kohlenstoffquellen

Kohlenstoff ist als chemisches Element ein entscheidender Baustein unzähliger chemischer Komponenten und die Grundlage der gesamten organischen Chemie. Um die chemische Produktion von der Ausbeutung fossiler Ressourcen zu entkoppeln und THG-Emissionen zu reduzieren, muss die Nutzung „nachhaltiger Kohlenstoffquellen“ im Chemiesektor verstärkt werden. Zu diesen Kohlenstoffquellen gehören CO₂ (und CO), die aus Industrieabwässern, (fossilen) Abfallströmen (z. B. Kunststoffabfällen) und Biomasse(abfällen) abgetrennt werden. Auch die Nutzung von Biometan anstatt von Erdgas für bestimmte Prozesse kann hierbei eine Rolle spielen. In Kombination mit der Abscheidung von CO₂, könnte sich die chemische Industrie dadurch zu einer Kohlenstoffsenke entwickeln.

Kohlenstoffabscheidung, -speicherung und -nutzung (CCUS)

Besonders für direkte aus Prozessen stammenden THG-Emissionen erlaubt allein die Abscheidung, Nutzung oder auch Endlagerung von CO₂ (CCUS) eine Reduktion der THG-Emissionen. Durch Abscheidung von CO₂ aus industriellen Prozessen und Verwendung des Kohlenstoffs als Rohstoff für weitere Produkte, ergeben sich große Potenziale eines nachhaltigen Kohlenstoffkreislaufs in der chemischen Industrie.

Die oben dargestellten, unterschiedlichen Optionen zur CO₂-Minderung müssen in der Umsetzung sowohl in einer Anlage als auch lieferkettenübergreifend kombiniert werden, um die THG-Emissionen der Chemieindustrie weitgehend zu eliminieren. So spielt die Erzeugung erneuerbaren Stroms in Kombination mit der Produktion von Wasserstoff in vielen der Prozesse eine wichtige Rolle. Ebenso kann der Rohstoff der in Prozessen weiter zu Basischemikalien wie Ammoniak, Methanol, Ethanol oder Olefinen umgewandelt wird aus Biomasse, Abfällen oder auch als im Kreislauf geführten CO₂ stammen. Die Anwendung von CCUS ist ebenfalls integraler Bestandteil einer vollständigen THG-Emissionsreduktion. Abbildung 31 zeigt eine Übersicht der Produktionsprozesse für die Herstellung der wichtigsten Grundchemikalien in einer weitgehend THG-emissionsfreien chemischen Industrie.

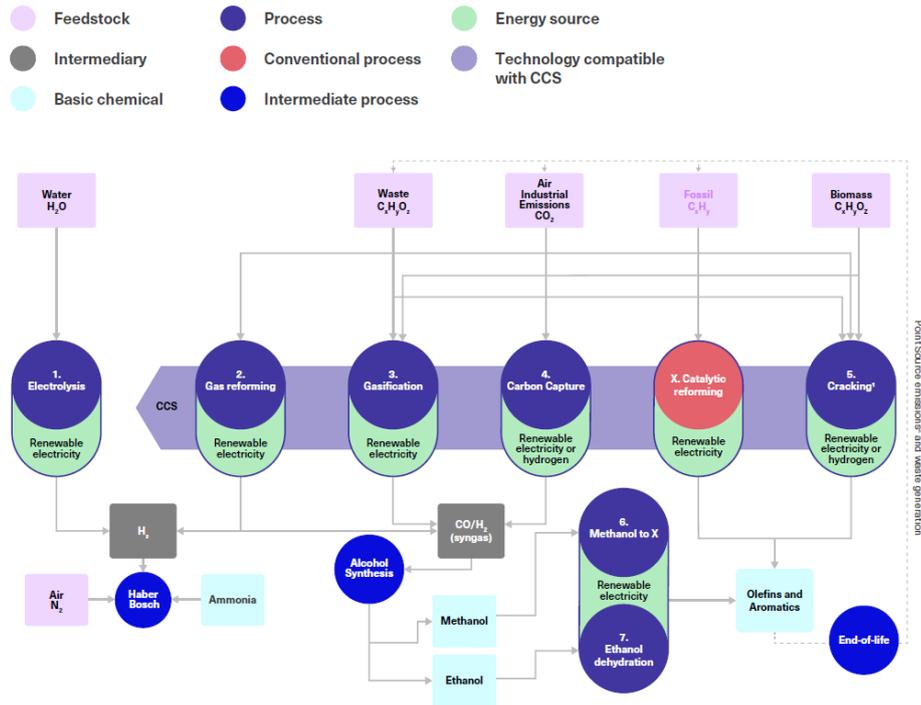


Abbildung 31: Produktionsprozesse und Optionen zur THG-Minderung für die wichtigsten Basischemikalien.

Quelle: University of Tokyo, Center for Global Commons and Systemiq 2022.

Das Potenzial der oben aufgeführten THG-Minderungsoptionen für eine emissionsfreie Chemieindustrie lässt sich aufteilen in 45 % durch Energieeffizienz, Elektrifizierung und dem Einsatz CO₂-freien Stroms, 25–30 % durch die Nutzung von Wasserstoff, biologischen Kohlenstoffquellen und Kreislaufnutzung von CO₂ sowie 25 % durch den Einsatz von CCS (Abbildung 32).¹²¹

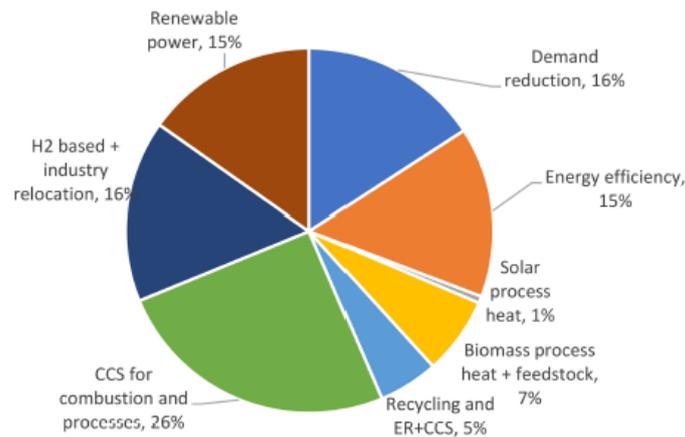


Abbildung 32: Prozentualer Anteil verschiedener THG-Minderungsoptionen für eine emissionsfreie chemische Industrie in 2050.

Quelle: Saygin & Gielen, 2021.

Eine weitere Analyse eines möglichen Technologiemitx auf Basis verschiedener Szenarien (Abbildung 33) zeigt ebenfalls, dass die Dekarbonisierung oder besser eine THG-emissionsfreie Chemieindustrie nicht durch eine Schlüsseltechnologie erreicht werden kann. Aufgrund der komplexen

¹²¹ Vgl. Saygin & Gielen, 2021.

Prozesse und Produktionsketten werden vielmehr alle möglichen Optionen notwendig und müssen entsprechend skaliert werden.

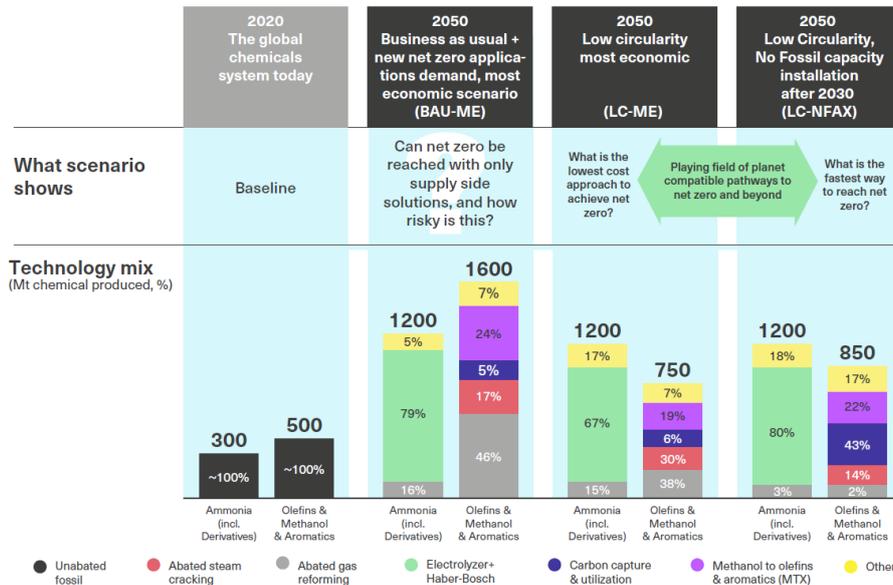


Abbildung 33: Nötiger Technologiemitmix für eine THG-emissionsfreie chemische Industrie in verschiedenen Szenarien in 2050.

Quelle: University of Tokyo, Center for Global Commons and Systemiq, 2022.

Anwendungsbeispiele

Elektrisch beheizter Steamcracker-Öfen (BASF, SABIC, Linde)

Viele Basischemikalien sowie auch die Verarbeitung und Aufspaltung bestimmter Produkte benötigt hohe Temperaturen. Oft werden dabei Steamcracker-Öfen verwendet, um fossile Kohlenwasserstoffe in andere Produkte aufzuspalten und weiterzuverarbeiten. Die Steamcracker-Öfen der BASF erreichen dabei Temperaturen von 850°C und werden bislang vor allem fossil über Erdgas befeuert.

BASF hat in Kooperation mit SABIC und Linde im September 2022 mit dem Bau der weltweit ersten Demonstrationsanlage für großtechnische elektrisch beheizte Steamcracker-Öfen begonnen. Durch die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien anstelle von Erdgas hat diese Technologie das Potenzial die THG-Emissionen dieses sehr energie-intensiven Produktionsprozesses um mindestens 90 % zu reduzieren.

In der Demonstrationsanlage, welche am Standort von BASF in Ludwigshafen vollständig in einen bestehenden Steamcracker integriert wird, sollen ein direktes und indirektes Heizkonzept getestet werden (Abbildung 34). Das Projekt wird finanziell unterstützt durch das BMWK-Förderprogramm „Dekarbonisierung in der Industrie“. Die Inbetriebnahme der Anlage ist für das Jahr 2023 geplant

und soll pro Stunde 4 Tonnen Kohlenwasserstoffe verarbeiten und dabei 6 MW erneuerbarer Energie benötigen.¹²²

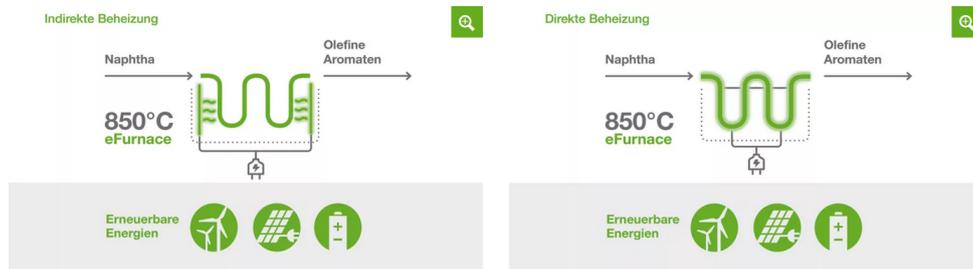


Abbildung 34: Heizkonzepte der Demonstrationsanlage eines elektrisch beheizten Steamcracker-Ofens der BASF.

Quelle: BASF, 2022.

Project Air: klimaneutrales Methanol (Perstorp, Fortum, Uniper)

Die Projektpartner, Perstorp, Fortum und Uniper wollen im Projekt Air nachhaltiges und klimaneutrales Methanol unter Verwendung einer Kreislaufwirtschaft für Kohlenstoff produzieren.

Mithilfe einer Kombination verschiedener Technologien, wie der Kohlenstoffabscheidung und -verwertung (CCU) sollen CO_2 , Reststoffe, erneuerbarer Wasserstoff und Biomethan in Methanol umgewandelt werden (Abbildung 35). Die Produktion soll im Jahr 2026 auf dem Gelände von Perstorp im schwedischen Stenungsung anlaufen und in weniger als fünf Jahren eine kohlenstoffnegative Lösung bieten (130 % weniger CO_2 -Emissionen aufgrund der Nutzung biogener CO_2 -Quellen).

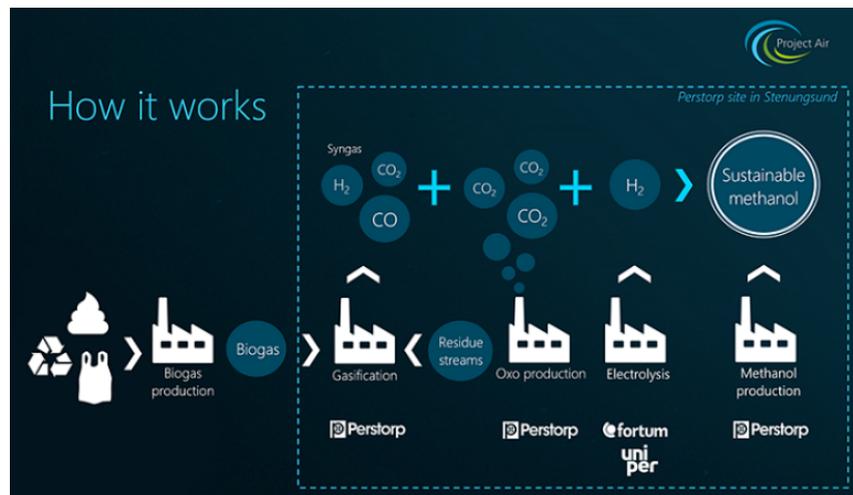


Abbildung 35: Prozess zur Herstellung klimaneutralen Methanols durch Project Air.

Quelle: Perstorp, 2022.

¹²² Vgl. BASF, 2022.

Der Prozess und die Technologie kann ebenfalls skaliert werden und wird das gesamte von Perstorp in der EU hergestellte fossile ersetzen und damit nachhaltige chemische Produkte für europäische Industrien und Sektoren bereitstellen.

Die Projektpartner erwarten eine CO₂-Reduktion um 500.000 Tonnen pro Jahr ab 2026, was den jährlichen Emissionen von ca. 340.000 mit fossilen Brennstoffen betriebenen Neuwagen oder 1 % der schwedischen CO₂-Emissionen entspricht. Das Projekt wird über den EU Innovation Fund mit 97 Mil. EUR unterstützt sowie mit 30 Mil. EUR von der schwedischen Energieagentur. Die Projektpartner schätzen die Gesamtinvestitionen auf 230 Mil. EUR.¹²³

3.2.3.4 Entwicklungsrelevanz

Die chemische Industrie hat sich bereits in den vergangenen 10–20 Jahren internationalisiert. China, Indien und Länder im Nahen Osten verzeichneten dabei die größten Wachstumsraten. Die Nachfrage nach Chemikalien konzentriert sich derzeit auf die Industrieländer. Da die Länder des globalen Südens in ihrer wirtschaftlichen Entwicklung jedoch stetig aufholen, könnte sich die Nachfrage nach vielen Produkten der chemischen Industrie auch dort stark steigern.

Wichtige Faktoren für die Entwicklung oder Ansiedlung chemischer Industrien in einem Land sind die Nachfrage sowie der Zugang zu kostengünstigen fossilen Rohstoffen (besonders Öl und Gas, jedoch in manchen Ländern wie Südafrika und China auch Kohle). Um die Transformation der chemischen Industrie zu einer klimaneutralen Wirtschaft zu ermöglichen, wird für künftige Standortentscheidungen auch immer mehr der Zugang zu kostengünstiger erneuerbarer Energie, Biomasse und CO₂-Endlagerstätten relevant. Diese neuen Faktoren könnten den Aufbau chemischer Industriekomplexe vor allen in Schwellen- und Entwicklungsländern begünstigen. Besonders dann, wenn in diesen Ländern die Erzeugung von Strom aus Wind- und Solarenergie günstiger ist als in den Industriestaaten. Die kostengünstige Produktion von erneuerbarem Wasserstoff kann etwa in abgelegene Wüstengebieten konzentriert sein, unter anderem im Nahen Osten, in Afrika sowie in Australien und Chile.

Auch die Herstellung von Produkten wie Ammoniak, Methanol und anderen Chemikalien könnte in der Nähe der Wasserstoffproduktionsstätten stattfinden, um Transportkosten zu senken. Der globale Transport von wichtigen Chemikalien und deren Grundlagen, kann für die entsprechenden Länder ein bedeutender Wirtschaftszweig werden.

Folgende Themenbereiche erscheinen im Zusammenhang der Entwicklungszusammenarbeit daher am relevantesten:

¹²³ Vgl. Project Air, 2022.

- Potenzialanalysen für die Produktion klimaneutraler und kostengünstiger chemischer Produkte
- Aufbau von internationalen Lieferketten für den Bezug klimaneutraler chemischer Produkte aus Produktionsgebieten
- Kooperationen zur Entwicklung neuartiger Anlagekonzepte und Demonstrationsanlagen in Schwellen- und Entwicklungsländer

3.2.4 Weitere Industrien: Zellstoff und Papier

3.2.4.1 Darstellung der globalen Produktionsmengen und Emissionen

Als einer der größten Industriesektoren der Welt hat die Zellstoff- und Papierindustrie einen hohen Energieverbrauch. Generell muss unterschieden werden zwischen der Zellstoffproduktion und der Papierherstellung. Letztere nutzt als Eingangsmaterial den Zellstoff. Das Endprodukt in der Papierherstellung kann sehr unterschiedlich sein und umfasst Verpackungsmaterialien und Kartonagen, grafisches Papier für den Druck und Zellstoffprodukte wie Papiertaschentücher. Im Folgenden wird die Zellstoff- und Papierindustrie als Ganzes betrachtet, die Energieverbräuche und Emissionen der Zellstoff- und Papierindustrie jedoch nach Prozess differenziert. Auf die Herstellung des Zellstoffs entfallen 13–15 % des globalen Holzverbrauchs und 33–40 % des gesamten weltweit gehandelten Industrieholzes.¹²⁴ Die Papierindustrie hat ihre Produktion seit 1990 um etwa 60 % gesteigert (Abbildung 36).

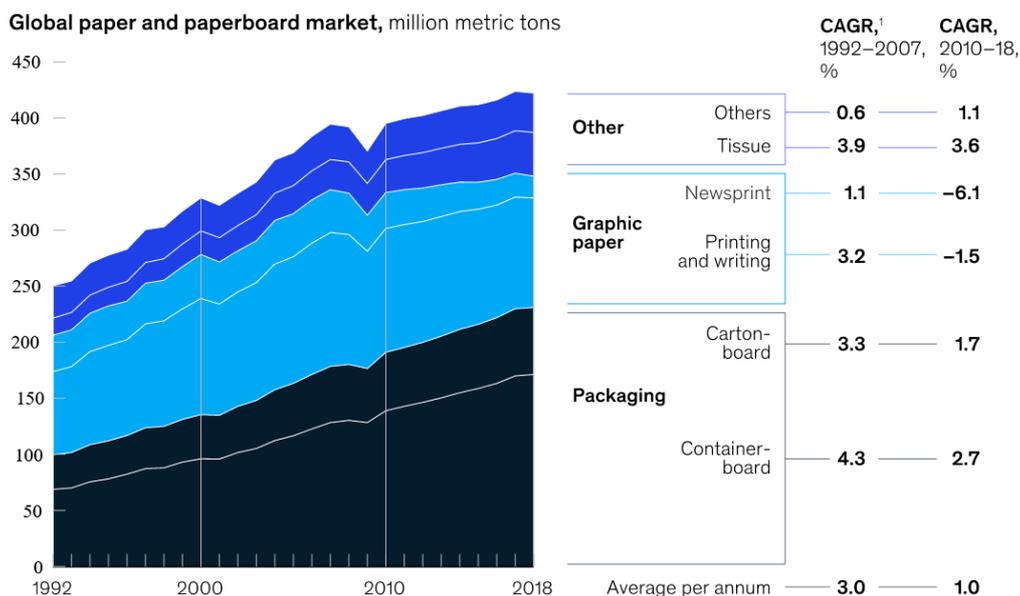


Abbildung 36: Weltweiter Papier- und Kartonagenmarkt in Millionen Tonnen 1992–2018 (CAGR: Jährliche Wachstumsrate).

Quelle: Berg & Lingqvist, 2019.

¹²⁴ Vgl. WWF, 2022.

In den vergangenen fünf Jahren wuchs der Papierverbrauch nur noch langsam oder war bei bestimmten Produkten auch rückgängig. Das geschätzte weltweite Produktionsvolumen von Papier und Pappe lag im Jahr 2020 bei etwa 398 Millionen Tonnen (Mt), der Verbrauch bei 402 Mt.¹²⁵

Im Vergleich zum Vorjahr stellt dies einen Rückgang von 10–15 Mt dar. Die beiden größten papiererzeugenden und auch -verbrauchenden Länder der Welt sind China und die Vereinigten Staaten (Abbildung 37). Europa liegt auf dem Verbrauchs- und Produktionsniveau von China.

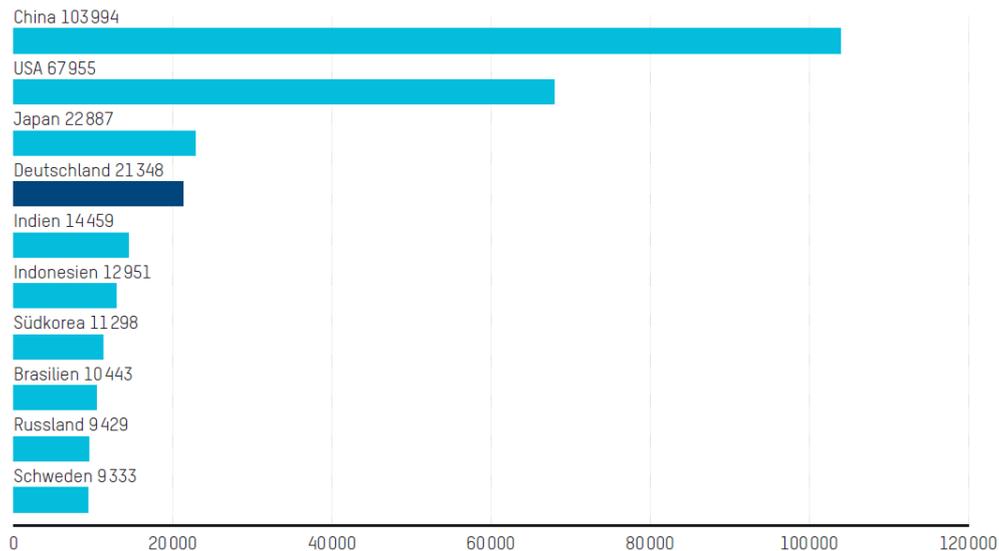


Abbildung 37: Die zehn größten Erzeugerländer von Papier, Karton und Pappe in 2020.

Quelle: Die Papierindustrie e.V., 2022.

Während der Verbrauch in Industrieländern als stabil eingeschätzt wird, gehen die Schätzungen für Entwicklungs- und Schwellenländer von steigenden Verbräuchen aus. Dabei existieren unterschiedliche Schätzungen für die Zukunft, welche in Tabelle 4 zusammengefasst sind.

	2032	2050	2065
Papierverbrauch in Mt	476	550, 770, 900	615
Jahr der Schätzung	2022 ¹²⁶	2019, ¹²⁷ 2011, ¹²⁸ 2009 ¹²⁹	2019 ¹³⁰

Tabelle 4: Schätzung des zukünftigen Papierverbrauchs weltweit.

Die Entwicklungen bezüglich webbasierter Informationsbereitstellung sowie Lieferservices von Endprodukten lassen ein Wachstum auf etwa 500–600 Mt im Jahr 2050 als realistisch erscheinen.

¹²⁵ Vgl. Die Papierindustrie e.V., 2022.

¹²⁶ Vgl. Statista, 2022.

¹²⁷ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹²⁸ Vgl. Cepi, 2011.

¹²⁹ Vgl. IEA, 2009.

¹³⁰ Vgl. Johnston & Radeloff, 2019.

Stärkeres Wachstum wird vor allem für Afrika, Lateinamerika und Südostasien erwartet (Abbildung 38 und Abbildung 39).

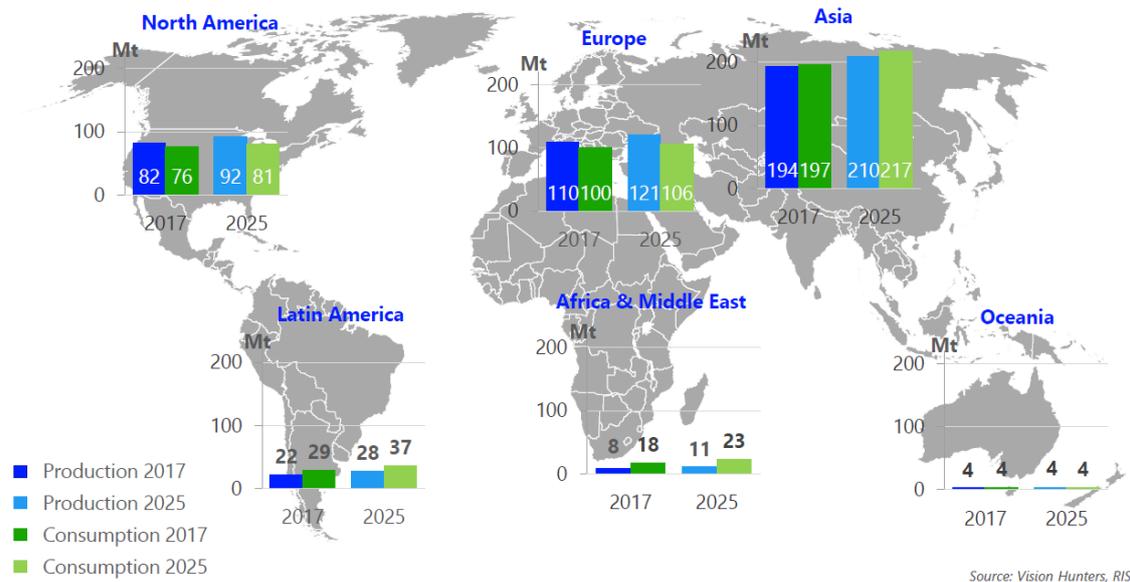


Abbildung 38: Entwicklung der Papierproduktion und des -verbrauchs nach Weltregion bis 2025.

Quelle: Häggblom, 2018.

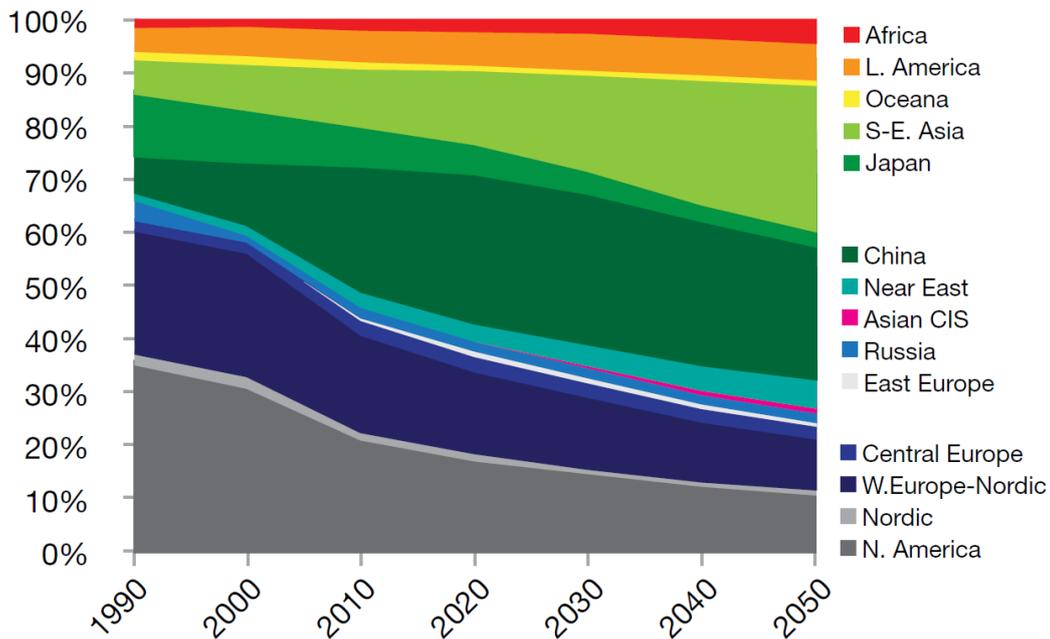


Abbildung 39: Weltweite Nachfrage nach Papier- und Pappe nach Region.

Quelle: Cepi, 2011.

Die Zellstoff- und Papierindustrie ist eine der fünf energieintensivsten Industrien weltweit und der viertgrößte industrielle Energieverbraucher. Die Herstellung von Zellstoff und Papier ist komplex, da insbesondere bei der Produktion von Zellstoff verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen

Energieverbräuchen existieren. Global gesehen kommen etwa 6 % des industriellen Energieverbrauchs und etwa 0,3–0,45 Gt oder 1–2 % der globalen THG-Emissionen aus dem Papiersektor.¹³¹

Je nach Land, eingesetzter Brennstoffe, Strommix und Herstellungsverfahren ist die CO₂-Intensität der Papierindustrie stark unterschiedlich. Allerdings hat sich die CO₂-Intensität der Papierproduktion in den vergangenen Dekaden aufgrund höherer Effizienz im Produktionsprozess und der verstärkten Verwendung von biogenen Brennstoffen schon stark reduziert. In Industrieländern nahm die CO₂-Intensität gegenüber 1990 um 50 % oder mehr ab. Da die produzierten Mengen jedoch um einen ähnlichen Faktor anstiegen und die Produktion weltweit in Ländern mit geringerer Energieeffizienz und somit höheren spezifischen Emissionen zunahm, blieben die THG-Emissionen global in den vergangenen Jahren auf stabilem Niveau. Eine Übersicht der spezifischen Emissionswerte zu unterschiedlichen Zeiten in verschiedenen Ländern und Regionen gibt Abbildung 40.

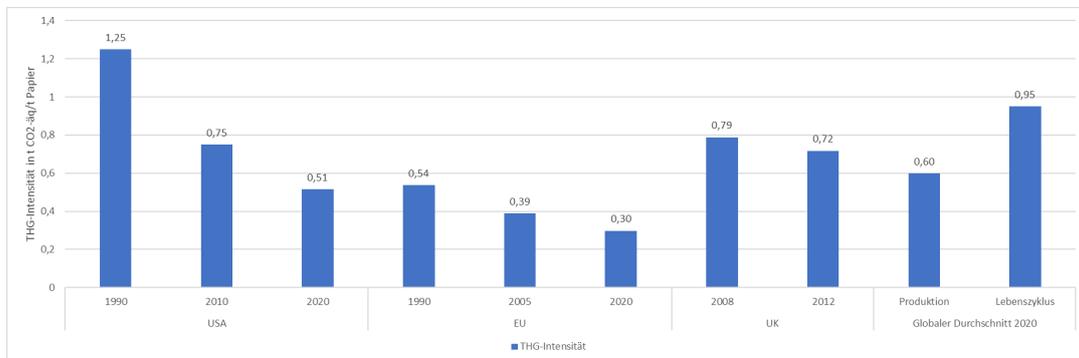


Abbildung 40: Treibhausgasintensität der Zellstoff- und Papierindustrie in verschiedenen Regionen und Jahren.

Datenquellen: American Forest & Paper Association, 2014; EPA, 2022; Die Papierindustrie e.V., 2022; Cepi, 2020; WSP, Parsons Brinckerhoff and DNV GL, 2015; Sun et al., 2018; Furszyfer Del Rio et al., 2022.

Eine große Problematik beim Vergleich der Zahlen stellt die Systemgrenze und die Art von Fabrik und Endprodukt dar. So wird im globalen Durchschnitt von einer CO₂-Intensität bei der Produktion von Zellstoff- und Papier von 0,6–0,95 t CO₂/t Papier ausgegangen.¹³² Eine weitere Studie, die den gesamten Lebenszyklus inklusive vor- und nachgelagerter Emissionen der Zellstoff- und Papierindustrie in China betrachtet, kommt zu einer weit höheren Emissionsintensität von 1,95–6,52 t CO₂/t Papier.¹³³ Die wichtigsten energetischen und emissionsbedingten Parameter der Zellstoff- und Papierherstellung sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

¹³¹ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022; van Ewijk et al., 2021.

¹³² Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹³³ Vgl. Sun et al., 2018.

Parameter	Werte
Energieintensität der Papierherstellung (Gesamtprozess)	5–35 GJ/Tonne Papier (je nach Prozess), Durchschnitt: 11–15 GJ/Tonne Papier
Energieintensität der Papierherstellung (Einzelprozesse) ¹³⁴	<p>Zellstoffproduktion</p> <p>2000–2500 kWh/t Strom (mechanische Verfahren) 700 kWh/t Strom, 3000–4000 kWh/t Wärme (chemische Verfahren)</p> <p>150–600 kWh/t Strom, 0–350 kWh/t Wärme (recycelte Fasern)</p> <p>Papierherstellung</p> <p>200–1000 kWh/t Strom, 900–1700 kWh/t Wärme</p>
Emissionsintensität der Papierherstellung	<p>0,6–0,95 t CO₂/Tonne Papier (effizienter Herstellungsprozess)</p> <p>1,95–6,52 t CO₂/Tonne Papier (kohlebasierter Herstellungsprozess)</p> <p>3–10 t CO₂/Tonne Papier (gesamter Lebenszyklus inklusive biogener THG-Emissionen)</p>
Emissionen im Herstellungsprozess (2020)	<p>300–450 Mt CO₂-äq (inklusive biogener THG-Emissionen)¹³⁵</p> <p>190 Mt CO₂-äq (exclusive biogener THG-Emissionen)¹³⁶</p>
Zellstoff- und Papierproduktion (2020)	400 Mt

Tabelle 5: Energie- und emissionsbedingte Parameter der Zellstoff- und Papierherstellung.

Bei Untersuchung der Emissionen, die bei Herstellung von Zellstoff und Papier auftreten, muss jedoch unterschieden werden zwischen dem gesamten Lebenszyklus und dem reinen Herstellungsprozess von Zellstoff oder Papier an sich. Im ersten Fall werden auch direkte und indirekte Emissionen aufgrund der Nutzung von Biomassen aus Plantagen oder der nachhaltigen Waldwirtschaft (FSC oder PEFC) sowie durch den Transport des Holzes oder des Papiers mit einbezogen. In diesem Kapitel wird vorrangig auf die Quellen der Emissionen im Herstellungsprozess eingegangen, da relevante indirekte Emissionsquellen in anderen Kapiteln erläutert werden (Kap 3.3 Verkehr und Kap 2.10 Nature-Based Solutions).

Dennoch soll die Übersicht aller dem Lebenszyklus der Papierherstellung zugeordneten Emissionsquellen in Abbildung 41 eine Einordnung zulassen. Etwa 50 % der Emissionen über den Lebenszyklus sind mit der Nutzung der Rohstoffe Holz oder Biomasse verbunden. Wichtig hierbei ist, dass die Verbrennung von Biomasse an sich klimaneutral sein kann, da die ausgestoßenen Treibhausgase zuvor durch die Entnahme aus der Atmosphäre in der Biomasse gebunden wurden.

¹³⁴ Vgl. Navigant, IER, Ffe, BBG und Partner, 2019.

¹³⁵ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹³⁶ Vgl. IEA, 2022b.

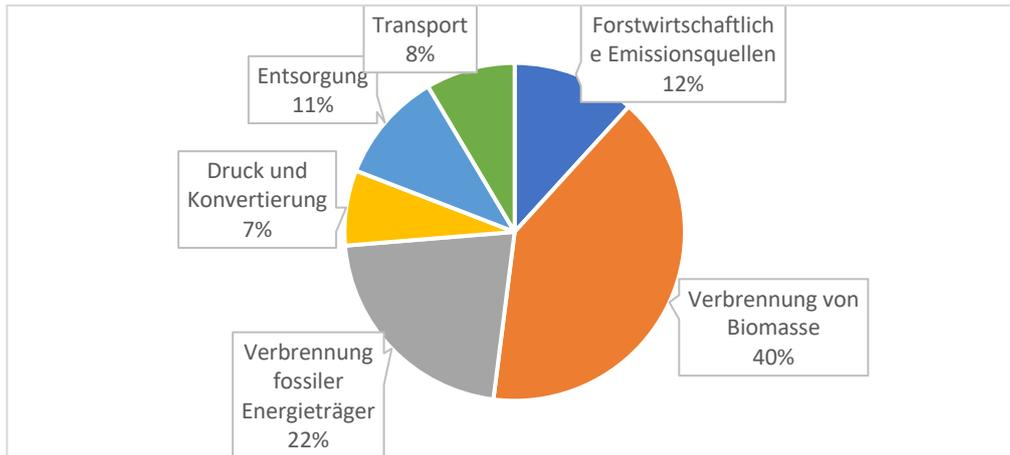


Abbildung 41: Anteilige Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus der Papierherstellung.

Quelle: European Environmental Paper Network, 2013.

3.2.4.2 Energieverbrauch und Quellen der CO₂-Emissionen

Der Herstellungsprozess

Da im weiteren Verlauf hauptsächlich die Emissionen im Herstellungsprozess betrachtet werden, ist es wichtig, diesen komplexen Prozess zu verstehen. Die Systemgrenze wird hier am Fabrikeingangstor der Zellstoff- oder Papierproduktionsanlage gezogen. Der Herstellungsprozess kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen (Abbildung 42 und Abbildung 43). Der Großteil der Herstellung von Zellstoff (EU: 70 %, global: 90 %) geschieht in spezialisierten Zellstofffabriken. Der Zellstoff wird anschließend in Papierfabriken zu Papierprodukten weiterverarbeitet. Es existieren allerdings auch integrierte Papierfabriken, bei denen sowohl die Zellstoff- als auch die Papierherstellung auf einem Gelände geschieht.

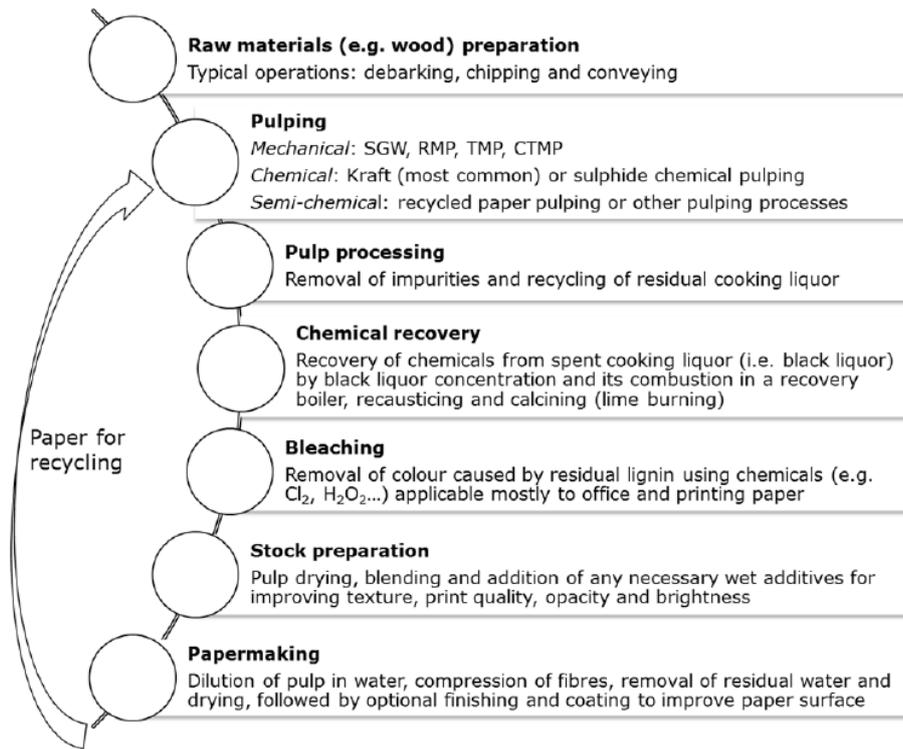


Abbildung 42: Prozesse in der Papier- und Zellstoffproduktion.

Quelle: Moya & Pavel, 2018.

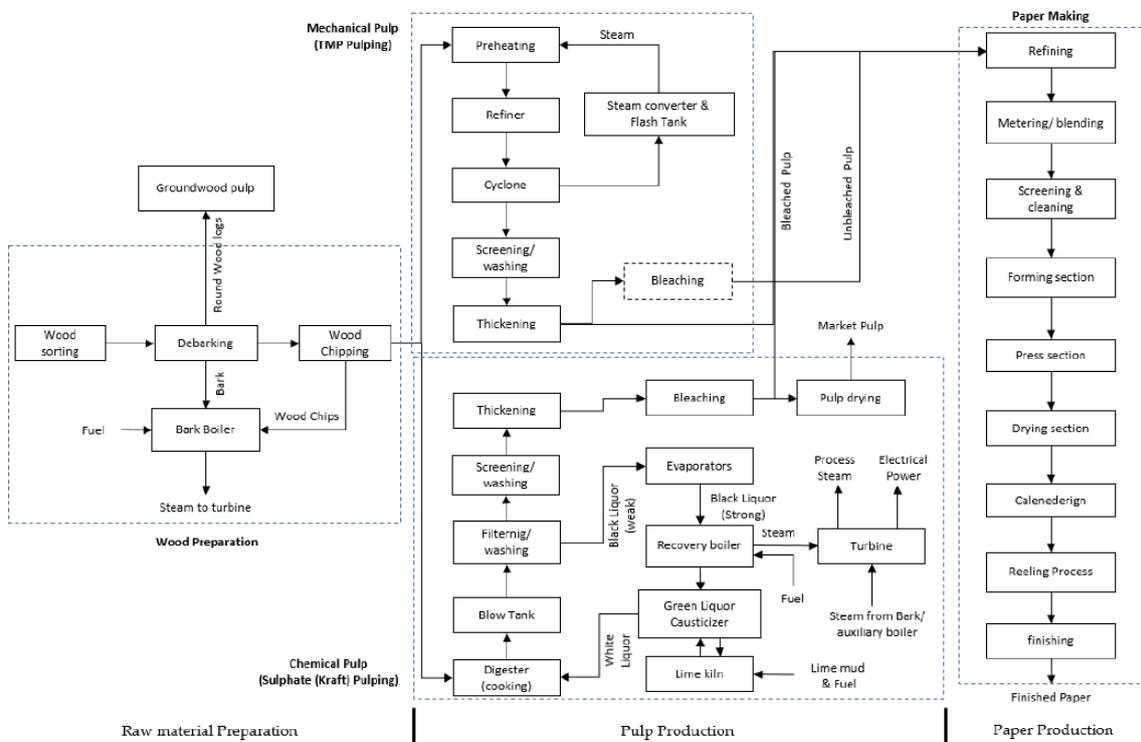


Abbildung 43: Prozessdiagramm verschiedener Verfahren der Papierherstellung.

Quelle: Mobarakeh et al., 2021.

Die nachfolgende Prozessbeschreibung der Papierherstellung ist angelehnt an eine Reihe von Veröffentlichungen und soll nur einen Überblick, jedoch keine Detailbeschreibung der einzelnen Prozessschritte geben.¹³⁷ Zellstoff und Papier werden aus Zellulosefasern und anderen Pflanzenmaterialien hergestellt. Im Allgemeinen liefern Weichhölzer (z. B. Kiefern, Tannen und Fichten) lange und starke Fasern, die dem Papier Festigkeit verleihen und für Kisten und Verpackungen verwendet werden. Laubhölzer ergeben ein schwächeres Papier, da sie kürzere Fasern enthalten. Weichhölzer sind glatter, transparent und besser für den Druck geeignet.

Vorbereitung des Rohmaterials

Das Holz, das in eine Zellstofffabrik geliefert wird, kann in unterschiedlicher Form vorliegen. Dies hängt vom Aufschlussverfahren (Aufbrechen der Faserbindungen) und von der Herkunft des Rohstoffs ab. Es kann in Form von Stämmen aus Rundholz mit noch anhaftender Rinde oder als Späne vorliegen, die in einem Sägewerk aus entrindetem Rundholz hergestellt wurden. Bei Verwendung von Rundholz wird dieses zunächst entrindet. In der Regel findet dies in großen Stahltrommeln statt. Die entrineten Holzstämme werden dann in einem Hacker zerkleinert, wenn der Zellstoffprozess einen chemischen Aufschluss erfordert. Die Hackschnitzel werden dann nach Größe sortiert, gereinigt und für die weitere Verarbeitung zwischengelagert und den weiteren Prozessen nach Bedarf zugeführt. Auch Altpapier kann recycelt werden und kann nach Reinigung und teilweiser Mischung mit neuen Fasern erneut in den Zellstoffproduktionsprozess gegeben werden. Über 50 % des weltweit produzierten Zellstoffs wird aus recyceltem Papier hergestellt.¹³⁸

Holzaufschluss und Zellstoffherstellung (Pulping)

In der Phase der Faserabtrennung werden verschiedene Aufschlussverfahren verwendet: mechanische, chemische oder eine Kombination der beiden Verfahren. Im Jahr 2016 wurden rund 77 % des in der EU insgesamt erzeugten Zellstoffs durch chemische Verfahren und 23 % durch mechanische Verfahren.¹³⁹ Global betrachtet entfällt mehr als 90 % der Zellstoffproduktion auf das chemische Kraft-Verfahren.¹⁴⁰ Die Herstellung von Zellstoff im chemischen Aufschlussverfahren geschieht in speziellen Zellstofffabriken, die nur in seltensten Fällen direkt mit der Papierherstellung integriert sind.

Das mechanische Verfahren ist die älteste Form des Holzaufschlusses, bei der Schwächung und Abtrennung der Fasern vom Holz durch Zerkleinerung (Holzschliff) und Wärmezufuhr geschieht. Für die Zellstoffherstellung können verschiedene mechanische Verfahren eingesetzt werden (stone

¹³⁷ Vgl. Moya & Pavel, 2018; Ochre Media, 2022; Mobarakeh et al., 2021.

¹³⁸ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹³⁹ Vgl. Cepi, 2022.

¹⁴⁰ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

groundwood-SGW, thermo groundwood-TGW, pressurized groundwood-PGW, refiner mechanical pulping-RMP, thermomechanical pulping-TMP und chemi-thermomechanical pulping-CTMP). Diese unterscheiden sich bezüglich der verwendeten Maschinen und des benötigten Temperaturniveaus. Elektrizität ist die Hauptenergiequelle bei der Herstellung im mechanischen Verfahren. Der größte Teil davon wird im Prozess zu Wärme umgewandelt und kann in Teilen zurückgewonnen und in anderen Prozessen oder für Fernwärme genutzt werden.

Im chemischen Verfahren werden die Fasern aus dem Holz in einem Kocher unter Druck mit Hilfe von „Kochchemikalien“ aus dem Holz extrahiert und durch Waschen abgetrennt. Je nach Art der für den Aufschluss verwendeten Chemikalien werden zwei Hauptverfahren unterschieden: Kraft (oder Sulfat) und Sulfit. Beim Kraft-Verfahren wird eine stark alkalische Lösung (Weißlauge), die Natriumhydroxid (NaOH) und Natriumsulfid (Na₂S) enthält, zum Aufschluss genutzt. Im Sulfit-Verfahren hingegen findet der Holzaufschluss in einer sauren Mischung (Sulfit-Kochlauge) aus schwefliger Säure (H₂SO₃) und Bisulfit-Ionen statt (HSO₃). Die bei der Holzkochung anfallende und im Verwertungskreislauf weiterbehandelte Schwarzlauge ist ein energieintensives Nebenprodukt des Herstellungsprozess von Zellstoff. Sie enthält Holzabfälle, Chemikalien und andere Verunreinigungen. Diese Lauge wird im Rückgewinnungskessel des Kraftwerks vor Ort verbrannt. Dabei entsteht Dampf, der später in einer Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt werden kann.

Bleichverfahren

Je nach Endverwendung kann Zellstoff mit verschiedenen Chemikalien gebleicht werden (z. B. Chlordioxid, Wasserstoffperoxid, Sauerstoff, Ätzmittel und Natriumhypochlorit), um helle oder weiße Papiere herzustellen, die für viele Produkte bevorzugt werden. Bevor er zu Papier verarbeitet wird, durchläuft der Zellstoff mehrere Schritte, die als Stoffaufbereitung bezeichnet werden. Die Stoffaufbereitung kann auch das Mischen und Hinzufügen von Zusatzstoffen (z. B. Harze, Wachse zur Wasserabweisung sowie bestimmte anorganische Chemikalien) zur Verbesserung der Textur, Druckqualität, Opazität und Helligkeit beinhalten.

Papierherstellung

Der Zellstoff kann nun zu Papier weiterverarbeitet werden. Dabei wird im ersten und oft sehr energieintensiven Prozess die Feuchtigkeit durch verschiedene mechanische und thermische Verfahren reduziert. Anschließend wird der Zellstoff in Form von Papier oder Karton aufgerollt. Um die Oberflächenqualität zu verbessern, kann das Papier nach Trocknung zusätzlichen Verfahren unterzogen werden. Diese Veredelung und Beschichtung erfolgt mit Farbstoffen, Pigmenten und Bindemitteln. Bei der Endbearbeitung werden die Papierrollen mit einem Rollenschneider in kleinere Rollen zerteilt.

Integrierte Fabriken (Zellstoff und Papier) können energieeffizienter als nicht-integrierte Fabriken (nur Papier) sein, da Energieerzeugung und Abwärmenutzung in integrierten Fabriken besser optimiert werden können.

Energieverbrauch im Herstellungsprozess

Aufgrund des breiten Spektrums an Prozessen der Zellstoffherstellung variiert der Energieeinsatz je nach verwendeten Rohstoffen, der Papierqualität und den angewandten Techniken. Auch der spezifische Energieverbrauch für ein- und dasselbe Verfahren kann aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung des Rohmaterials, der verschiedenen Verfahrensweisen und den Einsatz unterschiedlicher Technologien stark variieren. Beim mechanischen und thermo-mechanischen Aufschluss (TMP) wird hauptsächlich Strom für den Antrieb der Mahl- und Zerkleinerungsanlagen benötigt, während chemischer Aufschluss in hohem Maße auf Dampf angewiesen ist. Jedoch können Wärme und Strom durch die Verbrennung der Biomasserückstände erzeugt werden, die als Nebenprodukt beim chemischen Aufschluss anfallen. So können manche Zellstofffabriken mehr Strom erzeugen als sie benötigen. Im Papierherstellungsprozess selbst ist die Trocknung der energieintensivste Schritt und macht etwa zwei Drittel des gesamten Energieverbrauchs bei der Papierherstellung aus. Der durchschnittliche Energieverbrauch verschiedener Verfahrensschritte ist in Abbildung 44 und Tabelle 6 dargestellt.



Abbildung 44: Durchschnittlicher Energieverbrauch in GJ/Tonne für Herstellungsprozesse für Zellstoff und Papier.

Quelle: Moya & Pavel, 2018.

Prozess	Arbeitsschritt	Stromverbrauch	Wärmeverbrauch
Rohstoffbearbeitung		kWh/t Holz	GJ/t Holz
	Entrindung	7–10	0
	Zerkleinerung und Weitertransport	30	0
		kWh/t air-dry pulp	GJ/t air-dry pulp
Mechanischer Holzaufschluss	Holzschliff	1100–2200	0
	RMP	1600–3000	0
	TMP	1800–3600	0,9
	Waschen und Sieben	50	
	Bleichung	100	
Chemischer Holzaufschluss	Kraft-Verfahren	406	2,4–5,6
	Sulfit-Verfahren	226–1360	4,1–6,5
	Waschen und Sieben	30	0
	Delignifikation	75	0,5
	Bleichung	60–185	4,3
	Chemische Wiederaufbereitung	133	4,1–9,2
	Trocknung	90–160	2,5–4,5
Zellstoffherstellung aus recyceltem Papier	Faseraufschluss	265–429	0
	Sieben	50	0
	Entfärbung	80	0
	Konzentration	40	0,5
	Bleichung	30	
			kWh/t Papier
Papierproduktion	Formen und Pressen	270–533	0
	Trocknung	15–132	4.2–5.5

Tabelle 6: Spezifischer Strom- und Wärmeverbrauch verschiedener Herstellungsprozesse und -schritte für Zellstoff und Papier.

Quelle: Mobarakeh et al., 2021.

Die Herstellung einer Tonne Papier erfordert durchschnittlich etwa 11–15 GJ (je nach Prozess 5–35 GJ) an Primärenergie und ist vergleichbar mit der Herstellung anderer energieintensiver Produkte wie Stahl oder Zement.¹⁴¹ Aufgrund der Vielzahl von Prozessen, der Unterteilung in Zellstoff- und Papierherstellung (integriert oder nicht-integriert) und der Verwendung unterschiedlicher Energieträger (Holz, Gas, Kohle, Wärme, Strom) ist ein Vergleich von Herstellungsprozessen und einzelnen Fabriken äußerst komplex. Laut einer Studie auf Basis von mehr als 60 Papierherstellungsanlagen ist die Zellstoffherstellung im Durchschnitt für 62 % des Energieverbrauchs und 45 % der THG-Emissionen verantwortlich.¹⁴² Eine weitere Studie stellte fest, dass auf die Zellstoffherstellung etwa 94 % des Wärmeverbrauchs und 47 % des Stromverbrauchs entfallen, auf die Papierherstellung jedoch nur 5 % des Wärmeverbrauchs aber 42 % des Stromverbrauchs.¹⁴³ In der EU entfallen 93 % des Gesamtenergieverbrauchs auf Wärmeenergie, die restlichen 7 % auf Elektrizität. In einer Studie über die Papierindustrie in Österreich teilt sich die Endenergie zu fast 74 % auf Dampferzeugung in den Trocknungs- und Trennverfahren, zu 20 % auf Elektromotoren, zu 3 % auf Industrieöfen und zu knapp 3 % auf den Energieverbrauch des Gebäudes.¹⁴⁴

¹⁴¹ Vgl. Moya & Pavel, 2018; Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁴² Vgl. Sun et al., 2018.

¹⁴³ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁴⁴ Vgl. Mobarakeh et al., 2021.

CO₂-Emissionen in der Zellstoff- und Papierindustrie

Wichtige Emissionsquellen in der Zellstoff- und Papierindustrie über den gesamten Lebenszyklus sind in Abbildung 45 dargestellt.

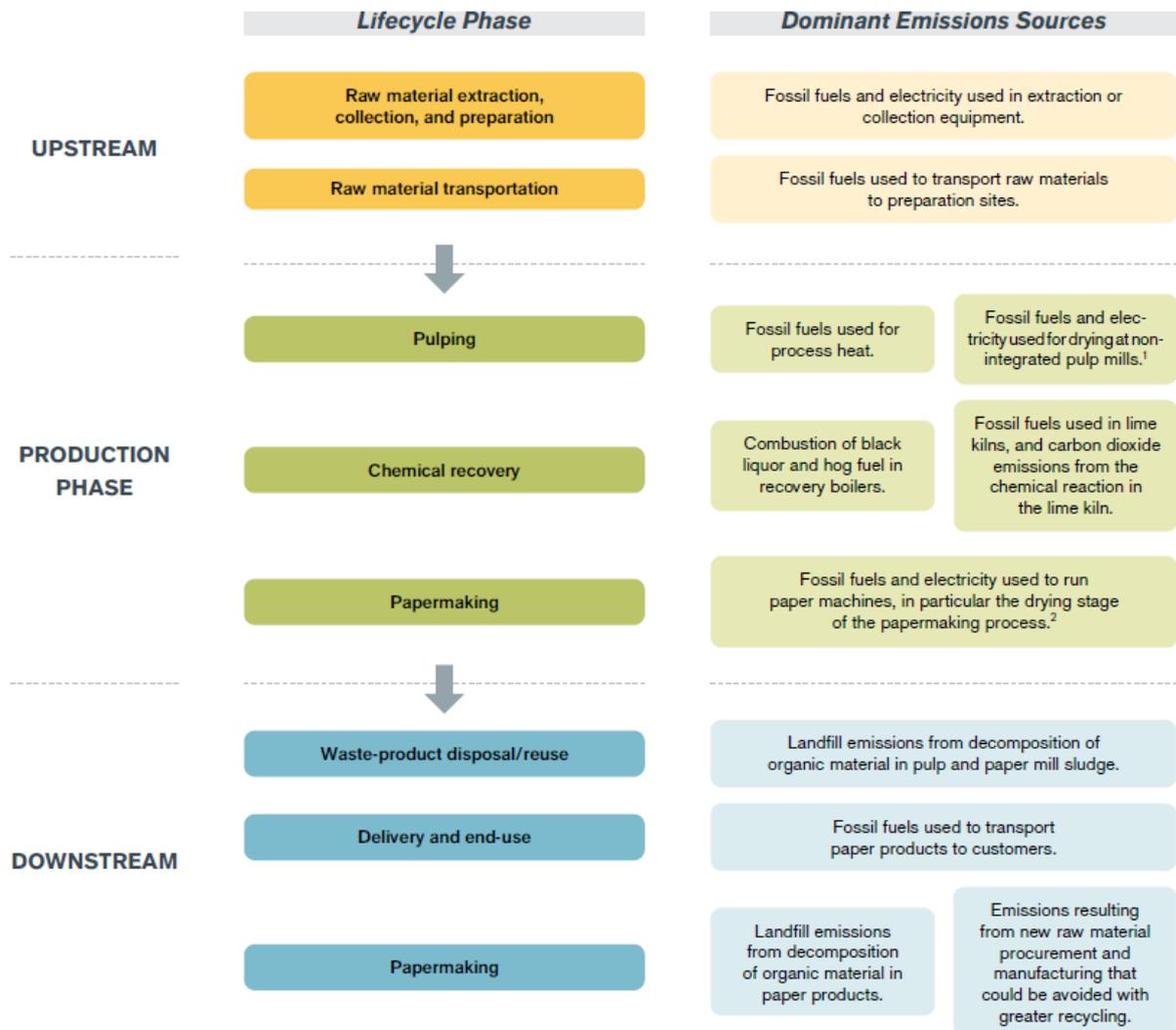


Abbildung 45: THG-Emissionsquellen von Zellstoff und Papier über den Lebenszyklus.

Quelle: Clean Energy Transition Institute, 2022.

Indirekte Emissionen aus dem Bezug der Rohmaterialien und deren Transport sowie auch Emissionen aus der Deponierung oder der Verbrennung von Abfallpapier werden in der folgenden Analyse der CO₂-Minderungsmöglichkeiten nur am Rande berücksichtigt. Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes der Emissionsreduktion muss die Zellstoff- und Papierindustrie jedoch insbesondere auch die nachgelagerten Emissionen berücksichtigen. Durch erhöhte Materialeffizienz und der Entwicklung einer noch weitgehenderen Kreislaufwirtschaft kann der Sektor auch hier weitere Emissionen vermeiden.

Trotz ihres hohen Energieverbrauchs ist die Zellstoff- und Papierindustrie einer der am wenigsten CO₂-intensiven Industriesektoren in Europa und weltweit. Dies ist auf den hohen Einsatz von

Biomasse als Primärenergiequelle zurückzuführen.¹⁴⁵ Ebenso konnten die spezifischen THG-Emissionen pro Tonne hergestellten Papiers in den vergangenen Jahren zumindest in Industrieländer stark reduziert werden (Abbildung 40). Die Verwendung von Biomasse als Brennstoff, eine erhöhte Prozesseffizienz, die Nutzung von Abwärme und der sinkende Emissionsfaktor des bezogenen Stroms aus dem Netz durch den Ausbau erneuerbarer Energien spielten hierbei die wichtigste Rolle.¹⁴⁶ Nichtsdestotrotz weist die Zellstoff- und Papierindustrie eine der höchsten Kohlenstoffintensitäten aller Industrien auf (gemessen als t CO₂e pro USD der Bruttowertschöpfung). Der Anteil der Energie an den Kosten der Industrie beträgt im Durchschnitt etwa 16 %, je nach Land jedoch bis zu 30 %.¹⁴⁷

Ein Großteil der Emissionen entsteht in den Prozessen des Holzaufschlusses. Die THG-Emissionen bei Herstellung von Zellstoff durch unterschiedliche Verfahren liegen bei:¹⁴⁸

- Kraft-Verfahren: 508 kg CO₂-äq/t;
- Chemisch-mechanisches Verfahren: 513 kg CO₂-äq/t;
- Recycling-Zellstoff: 408 kg CO₂-äq/t.

Da das Kraft-Verfahren bei der Produktion je nach Region einen Anteil von 70–90 % hat, entstehen in diesem Prozess etwa 70–80 % der Emissionen aus der Zellstoff- und Papierindustrie weltweit.¹⁴⁹ Die Quellen der CO₂-Emissionen sind dabei die Brennöfen für Kalk und die Kraftwerke zur Erzeugung von Wärme und Strom (Abbildung 45 und Abbildung 46). Hier sei noch einmal darauf hingewiesen, dass der Einsatz von biogenen Brennstoffen fossile Emissionen reduziert. Der Prozess der Zellstoffherstellung und bei integrierten Anlagen auch die Papierherstellung kann daher mit einer geringeren CO₂-Intensität oder teilweise sogar klimaneutral stattfinden.

¹⁴⁵ Vgl. Moya & Pavel, 2018.

¹⁴⁶ Vgl. WSP, Parsons Brinckerhoff and DNV GL, 2015.

¹⁴⁷ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁴⁸ Vgl. Sun et al., 2018.

¹⁴⁹ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

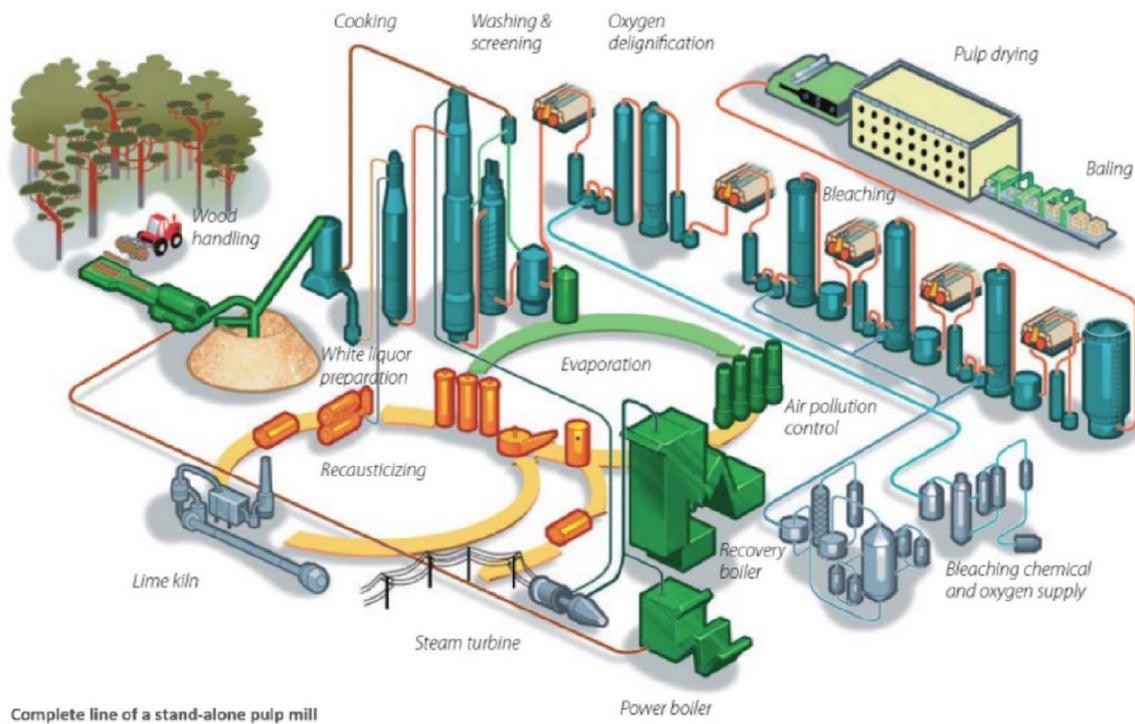


Abbildung 46: Zellstoffherstellungsanlage mit geschlossenem chemischen Kreislauf.

Quelle: Furszyfer Del Rio et al., 2022.

3.2.4.3 Technische Möglichkeiten zur CO₂-Minderung

Eine tiefgehende Untersuchung aller Maßnahmen zur Dekarbonisierung der gesamten Lieferkette und der nachgelagerten Emissionen übersteigt den Umfang dieses Kapitels. Es existieren jedoch detaillierte Studien zu diesem Thema.¹⁵⁰

Neben der Regenerierung von Wäldern ist auch die Nutzung von nicht-holzbasierter Biomasse im Herstellungsprozess eine Möglichkeit THG-Emissionen in der vorgelagerten Lieferkette zu vermeiden. Im Produktionsprozess von Zellstoff und Papier gibt es eine Reihe von Minderungspotenzialen durch erhöhte Ressourcen-, Energie- und Abfalleffizienz. Der Austausch alter Technologien durch effizientere Anlagen, die stärkere Nutzung von Nebenprodukten (Abfallbiomasse für Energieerzeugung) aber auch die Abscheidung, Nutzung und Speicher von CO₂-Emissionen (CCUS) bietet große Potenziale. Die verfahrenstechnische Optimierung und der Ersatz fossiler Brennstoffe stehen in der chemischen Wiederaufbereitung im Vordergrund. Eine erhöhte Recyclingquote und Wiederverwendung von Zellstoff- und Papierprodukten kann ebenfalls zu geringeren THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus führen. Abbildung 47 und Abbildung 48 stellen Teilbereiche der Industrie und mögliche Ansätze und Optionen zur THG-Emissionsminderung dar.

¹⁵⁰ Vgl. Moya & Pavel, 2018; Mobarakeh et al., 2021; WSP, Parsons Brinckerhoff and DNV GL, 2015; Furszyfer Del Rio et al., 2022.

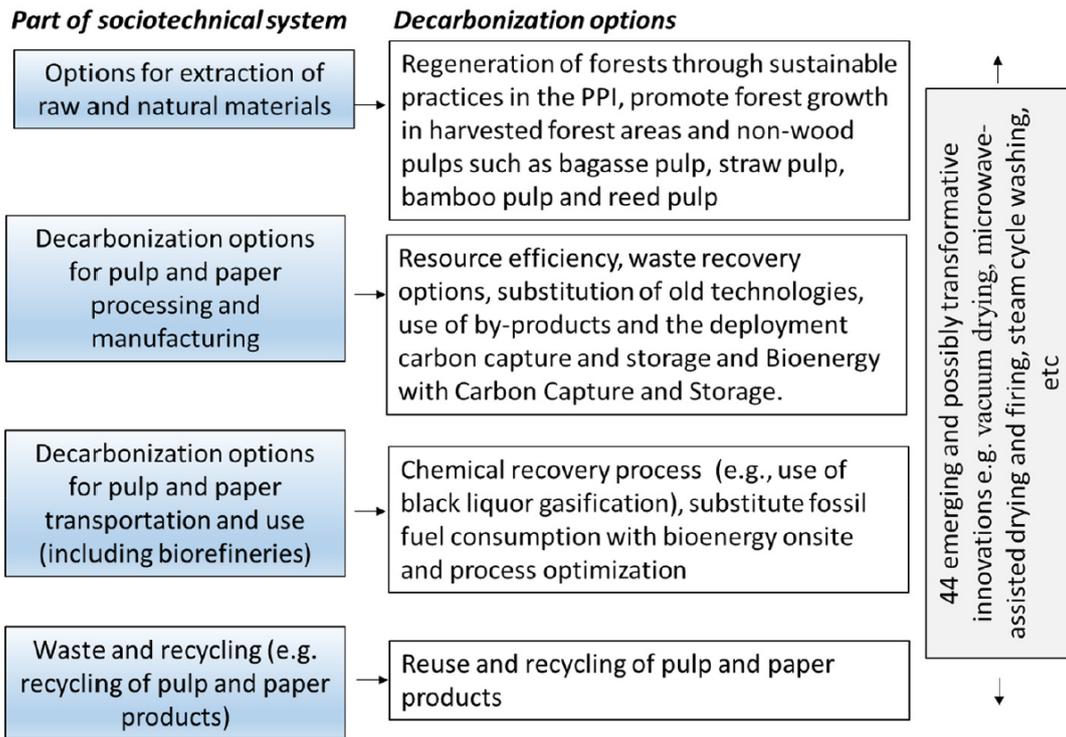


Abbildung 47: Optionen zur THG-Minderung und Dekarbonisierung über den Lebenszyklus von Zellstoff und Papier.

Quelle: Furszyfer Del Rio et al., 2022.

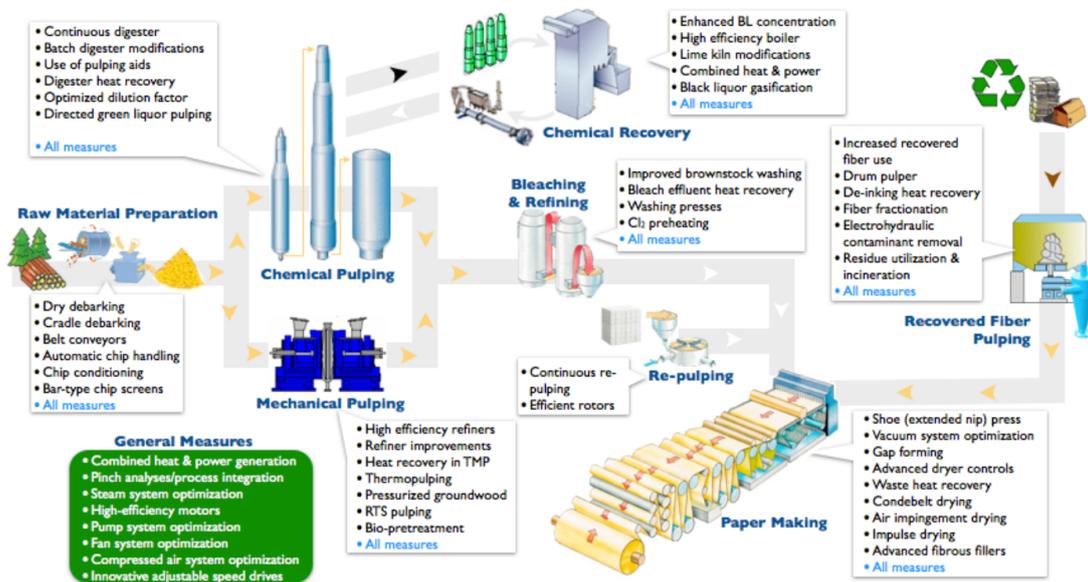


Abbildung 48: Technische und operationelle Maßnahmen zur Erhöhung der Prozess- und Energieeffizienz und der Einsparung von THG in der Zellstoff- und Papierproduktion.

Quelle: Institute for Industrial Productivity, 2013.

Im Folgenden werden einige der Optionen genauer betrachtet, wobei der Fokus auf den Produktionsprozessen in der Industrie liegt.

Einsatz von Biomasse

Die Nutzung von Biomasse als Brennstoff für die Strom und Wärmeerzeugung stellt einen großen Hebel dar, die fossilen THG-Emissionen im Sektor zu senken. Sowohl biogene Neben- und Abfallprodukte als auch originäre Biomasse können dabei in den fabrikeigenen Kraftwerken und Verbrennungsprozessen verwendet werden. In Europa und den USA macht der Anteil von Biomasse in der Energieerzeugung etwa 60 % aus.¹⁵¹ In vielen Ländern Asiens ist jedoch der Anteil von fossilen Energieträgern, insbesondere Kohle noch relativ hoch. Eine Übersicht der verwendeten Energieträger in verschiedenen Weltregionen ist in Abbildung 49 dargestellt.

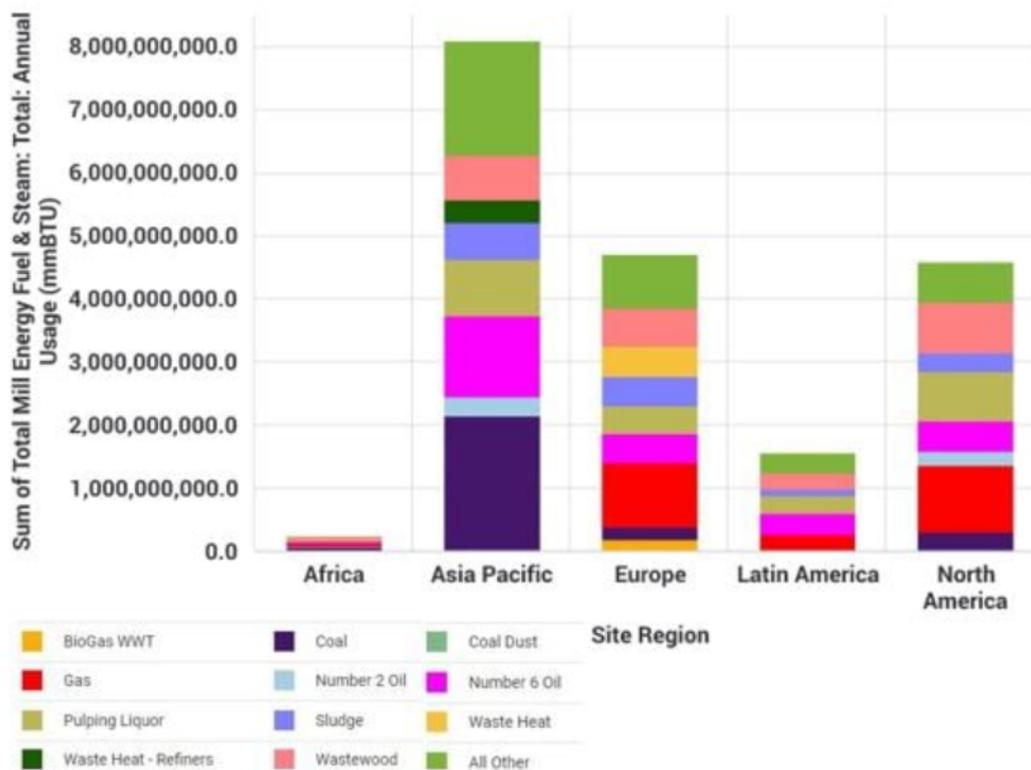


Abbildung 49: Verwendete Energieträger in der Zellstoff- und Papierindustrie in verschiedenen Weltregionen.

Quelle: Fisher International, 2022.

Die Integration von Biomasse als Energieträger in den Prozess der Papierherstellung kann in vielen Ländern noch optimiert werden. Auch die Nutzung von biogenen Nebenprodukten und Abfällen kann hierbei eine wichtige Rolle spielen.

¹⁵¹ Vgl. American Forest & Paper Association, 2021; Cepi, 2022.

Kraft-Wärme-Kopplung

Der Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) erlaubt es der Industrie den Verbrauch von Energie und Emissionen zu verringern. Der Wirkungsgrad von KWK-Anlagen, die mit fossilen Brennstoffen oder Bioenergie betrieben werden, kann Werte zwischen 85 und 92 % erreichen. Die Zellstoff- und Papierindustrie ist einer der größten Nutzer der KWK, da Energieeinsparungen von rund 30 % erzielt werden können. Etwa 10 % der gesamten KWK-Kapazität in Europa entfallen auf die Zellstoff- und Papierindustrie und macht sie zum drittgrößten KWK-Nutzer in der Industrie nach Raffinerien und der chemischen Industrie.¹⁵² Im Jahr 2020 hat die europäische Papierindustrie über 55 % des Strombedarfs selbst erzeugt, und davon fast 96 % in KWK-Anlagen.¹⁵³ Die KWK ist auch eine entscheidende Technologie für die effiziente Nutzung von Biomasse als Brennstoff. Auch Gas ist ein Brennstoff, der in KWK-Anlagen effizient verwendet werden kann. Die Verfügbarkeit und Kosten von Erdgas und die Größe des Standorts sind weitere entscheidende Faktoren für die Einführung der KWK-Technologie. Die Amortisationszeit für ein neues KWK-System in einem großen Werk kann etwa 3 Jahre betragen.¹⁵⁴

Eine Vielzahl von KWK-Konfigurationen kann je nach den spezifischen Bedingungen der Fabrik eingesetzt werden, um die beste Energieeffizienz und Flexibilität bei den niedrigsten Lebenszykluskosten zu erreichen. Herkömmliche Dampfturbinen und/oder Gasturbinen sind die am häufigsten installierten Systeme KWK-Systeme in der Zellstoff- und Papierindustrie. Dampfturbinen sind mit kesselbasierten Systemen verbunden, die Hochdruckdampf durch die Verbrennung von Brennstoffen vor Ort erzeugen (z.B. Schwarzlauge, Rinde, Abfall, flüssige, feste oder gasförmige Brennstoffe). Gasturbinen werden, sofern die heißen Rauchgase nicht in einem Trockner verwendet werden, mit Dampferzeugern mit Wärmerückgewinnung kombiniert.¹⁵⁵

Verbesserte Abwärmenutzung

Trocknungsprozesse sind mit die Hauptverursacher von Abwärme in der Herstellung von Papier. Daher können Technologien für die Bereitstellung von Prozesswärme einen sinnvollen Ansatz zur Emissionsminderung darstellen. Papierfabriken können bis zu 15 % der Primärenergie einsparen, wenn sie Verfahren zur Wärmerückgewinnung durch Wärmepumpen oder Wärmetauscher verwenden. Auch im Prozess des Holzaufschlusses und der Zellstoffherstellung, insbesondere in den thermo-mechanischen Verfahren tritt Abwärme auf und kann anderen Prozessen zufließen. Die wirtschaftliche Amortisation von Anlagen zur Abwärmenutzung ist stark fallabhängig. Es kann aber von Zeiträumen zwischen 3 und 6 Jahren ausgegangen werden.¹⁵⁶

¹⁵² Vgl. Moya & Pavel, 2018; Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁵³ Vgl. Cepi, 2022.

¹⁵⁴ Vgl. Moya & Pavel, 2018.

¹⁵⁵ Vgl. Moya & Pavel, 2018.

¹⁵⁶ Vgl. Moya & Pavel, 2018; Furszyfer Del Rio et al., 2022; Mobarakeh et al., 2021.

Elektrifizierung und Wärmepumpen

Die Nutzung von kohlenstoffarmen Strom ist ebenfalls eine wesentliche Maßnahme zur Dekarbonisierung und der Verringerung von THG-Emissionen. Über die Nutzung industrieller Wärmepumpen und Elektrokessel kann Strom eine Alternative zu anderen (fossilen) Brennstoffen für die Erzeugung von Warmwasser und Dampf sein. Hierbei könnte insbesondere eine vollständige Elektrifizierung der Trocknungsprozesse die Emissionen um über 70 % senken.¹⁵⁷ Kommerzielle Versuche mit Wärmepumpen, die bei 160 Grad laufen, sind im Gange, und es gibt bereits Entwürfe für Wärmepumpen, die 200 Grad erreichen – mehr als genug für die einige Prozesse in der Papierherstellung. Die Industrie arbeitet im Rahmen ihres Energy Solutions Forum auch mit Anbietern industrieller Wärmepumpen zusammen.¹⁵⁸

Jedoch ist Möglichkeit und Sinnhaftigkeit der Elektrifizierung von Prozessen stark abhängig von dem individuellen Energieversorgungskonzept und den Prozessen in einer konkreten Fabrik. Der Bezug von CO₂-freiem Strom aus dem öffentlichen Netz spielt für die Dekarbonisierung des nicht in der Fabrik selbst produzierten Stroms eine große Rolle.

Bioraffinerien und Verwertung biogener Reststoffen

Für die Minderung der THG-Emissionen insbesondere in der Zellstoffproduktion ist die Entwicklung von Bioraffinerien eine Möglichkeit erhebliche technologische, wirtschaftliche und soziale Vorteile zu heben.¹⁵⁹ In den verschiedensten Anwendungsfällen wird in einer Bioraffinerie Biomasse als Rohstoff genutzt um Ausgangsmaterialien für den Produktionsprozess sowie gasförmige oder flüssige Energieträger zu erzeugen (Abbildung 50). Eine stärkere Verbindung und der Aufbau von Synergien zwischen Chemie- und Zellstoffindustrie sowie Potenziale zur Dekarbonisierung in beiden können durch Bioraffinerien hergestellt werden. Mögliche Einsatzstoffe sind Holzextrakt, Schwarzlauge, Forstbiomasse oder andere zellulosehaltige Produkte als auch Klärschlamm.¹⁶⁰ Drei Anwendungsfälle (Nutzung organischer Schlämme, Schwarzlaugenvergasung und Deep Eutectic Solvents) werden nachfolgend genauer beschrieben.

In der Zellstoffproduktion fallen große Mengen an organischen Schlämmen an, die in neuen Wertschöpfungsketten anderweitig eingesetzt werden könnten. Die Rückgewinnung von Energie aus Schlämmen kann entweder direkt durch Verbrennung oder indirekt durch physikalisch-chemische und mikrobiologische Prozesse ermöglicht werden. Dabei kann Biokraftstoff (durch Pyrolyse und Bioethanolproduktion) und/oder Biogas (durch anaerobe Vergärung) hergestellt werden. Die Nutzung dieser Syntheseprodukte in den Fabriken kann den Einsatz neuer fossiler und auch biogener Brenn- und Rohstoffe vermindern und dadurch zu THG-Minderung beitragen. Die Schwarz-

¹⁵⁷ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁵⁸ Vgl. Packaging Europe, 2021; Capi, 2021.

¹⁵⁹ Vgl. Capi, 2021b.

¹⁶⁰ Vgl. Moya & Pavel, 2018.

laugenvergasung (Black Liquor Gasification) erlaubt es aus dem organischen Anteil der Schwarzlauge durch Vergasung Synthesegas herzustellen. Nach Aufbereitung und Konditionierung kann der anorganische Teil wieder in den chemischen Prozess der Zellstoffherstellung eingebracht werden. Das Synthesegas kann zur Dampf-, Wärme,- und Stromerzeugung in der Fabrik genutzt werden. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich aus der Valorisierung durch Herstellung von Biokraftstoffen wie Dimethylether (DME) oder Methanol.¹⁶¹ Im Forschungsstadium befindet sich noch die Entwicklung von Deep Eutectic Solvents (DES). Diese neue Klasse von biobasierten Lösungsmitteln ist erneuerbar, biologisch abbaubar und schwerflüchtig. Die DES-basierte Zellstofftechnologie bietet eine deutlich nachhaltigere Wertschöpfungskette, die energie-, kosten- und ressourceneffizient ist. Da der DES-Zellstoffaufschluss bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck arbeitet, wird weniger Energie benötigt, so dass der Lignin-Nebenstrom für andere Anwendungen zur Verfügung steht. Der DES-Zellstoffaufschluss ebenfalls ein Biorefineriekonzept, das Zellulosefasern für die Papierherstellung produziert und gleichzeitig hochwertige Hemizellulose- und Ligninfraktionen für großvolumige Anwendungen liefert. Durch den Einsatz der DES-Technologie könnten der Energieverbrauch um 40 % und die CO₂-Emissionen in der gesamten Wertschöpfungskette um 80 % gesenkt werden.¹⁶²

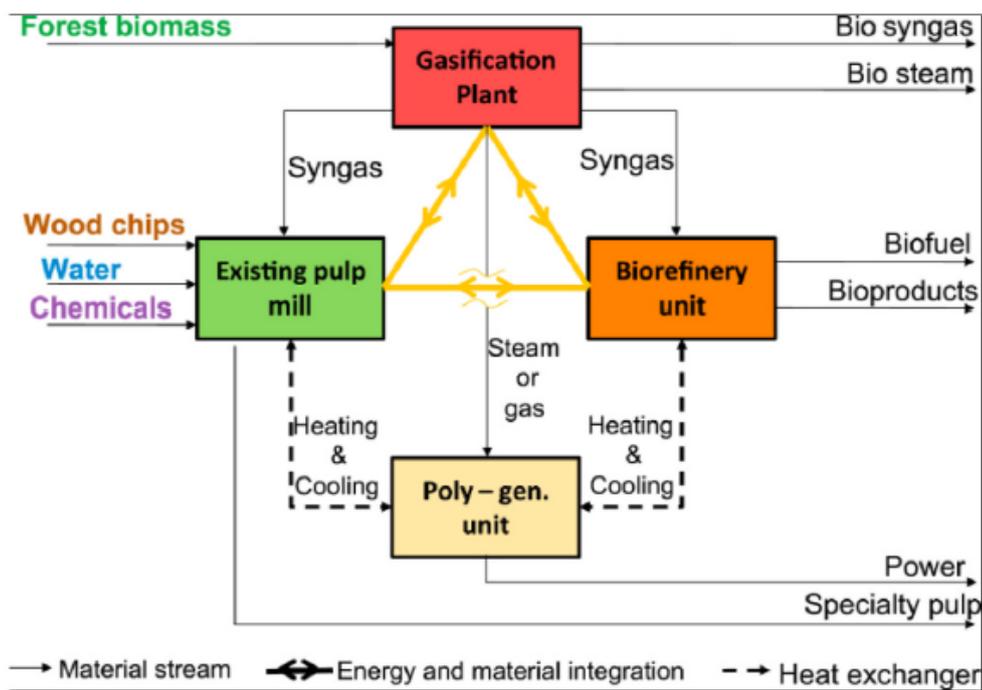


Abbildung 50: Energie- und Materialströme in einer Biorefinerie.

Quelle: Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁶¹ Vgl. Moya & Pavel, 2018; Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁶² Vgl. ISPT, 2022; Cepi, 2017.

CCUS

Auch der Einsatz von CCUS kann in einer energieintensiven Industrie wie der Papierherstellung eine Rolle zur Vermeidung von CO₂-Emissionen darstellen. In der Zellstoff- und Papierindustrie stammt ein großer Teil der CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse. Das Potenzial für die Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (CCS) in der Zellstoffherstellung ist beträchtlich (Technologien zur Abscheidung von CO₂ werden im Detail in Kapitel 2.3 beschrieben). Der beste Ansatz ist die Abscheidung von CO₂ in der Zellstoffproduktion aus den Rauchgasen des Rückgewinnungskessels oder des Kalkofens. Die Abscheidung von CO₂ in Post-Combustion-Anlagen (Aminwäsche oder Membranen)¹⁶³ bietet hierbei die einfachste Lösung, wobei die Kosten zwischen 50–80 USD/Tonne liegen könnten.¹⁶⁴

Die Abscheidung und Speicherung von biogenen Emissionen könnte der Zellstoff- und Papierindustrie erlauben als potenzielle Kohlenstoffsenke zu fungieren (Bioenergy and CCS – BECCS).¹⁶⁵ Das jährliche BECCS-Potenzial in der globalen Zellstoff- und Papierindustrie wird auf 60–350 MtCO₂ geschätzt.¹⁶⁶ Bei Abscheidungsquoten durch CCS von 50 % und bei Nutzung von 50 % biogener Brennstoffe, könnte die Zellstoffherstellung demnach klimaneutral werden. Weiterhin könnte das so abgeschiedene CO₂ auch Verwendung bei der Herstellung von anderen CO₂-neutralen Rohstoffen oder auch von Biokraftstoffen finden. So könnte die Produktion von Stärke, welche bei Herstellung von Papier benötigt wird, aus dem abgefangen CO₂ geschehen.¹⁶⁷ Faktoren, die die zukünftige Entwicklung von CCUS in der Papierindustrie beeinflussen sind neben dem Rahmen zur Bepreisung von CO₂-Emissionen die Entwicklung von konkreten Anwendungsfällen sowie die Transport- und Speicherinfrastruktur für CO₂.

Net Zero in der Zellstoff- und Papierindustrie

Die Reduktion und womöglich komplette Vermeidung von CO₂-Emissionen bei der Produktion von Zellstoff und Papier bedarf eines Zusammenspiels aller oben ausgeführten Möglichkeiten. Abbildung 51 zeigt eine Projektion der Confederation of European Paper Industries (Cepi) bezüglich der Emissionsreduktion in der europäischen Papierindustrie aus dem Jahr 2011. Unterschiedliche Technologien und Lösungen spielen dabei eine Rolle und müssen in Kombination verwendet werden.

¹⁶³ Vgl. Andritz, 2022.

¹⁶⁴ Vgl. Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁶⁵ Vgl. Moya & Pavel, 2018.

¹⁶⁶ Vgl. Kuparinen et al., 2019; Furszyfer Del Rio et al., 2022.

¹⁶⁷ Vgl. Cai et al., 2021.

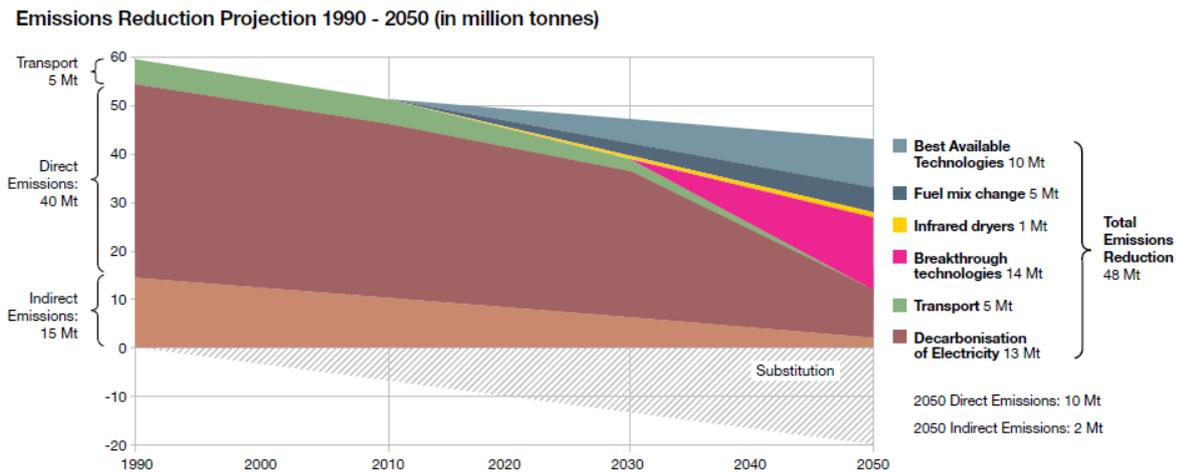


Abbildung 51: Emissionsreduktionspfad in der europäischen Zellstoff- und Papierindustrie.

Quelle: Cepi, 2011.

Die Anwendung von besten verfügbaren Technologien in allen Bereichen des Herstellungsprozesses (KWK, Abwärmenutzung, Energieeffizienz, etc.) kann für einen Rückgang der Emissionen um 21 % gegenüber 2010 sorgen. Veränderungen im Brennstoffmix hin zu biogenen Materialien, die energetische Verwertung von Papierschlamm und die Schwarzlaugenvergasung sowie neuartige Trocknungstechnologien können zur weiteren Minderung von 13 % beitragen. Komplette neue Technologien müssen etwa für 30 % der eingesparten THG sorgen. CCUS gilt als eine der „Breakthrough Technologies“ und ist für eine komplette Dekarbonisierung oder gar als Senke in der Zellstoff- und Papierindustrie notwendig. Die Herstellung von Biokraftstoffen für den Transport von Holz schlägt mit 10 % der Einsparungen zu Buche. Eine stärkere Elektrifizierung in Verbindung mit der Nutzung von CO₂-armen Netzstrom spielt mit 27 % ebenfalls eine herausragende Rolle im Dekarbonisierungsprozess. Dennoch bleiben in diesem Emissionspfad im Jahr 2050 noch 12 MtCO₂ an Restemissionen übrig. Hier spielt laut Cepi die Substitution von CO₂-intensiven Baumaterialien wie Zement und Stahl durch holzfaserbasierte Baustoffe eine bilanzielle Rolle auf dem Pfad zu Net Zero.

3.2.4.4 Anwendungsbeispiele

Da die Zellstoff- und Papierindustrie sehr heterogen ist und viele Prozessschritte enthält, werden nachfolgend drei unterschiedliche Anwendungsbeispiele betrachtet.

Wasserstoff für Strom und Wärmeerzeugung¹⁶⁸

Die Nutzung von kohlenstoffarmem Wasserstoff als Brennstoff kann auch in der Papierindustrie zur Dekarbonisierung beitragen. Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist die Umrüstung einer Siemens SGT-400 Erdgasturbine des französischen Papierherstellers Smurfit Kappa PRF in Saillat-sur-Vienne auf

¹⁶⁸ Vgl. Paper First, 2020.

den Betrieb mit reinem Wasserstoff. Die Papierfabrik kann sowohl den Strom als auch die Prozesswärme der 12-MW-Turbine nutzen. Das Projekt HYFLEXPOWER wird von einem Konsortium aus Siemens Gas and Power, Engie Solutions, Centrax, Arttic, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und vier europäischen Universitäten begleitet. Während zweier Demonstrationenkampagnen wird die Anlage mit einer Mischung aus Erdgas und Wasserstoff betrieben, wobei letztlich ein Betrieb mit bis zu 100 % Wasserstoff angestrebt wird. Das Gesamtziel des HYFLEXPOWER-Projekts besteht darin, eine vollständig grüne, wasserstoffbasierte Energieversorgung für einen komplett kohlenstofffreien Energiemix zu testen. Dies würde im Grundlastbetrieb bis zu 65.000 Tonnen CO₂ pro Jahr einsparen. Das Gesamtbudget des Projekts beläuft sich auf fast 15,2 Millionen Euro, von denen 10,5 Millionen Euro vollständig von der Europäischen Union im Rahmen des Programms Horizont 2020 beigesteuert werden. Das Projekt welches offiziell am 1. Mai 2020 startete, wird 4 Jahre dauern und ist in mehrere Phasen unterteilt:

- Mai 2020: Abschluss des Vertrags und Beginn der technischen Entwicklung.
- 2021: Installation der Wasserstoffproduktions-, -speicher- und -versorgungsanlage am Pilot-Demonstrationsstandort.
- 2022: Installation der Gasturbine für Erdgas-Wasserstoff-Gemische und erste Demonstration des fortgeschrittenen Pilotanlagenkonzepts.
- 2023: Pilotdemonstration mit bis zu 100 % Wasserstoff zur kohlenstofffreien Energieerzeugung aus gespeicherter überschüssiger erneuerbarer Energie.

Prozessoptimierung in der Papierherstellung¹⁶⁹

Die zukunftsweisende Produktionslinie 8 von Voith und Koehler Paper in Kehl (Deutschland) verstärkt die Prozessoptimierung mit Fokus auf Dekarbonisierung. Zentral ist dabei die weitere Optimierung der Energieeffizienz der Anlagen. Im Rahmen der Partnerschaft analysiert das Voith-Koehler-Team alternative Energiequellen, die als zukünftige Wärmequellen dienen können. Fossile Energieträger sollen durch nachhaltige, CO₂-neutrale Alternativen ersetzt und die Produktionslinien entsprechend umgerüstet werden. Darüber hinaus bieten eine elektrifizierte Trockenpartie und Wärmepumpen weitere Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung und Energierückgewinnung. Auch das aus der anaeroben Abwassernachbehandlung gewonnene Biogas kann zur Dekarbonisierung des Prozesses beitragen. Die gesamte Produktionslinie 8 wird ausschließlich mit Ökostrom aus dem Wasserkraftwerk Schluchsee betrieben, wodurch Koehler Papier jährlich 45.000 Tonnen CO₂ einsparen kann.

Seit der Auslieferung der Voith-Anlage im Jahr 2019 produziert die 150 Meter lange Anlage nachhaltiges Verpackungspapier mit einer Kapazität von 1,500 Metern pro Minute. Das Herzstück der

¹⁶⁹ Vgl. Pulp and Paper Canada, 2022.

Anlage ist ein Yankee-Zylinder mit einem Durchmesser von über 7,3 Metern. Die Beschichtung findet durch ein kontaktloses und schonendes Trocknungsverfahren mit hohem thermischem Wirkungsgrad und Wärmerückgewinnung statt.



Abbildung 52: Produktionslinie 8 der Papierfabrik in Kehl.

Quelle: Pulp and Paper Canada, 2022.

Biogasherstellung in anaeroben Reaktor¹⁷⁰

Die Papierfabrik Julius Schulte Trebsen hat Ende 2018 einen anaeroben Bioreaktor in Ihrer Fabrik in Sachsen in Betrieb genommen. Jährlich werden in der Fabrik 220,000 Tonnen Wellpappenrohpa-pier hergestellt. Durch den neuen Reaktor wird sowohl die Aufbereitung von Wasser effizienter und sauberer als auch die Ausbeute an hergestelltem Biogas aus dem Abwasser der Papierfabrik höher. Der Anaerobreaktor kostete 1,6 Millionen Euro, ist 27 Meter hoch und umfasst über 1300 Kubikmeter.

Der vorherige Reaktor hat das produzierte Gas direkt zu zwei Blockheizkraftwerken der Fabrik ge-leitet. Mit dem neuen Reaktor und neuer Aufbereitungsanlagen erreicht das Biogas nun Erdgasqua-lität und wird in das lokale Gasnetz der Mitteldeutschen Netzgesellschaft Gas eingespeist. Das er-zeu-gte Biogas deckt rechnerisch den Jahresbedarf von 5.000 Einfamilienhäusern ab.

¹⁷⁰ Vgl. LVZ, 2018.



Abbildung 53: Anaerobreaktor der Papierfabrik Julius Schulte Trebsen.

Quelle: LVZ, 2018.

3.2.4.5 Entwicklungsrelevanz

Wie Abbildung 38 und Abbildung 39 deutlich machen, ist mit steigender Produktion und höherem Verbrauch von Papier in Schwellen- und Entwicklungsländern auszugehen. Der Anteil europäischer oder nordamerikanischer Produktion wird hingegen abnehmen. Wirtschaftlicher Aufschwung in Asien, Afrika und Südamerika kann ebenfalls dazu führen, dass der Papierverbrauch pro Einwohner in den entsprechenden Ländern auf das Niveau der Industriestaaten anwächst (vergleiche Abbildung 54).

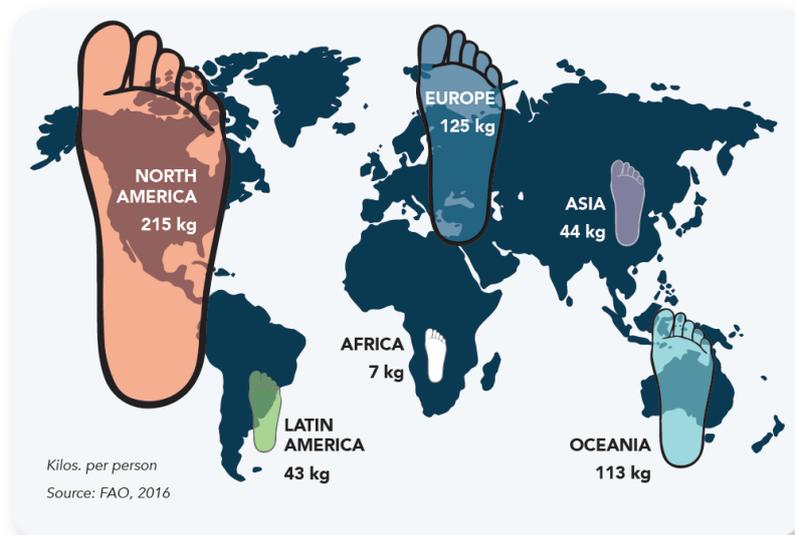


Abbildung 54: Papierverbrauch pro Einwohner in verschiedenen Weltregionen 2016.

Quelle: EPN, 2018.

Daher kann davon ausgegangen werden, dass Anlagen in Asien weiterhin einen hohen Anteil an der globalen Produktion von Zellstoff und Papier haben werden. Die Verwendung nachhaltig bezogener Biomasse anstatt Kohle (vergleiche Abbildung 49) als Brennstoff sowie die Rückgewinnung

von Energie und Rohstoffen kann bei der Emissionsreduktion eine große Rolle spielen. Hierbei können die Erfahrungen mit den besten verfügbaren Technologien europäischer und deutscher Unternehmen eine große Rolle spielen.

Die Herstellung von Papier ist ein komplexer Prozess mit vielen verschiedenen Verfahrensschritten und auch unterschiedlichen technologischen Ausgestaltungen. Die Erhöhung der Ressourceneffizienz und das Schaffen von Synergien zwischen Papierindustrie und anderen Industrien (siehe Absatz zu Bioraffinerien) ist notwendig für eine weitgehende Dekarbonisierung. Aufgrund der hohen Komplexität, der unterschiedlichen Roh- und Brennstoffe, wie auch der Möglichkeit einer Kreislaufwirtschaft bietet die Zellstoff- und Papierindustrie gute Voraussetzungen für die Verbreitung von technischen Lösungen, industriepolitischen Anreizsystemen und der Entwicklung neuer Geschäftsmodelle von Industrieländern in den globalen Süden. Abbildung 55 gibt dabei einen möglichen Rahmen für die Herausarbeitung entwicklungspolitischer Strategien.

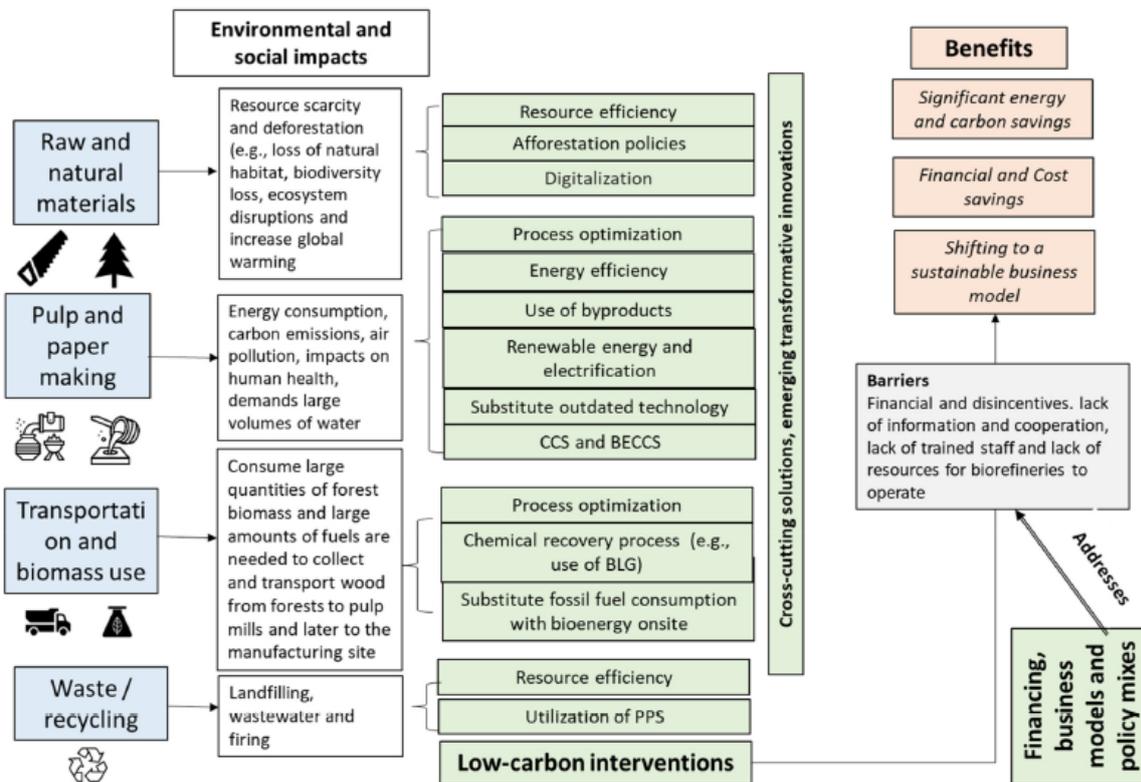


Abbildung 55: Das soziotechnische System der Zellstoff- und Papierindustrie.

Quelle: Furszyfer Del Rio et al., 2022.

Anhänge zum Kapitel 3.2

Anhang 1: Liste der Pilot-, Industriemaßstab- und Demoprojekte im Bereich Low-Carbon Stahlproduktion

Company	Location	Specific technology	Hydrogen type
Aço Verde do Brazil (AVB)	Maranhão state	Bio-charcoal BF	N/A
Algoma Steel	Sault Ste. Marie	BF/BOF to scrap-EAF conversion	N/A
ArcelorMittal	Ghent	NG-DR --> H-DR & EAF	Green electrolytic
ArcelorMittal	Hamilton	NG-DR --> H-DR & EAF	Green electrolytic
ArcelorMittal	Dunkirk	H-DR+EAF & CCS	Blue
ArcelorMittal	Bremen	Hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
ArcelorMittal	Bremen	NG-DR --> H-DR	Green electrolytic
ArcelorMittal	North Sea (Dutch region)	Hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
ArcelorMittal	Gijon	H-DR & EAF	Green electrolytic
ArcelorMittal	Sestao	Hybrid EAF	N/A
British Steel	Humber region	hydrogen production (blue hydrogen with carbon capture and off-shore storage)	Blue
Enagas	Asturias	hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
Fortescue Metals	Pilbara	H-DR	Green electrolytic
H₂ Green Steel	Svartbyn	H-DR	Green electrolytic
HBIS	Hebei province	NG-DR (H ₂ -enriched)	N/A
Liberty Steel	Whyalla	NG-DR --> H-DR	Green electrolytic
Liberty Steel	Dunkirk	NG-DR --> H-DR	Green electrolytic
Liberty Steel	Galati	NG-DR --> H-DR	Not stated
LKAB	Kiruna, Malmberget, Svappavaara	H-DR (only ironmaking)	Green electrolytic
Metalloinvest	Kursk region	NG-DR --> H-DR	Not stated
POSCO	N/A	Hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
POSCO	N/A	H-DR (based on FINEX)	Not stated
SSAB	Raahe	BF/BOF to scrap-EAF conversion	N/A
SSAB	Oxelösund	BF/BOF to scrap-EAF conversion	N/A
Tata Steel	Ijmuiden	H-DR	Not stated

Tata Steel	Ijmuiden	Hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
Tenaris	Dalmine	Hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
Thyssenkrupp	Duisburg	NG-DR --> H-DR	Green electrolytic
Thyssenkrupp	Duisburg	Hydrogen production (green hydrogen)	Green electrolytic
Thyssenkrupp	Duisburg (location of hydrogen use)	Hydrogen production (blue hydrogen with carbon capture and off-shore storage)	Blue
H₂ Green Steel	TBC	H-DR	Green electrolytic
ArcelorMittal	Fos-sur-Mer	BF/BOF to scrap-EAF conversion	N/A
ArcelorMittal	Troll field	CCS	N/A
Baosteel	Zhanjiang Economic and Technological Zone	ENERGION DR	Not stated
ArcelorMittal	Ghent	CCU - Carbalyst	N/A

Tabelle 7: Liste der Low-Carbon industriemaßstaben¹⁷¹ Stahlprojekte.

Quelle: Industry Transition, 2022.

Company	Location	Specific technology	Hydrogen type
ArcelorMittal	Dunkirk	CCS	N/A
ArcelorMittal	Maizières-lès-Metz	Electrowinning	N/A
ArcelorMittal	Eisenhüttenstadt	H-DR	Green electrolytic
Compañía Siderúrgica Huachipato SA	Hualpén	H-DR	N/A
SSAB	Luleå	H-DR	Green electrolytic
Tata Steel	Ijmuiden	Smelting reduction	N/A
Voestalpine	Donawitz	H-DR	Not stated
Voestalpine	Donawitz	Plasma smelting reduction	N/A
Voestalpine	Linz	Hydrogen production (green hydrogen through PEM electrolysis)	Green electrolytic

Tabelle 8: Liste der Pilotprojekte im Bereich von Low-Carbon Stahlproduktion.

Quelle: Industry Transition, 2022.

¹⁷¹ Full-Scale

Company	Location	Specific technology	Hydrogen type
ArcelorMittal	Hamburg	H-DR (waste gas recovery) + Pressure swing adsorption	Grey
Boston Metal	Boston	MOE (molten oxide electrolysis)	N/A
Salzgitter	Salzgitter	NG-DR --> H-DR	Not stated
Salzgitter	Salzgitter	hydrogen production (green hydrogen through SOEC electrolysis)	Green electrolytic
Salzgitter	Salzgitter	hydrogen production (green hydrogen through PEM electrolysis, wind energy powered)	Green electrolytic
SSAB	Gällivare	H-DR	Green electrolytic
POSCO	N/A	H-DR (similar to FINEX)	Not stated
Calix	N/A	H-DR & Hydrogen production (ZESTY for higher value green hot briquetted iron (HBI))	Green electrolytic

Tabelle 9: Liste der Demoprojekte im Bereich von Low-Carbon-Stahlproduktion.

Quelle: Industry Transition, 2022.

Anhang 2: Detaillierte technische Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs und der THG-Emissionen in der Zellstoff- und Papierindustrie

Beste verfügbare Technologien – best available technologies nach¹⁷²

Process	Type of Technology	Estimated Emission Reduction	Estimated Energy Saving	TRL	Description
Energy Production	Biomass gasification			8–9	Wood waste is used for gasification instead of combustion. The syngas is utilizing in a combined cycle gas turbine (CCGT).
	Biomass CHP			9	Energy recovery of waste biomass through a combined-heat-and-power (CHP) cycle.
	Biogas production from sludge	2%		9	Use of the sludge from the water cycle to produce biogas in an anaerobic wastewater treatment plant, burning in the CHP to produce electricity.
	Waste heat recovery	9%	3.5 GJ/ton pulp or 1.07 GJ/ton paper	9	During production processing, such as pulp drying, and paper drying, a large amount of heat is lost. By recovering and reusing the waste heat, the energy efficiency will be improved, and emissions will be reduced. A recovery system such as recovery boiler closed hoods, and heat pumps can be used.
	Energy management	15%		9	An energy management system, such as steam, electricity, and gas consumption line monitoring, can improve energy flow control throughout the system and the measurement of energy efficiency.
	Focus on maintenance	10%		9	Frequent maintenance, especially on electrical equipment such as pumps, motors, fans, dryer systems, etc., can improve energy efficiency and reduce emissions.
Mechanical pulping	Biological pre-treatment		1.8 GJ/ton pulp	8–9	This technology, by using in mechanical pulping, reduces energy consumption. The technology makes modifications to the cell wall of the fiber and improves the strength of the fiber. Fungal and enzymatic are two common biological pre-treatment technologies for wood chips during mechanical pulping.
	Heat recovery		3.5 GJ/ton pulp	8–9	The electricity use in mechanical pulping is converted into heat (2 tone steam production per ton of pulp), and heat can be recovered with a recovery boiler (up to 80% recovered as steam in TMP).
Kraft pulping	Steam cycle washing		30–40%	7–8	Chemical pulp output from the digester can be washed by steam more than water, which has energy-saving potential.
	Ligno Boost				Part of the lignin (25–50%) is extracted from the black liquor by solving CO ₂ and lowering the pH, which causes lignin to precipitate. Lignin is then purified. It can after be used as a quality fuel or a useful product for other industries.
	Black liquor gasification	10%	2 GJ/ton pulp	8–9	BLG is an emerging commercial technology capable of efficiently recovering energy from the black liquor’s organic content using a recovery boiler and gasification process.
RCF Pulping	Recycled paper fractionation		11–13% EL 40% Heat		Ink particles can be removed in an earlier step before de-inking by separating long and short fibers (tested in the Andritz mill).
	Efficient screening		15%	9	Improving the screening and filtering in the recycling pulping process can save energy from 5 to 30%.
	High consistency pulping		8%	9	Pulping with lower water content, reducing energy consumption to circulation, and pumping of pulp.
	Sludge dryer	5%		8–9	Drying the sludge (using waste heat) can decrease water contact and increase the sludge calorific value. Replacing fossil fuels with this sludge reduces the emissions due to fossil fuel consumption.

¹⁷² Vgl. Mobarakeh et al., 2021.

Process	Type of Technology	Estimated Emission Reduction	Estimated Energy Saving	TRL	Description
Paper Machine	Closed hood	13%	45% EL	9	The use of a closed hood (instead of an open or semi-open one) over the paper machine reduces energy consumption and CO ₂ emission.
	Transport membrane Condenser				Energy recovery system for the low-temperature exhaust heat from the paper drying section using a ceramic membrane tube.
	Laser Ultrasonic Stiffness Sensor		3%		Sensor to measure stiffness, allowing real-time control of production. This technology reduces energy and raw material consumption.
Forming	Steam box	5%	5%		Steam box preheats the water used to form the paper, improve dewatering efficiency, and allowing higher dry contents to be attained in the press section.
	High consistency forming	3%	8% EL	7	Pulp enters the forming section with smaller water content (3% fibers). Suitable for low weight grades such as tissue.
	Dry sheet forming	42%	50%	7	Use of turbulent air in place of water as the paper carrier, meaning that there is no water added to the dry pulp, reducing energy for drying
Press section	Hot pressing	8%	0.61 GJ/ton paper	7-8	Hot pressing increases water removal in the press section, reducing the heat needs in the drying section.
	Displacement Pressing		30%		Combination of mechanical and air pressure, increasing solids content by up to 60%.
Drying	Impulse drying of paper	20%	0.44 GJ/ton paper	7	Impulse drying uses the heat and pressure in mechanical dewatering before the drying section. It can reduce the water content and increase the solid content by up to 65%.
	Condebelt dryers		1.6 GJ _{steam} & 20 KWh EL/ton paper	7-8	In this technology, the paper is dried between two steel belts in high pressure (max. 10 bar) conditions. The temperature for drying is max. 180 °C, and the steam and electricity consumption can be reduced.

Innovative Technologien

Process	Type of Technology	Estimated Emission Reduction	Estimated Energy Saving	TRL	Description
Pre-treatment technology	Microwave pre-treatment				By changing the cellular microstructure of wood, this technology increases the chemical component's permeability to the chips. It applies to chemical pulping and can reduce energy consumption and the amount of chemical needed.
	Chemical pre-treatment with oxalic acid		25%	6-8	The technology is used in mechanical pulping and can improve fibers' separation rate (defibration), and refines efficiency by using chemical components such as oxalic acid.
	Hemicellulose extraction before chemical pulping				Extraction of hemicellulose before pulping decreases alkali consumption, improves the energy efficiency, and increases the production capacity of kraft pulping

Process	Type of Technology	Estimated Emission Reduction	Estimated Energy Saving	TRL	Description
Steam production	Use of Hydrogen as a fuel			7–8	Using hydrogen (purchase (especially green H ₂) or on-site production by electrolysis) instead of natural gas can significantly reduce CO ₂ emissions.
	Direct electric heating			7–8	By replace fossil fuels with electricity and using an electric boiler instead of a fossil fuel boiler (natural gas boiler) to generate heat (steam) demand, fossil fuel emissions could be eliminated. If the electricity is supplied with renewable sources, net-zero emissions could be reachable.
	Heat pump recovering waste heat			6–7	By recovering the waste heat (at low temperature <100 °C) from the process using a heat pump and converting it into medium-temperature heat (max. 160 °C) (Direct information from heat pump manufacturer), energy efficiency would improve, and fossil fuel emissions could be drastically reduced.
	Carbon capture and storage			6	It may be applied through pre-combustion (associated with black liquor gasification), post-combustion (which is the more straightforward technology), or oxy-combustion technologies
Pulp Production	Deep eutectic solvents (DES)	20%	40%	3	DES are produced naturally by plants and can break down wood and selectively extract cellulose fibers required in the papermaking process. This technology could replace the traditional chemical and mechanical pulping techniques by enabling dissolving the wood and extracting lignin, hemicellulose, and cellulose at low temperatures and atmospheric pressure. Deep eutectic solvent could be applied to pulp production from both wood and recovered paper with minimal energy consumption and CO ₂ emissions.
	Utilization of green liquor		25%	7–8	Pre-cooking of wood in green liquor (20–30% of the green liquor) without the lime reaction, reducing energy consumption, lime kiln load, increasing pulp yield, and bleachability.
	Membrane concentration of black liquor		36%	6–7	Partial replacement of the evaporation of black liquor by membrane concentration, reducing the thermal energy needed.
Paper Production	Functional surface			8–9	This technology aims to reduce the weight of paper without impacting its quality or structure (reducing the amount of material by 30% per square meter). Lighter weight paper needs less energy (steam and electricity) for drying, pumping, and transporting.
	New fibrous fillers		25%	5–6	Wood fibers are partially replaced by fibrous fillers (based on calcium and silica), which increase the solid contact of the paper web and then reduces the energy required for the drying section.
Forming	Flash Condensing	50%	20%	3–5	The concept of this technology is to produce waterless paper using high turbulent steam combined with dry fibers. The technology can be applied to any kind of pulp (chemical, TMP, RCF) and reduces energy consumption and fossil fuel CO ₂ emissions.
	Dry pulp for cure-formed paper	55%	25%	3	This technology produces paper without water by using two techniques: a dry pulp technique, which consists of a highly viscous solution and contains higher concentrated fibers, and a cure formed technique, which allows the formation of thin sheets.
Press Section	Displacement pressing		30%	5–6	In the press section before the paper drying, water can be removed from the web using a combination of mechanical and air pressure. This technology increases the solids content to 55%, which leads to a reduction in energy consumption in the drying area.

Process	Type of Technology	Estimated Emission Reduction	Estimated Energy Saving	TRL	Description
Drying	Supercritical CO ₂	45%	20%	3	Supercritical CO ₂ is a new process design that can be applied to pulp and paper drying sections. In this technology, the pulp or paper is dried by changing pressure and temperature, which consumes lower energy than the traditional method.
	Superheated steam drying	50%	25%	3–5	Replacing the air needed to remove water from the paper in the drying section with superheated steam can improve heat recovery (full recovery) and increase energy efficiency. The recovered steam can be used in the next steps of paper production.
	Gas-fired dryers		10–20%	6–7	Dryers are heated with hot gases from gas combustion (which may occur in the drum) instead of steam. This dryer technology improves energy efficiency by 75–80% compared to the 65% of the usual system.
	Boost dryer		12%	6–7	This technology is mainly used in the packaging and board paper drying sector. Boost drying by utilizing two combined drying technologies (condensation and press) improves drying efficiency by 12%, and reduces energy consumption and drying time.
	Microwave Drying		12%	3–4	Paper is dried by exposure to microwave radiation. This technology increases the drying rate and reduces the total energy consumption.

Anhang 3: Mögliche Technologien und Prozesse zur THG-Minderung in der chemischen Industrie¹⁷³

Technology Option	Application	Rationale/Explanation and Key References Used to Estimate the Fossil Fuel Substitution Potentials	Cost	Unit
(A) Energy efficiency, renewable energy and process heat electrification				
Best practice technologies (1)	Improving energy efficiency to reduce process heat demand	Global energy saving potential of best practice technologies that are currently available in the market [8] would result in a continuation of the current average energy efficiency trends of 0.5%/yr if they are implemented in all production processes by 2050 [45]. ¹ The rate of improvement is average over the period to 2050, and does not necessarily follow a linear path.	20–60	USD/t CO ₂ in 2030
Breakthroughs and heat integration (1)		New technology options and cross-cutting technologies such as advanced membranes to reduce process heat demand by 2050 [47] would double the improvements to 1%/yr. ² While pinch analysis for heat integration shows 50% and 30% savings for hot and cold utilities, respectively [48], actual potential could still be lower, since efficiency is typically assessed at site level where a high level of steam system integration reduces potential.	Up to 200	USD/t CO ₂ in 2050
Solar process heat (2)		Solar process heating systems can replace fossil fuels for process heat generation [49,50]. ³	0–100	USD/t CO ₂ in 2030
Biomass for process heat (4)	Fuel switching	Biofuels produced from various biomass feedstocks can replace fossil fuels for process heat generation by 2030/50 [6]. ⁴	0–75	USD/t CO ₂ in 2030
Electrification of process heating combined with renewables (5)		Synthetic naphtha produced from renewable hydrogen can replace crude oil-based naphtha for HVC production [51]. ¹⁴	–60–450	USD/t CO ₂ in 2050
		Heat pumps can replace fossil fuels to supply low-temperature process heat [49,50,53,54]. ⁵	0–50	USD/t CO ₂ in 2030
(B) Switching from fossil fuel-based feedstocks to biomass and synthetic feedstocks				
Biomass for plastics (9)	Feedstock switching	Biomass can replace fossil fuels used as feedstock for plastics production [6]. ⁹	0–500	USD/t CO ₂ in 2009
Biomass for ammonia (10,19)	Feedstock switching	Biomass can replace fossil fuels used as feedstock for ammonia production [55]. ¹⁰	250–400	USD/t CO ₂
Biomass for methanol (10,19)	Feedstock switching	Biomass can replace fossil fuels used as feedstock for methanol production, either through gasification to methanol or by using biomethane in the traditional production route [58]. ¹¹	–150–450	USD/t CO ₂
Renewable-hydrogen for ammonia (11,20)	Feedstock switching	Renewable hydrogen can replace fossil fuels used as feedstock for ammonia production [22]. ¹²	0–150	USD/t CO ₂
Renewable-hydrogen for methanol (11,20)	Feedstock switching	Renewable hydrogen can replace fossil fuels used as feedstock for methanol production [58]. ¹³	–50–200	USD/t CO ₂
Methanol for olefins (13)	Feedstock switching	Renewable hydrogen-based methanol can be used for olefins production, thereby reducing the need of fossil fuels feedstocks [58]. ¹⁴	50–300	USD/t CO ₂
(C) Circular economy concepts				
Demand reduction/Reuse (18)	Demand reduction	Plastics demand is reduced from high end of plastics production projections (3%/yr) to the average of the range found in literature (2%/yr). Reuse of plastics has been assessed as part of this demand reduction strategy.	N/A	N/A
Mechanical recycling (6)	End of life	Global mechanical recycling rate is assumed to grow around two-fold by 2030 [42] and triple by 2050. ⁶	–140–200	USD/t CO ₂ in 2015
Chemical recycling (7)	End of life	Chemical recycling rate is assumed to be commercialized and reach the level of mechanical recycling by 2050 [42,66]. ⁷	80–500	USD/t CO ₂ in 2015
Incineration with highly efficient energy recovery (8)	End of life	All remaining post-consumer plastic waste is assumed to be incinerated with high efficiency combined with CCS [43]. ⁸	–200–50	USD/t CO ₂ in 2020
(D) CCS				
Capture and storage (15)	Process emissions	All high-purity process CO ₂ emissions can be captured by 2050.	0–50	USD/t CO ₂ in 2040
Capture and storage (16)	Emissions fossil fuel combustion from energy recovery	Three-quarters of all emissions from fuel combustion are assumed to be captured. It is assumed that a shift to energy recovery is meaningful from a climate perspective if only coupled with CCS. Biomass use is primarily for cogeneration of heat and power and all processes are assumed to be coupled with CCS. ¹⁷	50–150	USD/t CO ₂
Capture and storage with biomass (3)	Emissions from biomass-based heat generation		150–200	USD/t CO ₂
(E) Carbon-free electricity supply (17)				

¹⁷³ Vgl. Saygin & Gielen, 2021.