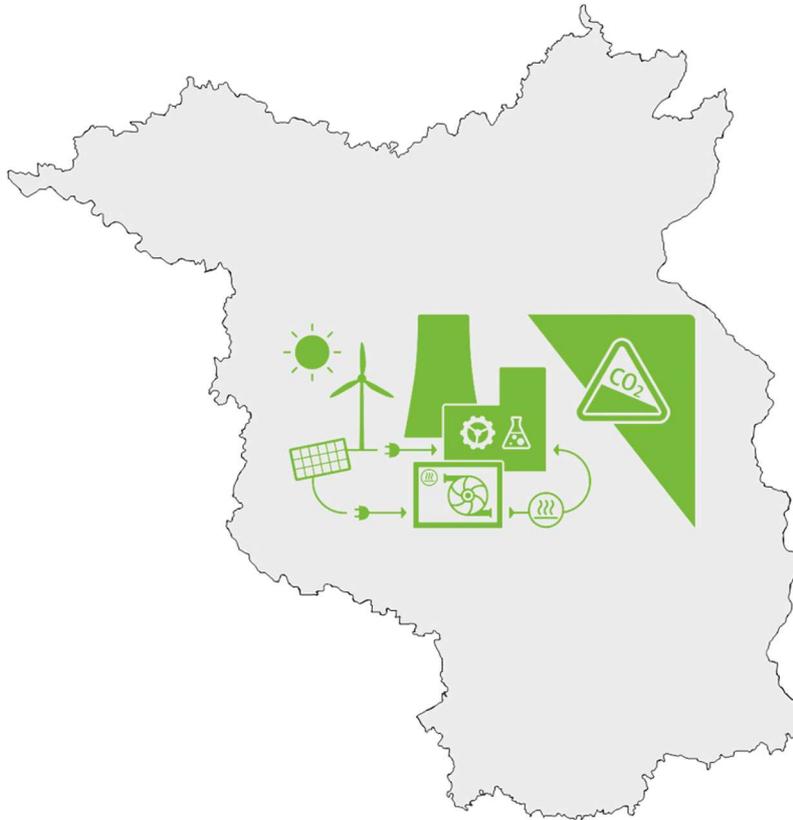


Dekarbonisierung der Industrie in Ost-Brandenburg (DIO-Studie)



01.07.2021 - 31.01.2024

M. Taube, M. Buchmann, Dr. M. Lockan, Dr. E. Nicke, Dr. S. Bublitz, Dr. S. T. Kim, Dr. S. Klöppel, S. Rawat, Dr. T. Schölzke, Dr. H. Müller, Prof. Dr. U. Riedel

Inhalt

1.	Kurzübersicht	4
2.	Ziel der Studie	5
3.	Standortanalyse	7
3.1.	Kurzbeschreibung zu den Verfahren der verschiedenen Sektoren	8
	Stahlproduktion	8
	Zementproduktion	11
	Glasproduktion	12
	Papierproduktion	12
	Raffinerien und Chemische Industrie	14
	Getränke- und Lebensmittelindustrie	16
	Energieversorgung	16
3.2.	Übersicht zu den Standorten	19
	Stahlindustrie	19
	Zementindustrie	21
	Glasindustrie	22
	Papierindustrie	23
	Raffinerien und Chemische Industrie	24
	Getränke- und Lebensmittelindustrie	26
	Energiesektor	27
4.	Grundlegende Möglichkeiten zur Dekarbonisierung	31
	Stahlindustrie	31
	Zementindustrie	32
	Glasindustrie	34
	Papierindustrie	36
	Chemische Industrie	39
	Getränke- und Lebensmittelindustrie	40
5.	Fragebogen zu den Dekarbonisierungsmaßnahmen und die Auswertung	44
	Überblick zum Fragebogen	44
	Fragebogenauswertung	44
	Stahlindustrie	49
	Chemische Industrie	50
	Energiesektor	50
	Getränke- und Lebensmittelindustrie	51
6.	Dekarbonisierungsmaßnahmen	52
7.	Standort- und prozessspezifische Evaluierung am Beispiel der LEIPA Group GmbH	57
	Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Aufwertung der Abwärme der Abwasserreinigungsanlage ..	57
	Faserreststoff-Vortrocknung	58
	Integration einer Dampfturbine nach dem Wirbelschichtkessel und Hochdruckkessel	59
	Möglichkeiten der Integration eine Wärmepumpe an der Papiermaschine in Werk Nord	59

Einsatz von Paludi-Fasern.....	60
CO ₂ -Abtrennung aus dem Rauchgas der Dampferzeuger.....	60
Verbesserung der Infrastruktur des Industriestandortes Schwedt/Oder.....	61
Zusammenfassung.....	61
8. Zusammenfassung und Handlungsempfehlung.....	65
Handlungsempfehlung für die Industrie.....	65
Handlungsempfehlung für die Politik.....	66
Literaturverzeichnis.....	67
Anhang.....	72
Abbildungsverzeichnis.....	89
Tabellenverzeichnis.....	91
Glossar.....	92

1. Kurzübersicht

Die vorliegende Studie wurde im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg durchgeführt. Dabei wurde der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Ost-Brandenburg und die dort niedergelassenen Firmen gelegt. Insgesamt wurden in dieser Studie sieben Industriebranchen betrachtet: Stahl-, Zement-, Glas-, Papier-, Getränke/Lebensmittelindustrie und die chemische Industrie sowie der Energiesektor. Ziel der Studie ist es, die allgemeinen Dekarbonisierungsstrategien, die die jeweiligen Industriebranchen in den für sie spezifischen Roadmaps entwickelt haben, an die standortspezifischen Anforderungen der lokalen Produktionsprozesse anzupassen.

Als erstes wurde eine Standortanalyse durchgeführt, um alle CO₂-Emittenten und ihre Standorte zu ermitteln. Dabei lassen sich die Produktionsstandorte in zwei Kategorien einteilen, die Hauptemittenten mit den jährlichen Emissionen über 400.000 t CO₂-Äquivalenten und die kleineren Emittenten mit jährlichen Emissionen unter 400.000 t CO₂-Äquivalenten. Es ist ersichtlich, dass die größten Emittenten zur Stahl-, Zement- und chemischen Industrie gehören. Generell ist ebenso ersichtlich, dass der Energiesektor für ca. dreimal größere CO₂-Emissionen verantwortlich ist. Damit lässt sich eine Prioritätenliste in der Dekarbonisierungsstrategie aufstellen.

Um die Ursachen für die entstehenden Emissionen zu verstehen, wurden die standortspezifischen Produktionsverfahren der verschiedenen Sektoren kurz beschrieben. Dabei wurde auch die Unternehmensgröße erfasst, um die Einordnung nach Größenklasse vorzunehmen. Weiterhin wurden branchenspezifische Dekarbonisierungsoptionen übersichtlich dargestellt und kurz erläutert.

Die erfassten Produktionsbetriebe wurden in einer anonymen Umfrage zu der Relevanz der einzelnen Dekarbonisierungsmaßnahmen und den Hemmnissen bei deren Umsetzung befragt. Dabei haben sich 40 % der angeschriebenen Unternehmen zurückgemeldet. Die Umfrageergebnisse zeigen, dass die energetische Optimierung der Betriebe vollzogen ist. Zwei Drittel der Betriebe betreiben bereits Wärmerückgewinnung und mehr als die Hälfte der Betriebe haben den Technologiewechsel für sich vollzogen. Das sollte in der Emissions- und Energieverbrauchsstatistik der folgenden Jahre ersichtlich werden. Übergang zur Kreislaufwirtschaft, Elektrifizierung und Entwicklung nachhaltiger Produkte sind weitere Schritte hin zu einer nachhaltigen und fossilfreien Wirtschaft; sie finden noch wenig Resonanz in der Industrie wie die Umfrageergebnisse zeigen. Der Einsatz alternativer Grüner Brennstoffe und Weiterverarbeitung oder Speicherung von CO₂ sind die großen Handlungsfelder der Zukunft.

Weiterhin konnten anhand von Fallstudien standortspezifische Dekarbonisierungsszenarien für die Papier- und Glasbranche sowie für Automobilzulieferer entwickelt werden und schließlich Handlungsempfehlungen an Politik und an Unternehmen formuliert werden.

2. Ziel der Studie

Die Dekarbonisierung des Industriesektors stellt aus mehreren Gründen eine Herausforderung dar. Eine Besonderheit sind die langen Lebensdauern industrieller Anlagen mit den damit verbundenen Chancen wie auch Risiken: Jede Neu- oder Reinvestition bedeutet die Chance, auf CO₂-arme Technologien umsteigen zu können, birgt aber auch das Risiko, für lange Zeit doch wieder hohe CO₂-Emissionen zu generieren, wenn wettbewerbsfähige Alternativen zu fossilen Technologien (noch) nicht zur Verfügung stehen – technisch wie auch ökonomisch. Etwa 30 % der CO₂-Emissionen der Industrie sind Prozessemissionen, die auf chemische Reaktionen der verwendeten Einsatzstoffe zurückzuführen sind. Sie lassen sich nur durch einen kompletten Wechsel der Einsatzstoffe und alternative Produktionsprozesse verringern. Beispiele sind die Stahlindustrie mit der Wasserstoff-Direktreduktion, die die traditionelle Hochofenroute ablösen wird und die chemische Industrie mit dem Umstieg von Erdgas auf Wasserstoff bei der Ammoniakproduktion.

Die von den Expertengremien und Verbänden entwickelten Roadmaps und Studien zur Minimierung der CO₂-Emissionen bieten Orientierung zur Verfügbarkeit von Technologien, erneuerbaren Energieträgern, Grünem Strom sowie zur Preisentwicklung. Sie betrachten verschiedene Dekarbonisierungsszenarien und geben Handlungsempfehlungen für Politik und Industrie. Dabei können diese Handlungsempfehlungen nicht universell umgesetzt werden, da sie keine Standortspezifika berücksichtigen. Die Umstellung der industriellen Produktion von fossilen zu Grünen Energieträgern erfordert langfristige Entscheidungen und ist mit hohem Risiko verbunden, da die momentane Datenlage zu neuen Technologien noch unsicher ist. Die größten Unsicherheiten liegen in der Preisentwicklung und in der Verfügbarkeit von Strom, sowie erneuerbaren Energieträgern – insbesondere von Grünem Wasserstoff. Zudem berücksichtigen die allgemeinen Handlungsempfehlungen nicht die bestehende Infrastruktur vor Ort, die die Optionen zur Dekarbonisierung begrenzt und für die Entwicklung von standortspezifischen Strategien große Herausforderungen darstellt.

Die Randbedingungen für die Strategieentwicklung sind durch die Energiestrategie 2040 des Landes Brandenburg (erschienen Mitte 2022, zur Laufzeit des Projekts) gesetzt. Dort sind sechs strategische Zielkriterien gegeben, die in Abbildung 1 zusammengestellt sind.



Abbildung 1: Energiestrategie des Landes Brandenburg (MWAE, 2023) [30].

Vor diesem Hintergrund schließt die Studie DIO – Dekarbonisierung der Industrie in Ostbrandenburg – die Lücke zwischen den allgemeinen Dekarbonisierungsstrategien und den standortspezifischen Anforderungen der lokalen Produktion. Die Studie betrachtet ausschließlich CO₂-Emissionen sowie Energiebedarf und Effizienz.

Im Rahmen der DIO-Studie werden folgende Schritte umgesetzt: als erstes werden die Produktionsverfahren der in Brandenburg ansässigen Industriesektoren kurz beschrieben. Danach werden die Energie- und Produktionssektoren in Bezug auf ihre CO₂-Emissionen dargestellt, hierbei erfolgt auch eine Übersicht zu den einzelnen Produktionsstandorten, Produkten, Verfahren und der Größe der Unternehmen. Im zweiten Themenkomplex sind die Dekarbonisierungsoptionen der in Ostbrandenburg vertretenen Branchen zusammengefasst und dargestellt. In der anschließenden Umfrage wird auf die Relevanz der einzelnen Maßnahmen beim Übergang zur Grünen Produktion eingegangen, um die Hemmnisse bei der Umsetzung hieraus zu extrahieren. Weiterhin werden anhand von Fallstudien standortspezifische Dekarbonisierungsszenarien beschrieben und schließlich Handlungsempfehlungen an Politik und Unternehmen formuliert.

3. Standortanalyse

Untersucht man die Struktur der CO₂-Emissionen in Brandenburg, so wird zunächst deutlich, dass diese derzeit von den Braunkohlekraftwerken und der Energiewirtschaft dominiert werden. In den anderen Industriesektoren sind die weiteren Hauptemittenten den Branchen Chemische Industrie, Stahl-, Zement-, Papier-, Glas- sowie Getränke- und Lebensmittelindustrie zuzuordnen. Demzufolge konzentriert sich die Standortanalyse, wie auch die gesamte DIO-Studie, auf genau diese Branchen, da hier ein großer Hebel zur CO₂-Vermeidung in Brandenburg liegt.

In Abbildung 2 sind die CO₂-Emissionen dargestellt. Als Datengrundlage dienen die immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtigen (BImSchG) Anlagen in Brandenburg für das Jahr 2020. Die Standorte sind in Abbildung 2 entsprechend ihrer jährlichen CO₂-Emissionen in die Kategorien >400.000 t CO₂ und <400.000 t CO₂ Äquivalente unterteilt.

Die klimawirksamen Emissionen des Industriesektors in Deutschland bestehen zu 98,5 % aus CO₂ und nur zu 1,5 % (berechnet als CO₂-Äquivalent) aus anderen klimawirksamen Gasen wie Methan [33], weshalb die Säulen in Abbildung 2 für die CO₂-Emissionen selbst repräsentativ sind.

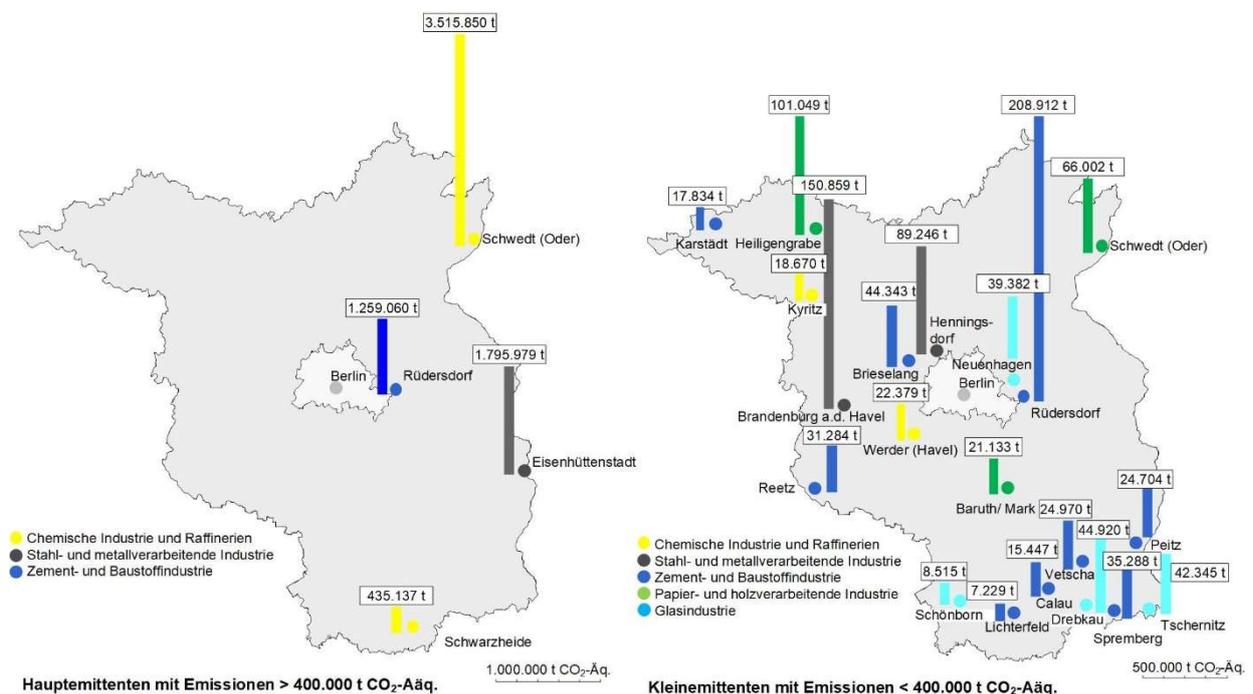


Abbildung 2: Übersicht der CO₂-intensiven Produktionsstandorte in Brandenburg, zur besseren Vergleichbarkeit in zwei separate Grafiken aufgeteilt und getrennt nach Emissionen abgebildet, eigene Darstellung.

Die größten industriellen CO₂-Emittenten Brandenburgs sind gegenwärtig auf Ost-Brandenburg konzentriert, vgl. Abbildung 2, links. Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass vier Standorte

im Gebiet Ost-Brandenburg >400.000 t CO₂-Äquivalente pro Jahr emittieren. Zwei Standorte sind der chemischen Industrie und Raffinerien zuzuordnen. An den beiden anderen Standorten befinden sich ein Unternehmen der Stahl- und metallverarbeitenden Industrie und ein Unternehmen der Zement- und Baustoffindustrie. Die meisten CO₂-Emissionen entfallen hier auf die chemische Industrie und Raffinerien, insbesondere ragen hier die Standorte Schwedt (3.515.850 t CO₂-Äq.) und Schwarzeiche (435.137 t CO₂-Äq.) heraus [1]. Als weitere maßgebliche CO₂-Emittenten sind die Standorte Eisenhüttenstadt (1.795.979 t CO₂-Äq.) und Rüdersdorf (1.259.060 t CO₂-Äq.) zu nennen [1]. Kleinere, aber für diese Studie signifikante CO₂-emittierende Anlagen, <400.000 t CO₂-Äq., sind über das gesamte Bundesland verteilt, vgl. Abbildung 2, rechts. Die Zement- und Baustoffindustrie nimmt hier, mit Abstand, den größten Anteil ein. Die meisten Emissionen entfallen dementsprechend auf den Standort Rüdersdorf mit 208.912 t CO₂-Äq. [1]. Die chemische Industrie mit kleineren Produktionsanlagen konzentriert sich mit zwei Standorten, in Kyritz und Werder (Havel), eher auf den Westen Brandenburgs. Im Süden Brandenburgs sind vor allem Unternehmen der Glasindustrie sowie der Zement- und Baustoffindustrie vorherrschend. Unternehmen der Papier- und Holzverarbeitenden Industrie sind im nördlichen Brandenburg und südlich von Berlin angesiedelt. Die gesamten CO₂-Emissionen des Energie- und Industriesektors sind nochmals in Abbildung 3 zusammengefasst, wobei die Branchen Stahl- und metallverarbeitende Industrie, Chemie und Raffinerien, Zement- und Baustoffindustrie, Papier- und Holzverarbeitende Industrie sowie Glasindustrie als „Industrie“ summiert sind.

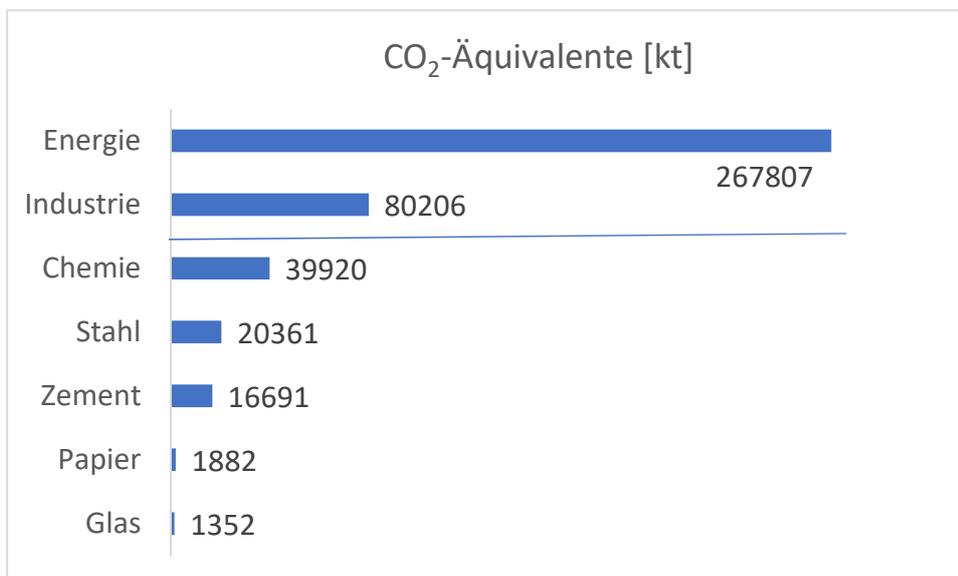


Abbildung 3: Zusammenfassung der CO₂-Emissionen für die ausgewählte Industriebranchen in Brandenburg, eigene Darstellung.

3.1. Kurzbeschreibung zu den Verfahren der verschiedenen Sektoren

Stahlproduktion

Die europäische Stahlindustrie ist nach der Energiebranche die zweitgrößte CO₂-Emittentin in der europäischen Union [2]. Ihr Anteil an Treibhausgasen beträgt für die europäische Union

221 Millionen Tonnen pro Jahr, das entspricht einem CO₂-Emissionsanteil von 5,7 % [2]. In Deutschland sind es mit 55 Millionen Tonnen ca. 7 % der gesamten CO₂-Emissionen. Um die Grüne Transformation zu erreichen, muss die EU bis 2050 klimaneutral werden [2]. Deutschland hat die eigene Klimaneutralität für 2045 im novellierten Klimaschutzgesetz 2021 geschärft. Als Zwischenziel postulierte die EU, dass die Stahlherzeuger ihre Emissionen bis 2030 um 30 % senken müssen [2]. Um steigenden Kosten für CO₂-Emissionen in der EU zu entgehen, stehen den Stahlherstellern zwei Optionen zur Verfügung: (i) Sie können entweder in Technologien zur Kohlenstoffabscheidung und -speicherung investieren, um die Emissionen zu senken oder (ii) die Produktion auf alternative Stahlproduktionsverfahren mittels Wasserstoffdirektreduktion von Eisen (DRI) umstellen [2].

Die Stahlherstellung lässt sich allgemein in die Hauptbereiche Rohstoffvorbereitung, Roheisenerzeugung, Stahlerzeugung und nachfolgende Schritte wie Gießen und Umformung bzw. Verarbeitung unterteilen, siehe Abbildung 4.

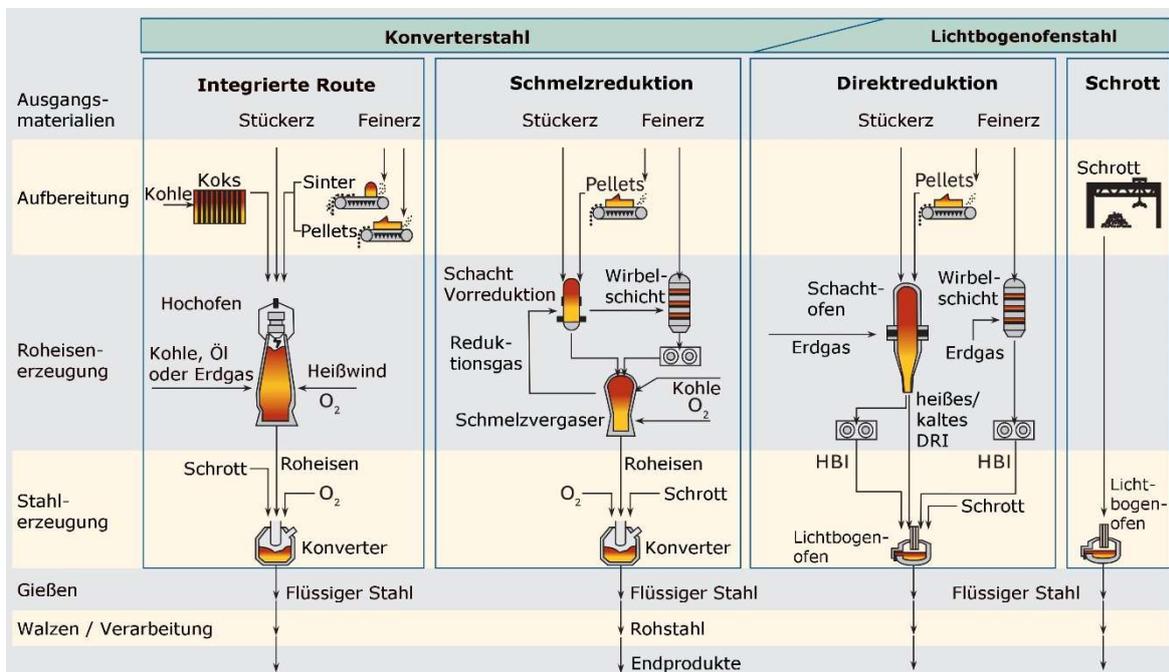


Abbildung 4: Übersicht zu den wichtigsten Prozessrouten der Stahlerzeugung [4], DRI - Direct Reduced Iron - meist Eisenschwamm, HBI - Hot Briquetted Iron – brikettierter poröser Eisenschwamm.

Die sogenannte Integrierte Route über den Hochofen mit anschließendem Blaststahlkonverter stellt dabei die weltweit dominante Herstellungsrouten für Stahl dar (Abbildung 4 – links). In der EU werden ca. 60 % des Stahls über dieses Verfahren erzeugt. Die Hauptquelle für CO₂-Emissionen ist hierbei prozessseitig die Erzeugung und Verwendung von Koks (Verwendung hauptsächlich als Hochofenkoks) als Reduktionsmittel. Insgesamt werden bei dieser Route 1,5 bis 2 t_{CO2}/t_{Stahl} produziert. Innerhalb dieser Konverterstahlroute emittiert der Hochofenprozess den größten Anteil an CO₂ und bietet somit auch das höchste Potential zur Einsparung (siehe Abbildung 5). Durch eine alternative Stahlerzeugung ohne die Verwendung von Hochofenkoks (z. B. mittels H₂) entfällt dann auch der in Abbildung 5 genannte Prozess des Verkokens.

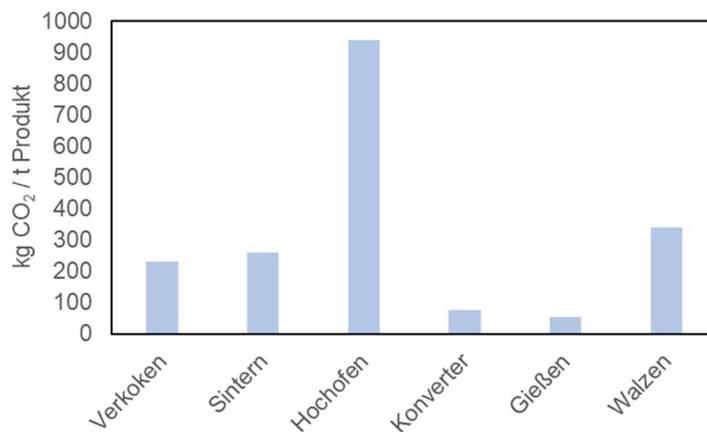


Abbildung 5: Aufgliederung der CO₂-Emissionen auf die verschiedenen Teilprozesse entlang der Konverterstahlroute [5].

Eine Prozessalternative innerhalb der Konverterstahlroute stellt die Schmelzreduktion dar (z. B. Corex und Finex – eine Weiterentwicklung des Corex-Verfahrens) [6]. Hier wird das Roheisen über eine zweistufige Kombination aus Vorreduktion und Schmelzvergaser erzeugt (Abbildung 4 – zweite Säule von Links). Die Vorteile vom Corex- und Finex-Verfahren sind die direkte Herstellung von Roheisen aus Eisenerz [6] sowie die Vermeidung eines Einsatzes von Hochofenkoks. Im Schmelzreduktionsverfahren entfallen die klassische Sinteranlage und die Kokerei [6].

Eine weitere etablierte Alternative zur Konverterstahlroute ist die Elektrostahlerzeugung über den Lichtbogenofen. Gegenwärtig wird die Route über den Lichtbogenofen überwiegend als Möglichkeit zur Stahlerzeugung auf Basis von Schrott betrachtet ($0,4 \text{ t}_{\text{CO}_2}/\text{t}_{\text{Stahl}}$ – Abbildung 4 rechts). Zur Verarbeitung von Eisenerzen wird meist eine Direktreduktion im Schachtofen oder Wirbelschichtofen unter Verwendung von Erdgas dem Lichtbogenofen vorgeschaltet (z. B. Midrex, Circored; siehe Abbildung 4 - die zweite Säule von rechts). Die Direktreduktion unter Einsatz von Erdgas wird heute bereits industriell bevorzugt in Erdgasförderländern angewendet ($1,1$ bis $1,2 \text{ t}_{\text{CO}_2}/\text{t}_{\text{Stahl}}$) [7] [8]. Steht Erdgas nicht preiswert zur Verfügung, ist die Direktreduktion derzeit nicht wirtschaftlich und damit nicht konkurrenzfähig zur Hochofenroute [7]. Dieses Verfahren ist flexibel bezüglich der Verwendung von Stahlschrotten und Roheisen [7] und kann für die Zukunft eine hohe Bedeutung im Zusammenhang mit dem Einsatz von Wasserstoff erlangen. Beim Direktreduktionsverfahren wird kein Koks eingesetzt – also ist auch keine Koksofenanlage notwendig. Die Direktreduktion mit Wasserstoff gilt als die vielversprechendste Dekarbonisierungsoption, setzt aber unbedingt die günstige Verfügbarkeit von Grünem Wasserstoff voraus (siehe dazu auch Kapitel 4 - Stahlindustrie).

Eine weitere Herausforderung ist die Einstellung des Kohlenstoffgehalts im fertigen Produkt: Entlang der Hochofenroute wird der zu hohe Gehalt an Kohlenstoff im Roheisen durch das sogenannte Frischen mit Sauerstoff verringert. Über die DRI-Route mit 100 % Wasserstoff enthält das Roheisen zunächst keinen Kohlenstoff. Stahl ist eine Legierung aus Eisen und Kohlenstoff, daher ist ein bestimmter geringer Prozentsatz an Kohlenstoff in der Prozesskette erforderlich. Aus mehreren Gründen scheint die Integration einer Kohlenstoffquelle in der Reduktionsstufe sinnvoller zu sein als die reine Direktreduktion unter Verwendung von Wasserstoff und die anschließende Zugabe des Kohlenstoffes in dem Elektrolichtbogenofen.

Die Schmelzpunktemperatur von Eisen ohne Kohlenstoff ist viel höher als die von kohlenstoffhaltigem Eisen. Kohlenstoff wird weiterhin benötigt, um Eisenoxid zu reduzieren und unerwünschte Elemente zu entfernen. Dieser hinzugefügte Kohlenstoff wird bei der Freisetzung von Asche, Schwefel oder flüchtigen Substanzen, die für die Stahlqualität schädlich sind, oxidiert.

Zementproduktion

Die Zementproduktion stellt weltweit einen der energie- und CO₂-intensivsten industriellen Produktionsprozesse dar und verursacht 6-7 % der weltweiten CO₂-Emissionen. In Deutschland werden für die Produktion von 1 t Zement etwa 600 kg CO₂ emittiert, davon sind ca. 400 kg rohstoff- und 200 kg brennstoffbedingt [3]. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland rund 34 Mio. Tonnen Zement produziert, dies entspricht CO₂-Emissionen in Höhe von 20 Mio. Tonnen oder ca. 3 % der gesamten deutschen CO₂-Emissionen [9].

Als Grundbestandteil von Beton stellt Portlandzement die am häufigsten produzierte Zementart dar. Diese Zementart besteht vorrangig aus Feinmehl (Korngröße ca. 10 µm, aus Portlandzementklinker) und Gips und/oder Anhydrit. Gips und/oder Anhydrit werden als Erstarrungsverzögerer dem Zement hinzugegeben. Die Hauptbestandteile des Portlandzementklinkers sind: Kalk (60-67 %), Siliziumoxid (17-25 %), Aluminiumoxid (2-8 %) und Eisenoxid (0-6 %) [10]. Ein vereinfachtes Fließschema für die Herstellung von Zement ist in Abbildung 6 dargestellt.

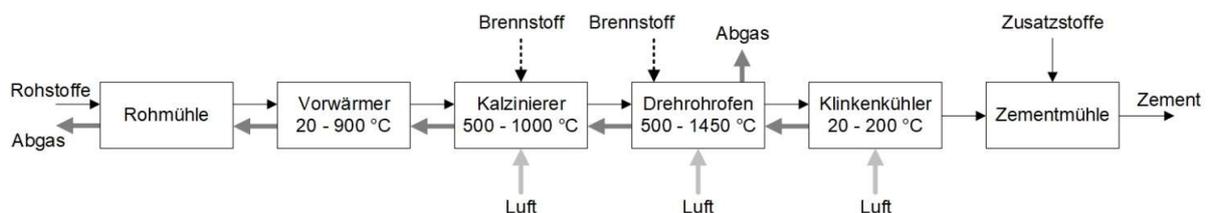


Abbildung 6: Fließbild zur Zementproduktion, eigene Darstellung nach [11].

Die angegebenen Temperaturbereiche der Prozessschritte und Anlagenteiledienen als Orientierung. Der große Temperaturbereich im Vorwärmer lässt sich auf die jeweiligen Zerkleinerungsaggregate zurückführen. Hohe Temperaturen werden durch die während des Mahlvorgangs erzeugte Wärme hervorgerufen, sind aber prozessseitig nicht erforderlich oder teilweise auch unerwünscht. Bei der herkömmlichen Zementproduktion über das Trockenverfahren fällt bis zu 90 % des gesamten CO₂ im Bereich der Aggregate Vorwärmer, Kalzinierer und Drehrohrofen an. Das CO₂ stammt dabei sowohl aus energiebezogenen Emissionen (30-40 %), d. h. aus dem Einsatz von Brennstoffen zur Wärmeerzeugung, als auch aus prozessbedingten Emissionen (Zersetzung von Kalziumkarbonat, CaCO₃) für die Klinkerherstellung. Der überwiegende Teil der prozessbedingten Emissionen entsteht bei der Kalzinierungsreaktion im Vorkalzinierer und im Drehrohrofen. Verschiedene chemische Reaktionen finden in den unterschiedlichen Zonen dieser Aggregate statt. In der ersten Zone im Temperaturbereich von 20-900 °C wird das Eingangsmaterial entwässert. Die Kalzinierung erfolgt im Temperaturbereich zwischen 850 und 950 °C. Die Klinkerbildung findet im finalen

Temperaturbereich bei 1.200 bis 1.400 °C statt [12]. Die Zementproduktion erzeugt ein Abgas mit einem relativ hohen CO₂-Gehalt, wobei nahezu das gesamte CO₂ in einem einzigen Abgasstrom anfällt [13]. Das Abgas des Drehrohrofens kann über verschiedene Prozessbypasswege aus der Anlage ausgeschleust werden. So bietet sich bspw. die Nutzung des Abgases zur Trocknung des Rohmaterials in der Rohmühle oder zur Erwärmung des Rostvorwärmers an [14], [15].

Glasproduktion

Glas wird in eine Vielzahl verschiedener Produktklassen unterteilt, welche hinsichtlich ihrer speziellen Produktionsprozesse mehr oder weniger stark variieren. Die CO₂-Emissionen (4,9 Mio. Tonnen CO₂) der Glasindustrie sind über eine Größenordnung kleiner als die der Stahl- oder Zementindustrie [16]. Die Hauptproduktklassen sind: Behälterglas, Flachglas, Spezialglas und Glasfasern. Die einzelnen Produktklassen stellen jeweils unterschiedliche Anforderungen an den Herstellungsprozess und die damit verbundenen Energieverbräuche, Prozessoptionen und Produktqualitäten. Die größte Menge an industriell hergestelltem Glas ist sogenanntes Natron-Kalk-Silikatglas mit den Hauptbestandteilen SiO₂, Na₂O und CaO. Andere Oxide werden in geringen Mengen zugegeben, um bestimmte Eigenschaften einzustellen.

Vereinfacht lässt sich die Glasproduktion in folgende Hauptprozesse (s. Abbildung 7) unterteilen [17]:

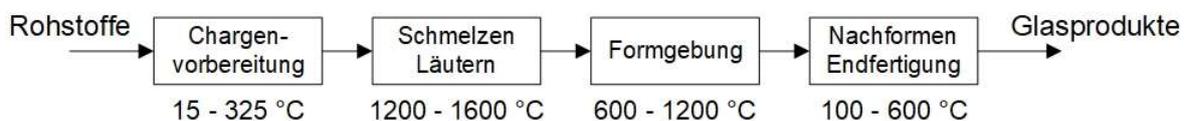


Abbildung 7: Fließbild zur Glasproduktion, eigene Darstellung nach [17]

Der Schmelzprozess weist den höchsten Energieverbrauch auf. Je nach Produktklasse werden hier 50-85 % des Gesamtenergiebedarfs der Glasherstellung benötigt. Die Aufgabe des Schmelz- und Läuterprozesses besteht darin, eine chemisch und thermisch homogene Schmelze für die anschließende Formgebung zur Verfügung zu stellen.

Allgemein werden die verschiedenen Öfen nach der Art des Energieträgers, der Flammenrichtung (bei Energieeintrag über Verbrennung) und der Art der Wärmerückgewinnung unterteilt. Die Wärme für das Schmelzen des Materials wird entweder thermisch durch Brenner (Erdöl oder Erdgas) oder elektrisch über Elektroden bzw. durch eine Kombination beider Technologien zur Verfügung gestellt [17].

Papierproduktion

Die Menge der CO₂-Emissionen der Papierproduktion ist vergleichbar mit der Glasindustrie. Als Ausgangsstoff für die Papierherstellung werden Faserstoffe eingesetzt. In Abbildung 8 ist eine Übersicht über die verschiedenen Bereiche der Papierindustrie gegeben. Für die Herstellung von Primärfasern wird zwischen dem durch Schliff- oder Refiner-Verfahren, mechanisch

gewonnenen Holzstoff sowie dem durch das saure Sulfit- oder das alkalische Sulfatverfahren, chemisch gewonnenen Zellstoff unterschieden.

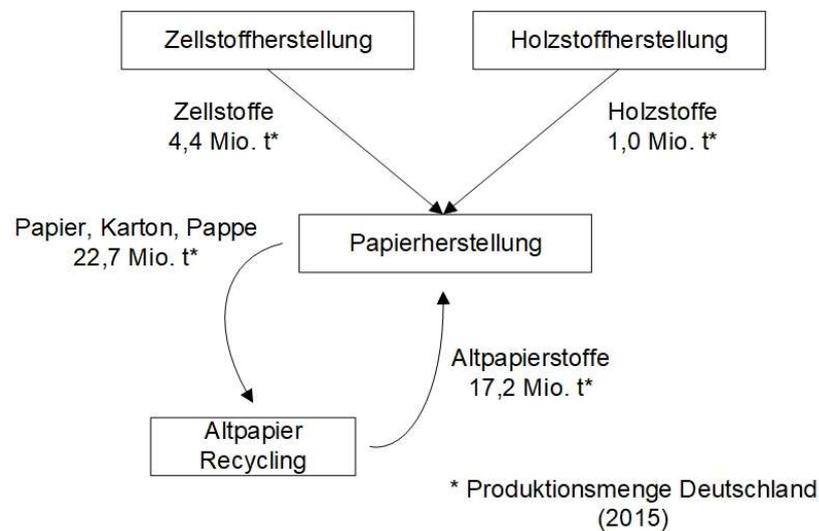


Abbildung 8: Übersicht zur Papierindustrie und Produktionsmengen für 2015, eigene Darstellung.

Für die Zellstoffherstellung wird überwiegend der Sulfat-Prozess eingesetzt (Kraft-Aufschluss genannt, da hohe Zellstofffestigkeit erreichbar). Die Zellstoffherstellung kann in drei Hauptprozessschritte unterteilt werden: Rohstoffvorbehandlung, chemischer Aufschluss und das Bleichen. Der chemische Aufschluss und das Bleichen dienen hauptsächlich zur Entfernung des Lignins. Lignin ist das Bindemittel, welches die Holzfasern zusammenhält. Etwa 20 bis 30 % der Trockenmasse verholzter Pflanzen bestehen aus Ligninen. Diese sind wesentlich für die Druckfestigkeit und Beständigkeit pflanzlicher Gewebe. Der chemische Aufschluss ist dabei grundlegend als Kochprozess zu verstehen, der die Faser aus der Holzmatrix freisetzt und das Lignin in der Kochlauge löst. Die beiden Hauptverfahren unterscheiden sich in der Chemie des Kochprozesses, dem damit verbundenen chemischen Rückgewinnungsverfahren und der Anzahl an benötigten Bleichschritten [18].

Bei der Holzstoffherstellung werden Holzstofffasern für die Papierherstellung durch das Einbringen mechanischer Energie bereitgestellt. In Deutschland werden zwei Holzstoffarten erzeugt: Holzschliff (SGW, Stone Groundwood) und thermomechanischer Holzstoff (TMP, Thermo Mechanical Pulp). Beim SGW-Aufschluss werden Stämme unter Zugabe von Wasser gegen einen rotierenden Mahlstein gepresst. Zur leichteren Verarbeitung der Fasern werden diese einer Dampfbehandlung unterzogen. Die gequollenen Fasern werden anschließend durch die Zerfaserung von Hackschnitzeln zwischen Metallscheiben zu TMP-Holzstoff verarbeitet [18].

Hohe Bedeutung für die Branche hat das Altpapier-Recycling: In Deutschland macht Altpapierstoff ca. 75 % der für die Papierherstellung eingesetzten Faserstoffe aus [34]. Bei der Aufbereitung von Recyclingfasern (Altpapierstoff) werden die Altpapiere zuerst im Pulper durch Zusatz von Wasser dispergiert und die Fasern anschließend im Deinking-Prozess entfärbt. Bei jedem Recyclingvorgang verringert sich die Länge der Fasern. Zu kurze Fasern werden im Sortierprozess ausgesondert und sind für das weitere Recycling verloren. In der Regel lassen

sich Papierfasern laut [35] mindestens zwölfmal wiederverwerten. Ansprüche der Verbraucher und der weiterverarbeitenden Industrie an die Qualität der Papierprodukte erfordert oft die Zugabe von frischen Fasern. Aus diesen beiden Gründen wird die Zufuhr von Primärfasern für die Papierproduktion langfristig weiterhin erforderlich bleiben.

Der Ausgangsstoff für die eigentliche Papierherstellung ist ein Gemisch aus Fasern, Füllstoffen und Wasser. Die Zusammensetzung des Fasergemischs richtet sich nach der jeweiligen Anwendung, kann aber auch aus bis zu 100 % recyceltem Altpapier bestehen (z. B. Wellpappe, Kartonagen und Zeitungsdruckpapiere). Dieses Papier-Faser-Gemisch muss einem sehr energieintensiven Trocknungsprozess, mit verschiedenen Walzvorgängen mit genau gesteuerten Phasen (Papierqualität), durchlaufen. Das vorentwässerte, aber noch nasse Papier wird durch Presswalzen geführt. Die Presswalzen werden mit Dampf beheizt und bewirken die Trocknung des Papiers. Papiermaschinen sind meist bis zu 250 m lange Anlagen, die ein kontinuierliches Blatt erzeugen.

Befinden sich die Faserproduktion und die Papierherstellung an einem Standort, handelt es sich um eine integrierte Produktion. Bei einer Trennung der beiden Prozessschritte wird der Faserstoff vor dem Transport entwässert und getrocknet. Im Allgemeinen stellt die integrierte Produktion die energieeffizientere Methode im Vergleich zur Aufteilung der Prozessschritte dar [19].

Raffinerien und Chemische Industrie

In einer *Raffinerie* werden Rohöl und andere Ausgangsmaterialien zu verschiedenen Erdölprodukten verarbeitet. Aufgrund eines bereits relativ hohen Effizienzniveaus für bestehende Anlagen ist eine zusätzliche Energieeinsparung und Emissionsreduzierung in diesem Bereich oft schwierig bzw. mit erheblichen Kosten und Aufwand verbunden [20].

Die wichtigsten Raffinerieprodukte sind: Transportkraftstoffe (Benzin, Flugzeug-Kraftstoffe, Diesel und Heizöl), Nicht-Kraftstoff-Produkte (z. B. Koks, Asphalt, Schmierstoffe, Lösemittel und Wachse) sowie petrochemische Ausgangsstoffe (z. B. Ethylen, Propylen und Benzol). Die flüssigen Kraftstoffe sind dabei mit Abstand der größte Anteil der Produktionsmenge. Das Prinzip des Raffinierens besteht darin, die verschiedenen Bestandteile des Rohöls zu separieren und zu verschiedenen verkaufsfähigen Produkten aufzubereiten, die bestimmten Anforderungen entsprechen. Die dabei eingesetzten Verfahren lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen: Trennung, Umwandlung und Veredelung. Eine zentrale Prozesseinheit zur Trennung der verschiedenen Bestandteile, die in jeder modernen Raffinerie vorhanden ist, stellt die Destillation dar. Hierbei handelt es sich gleichzeitig um den energieaufwändigsten Prozessschritt innerhalb einer Raffinerie [21]. In sogenannten Rektifikationskolonnen werden die verschiedenen Kohlenwasserstoffe im Rohöl entsprechend ihrer jeweiligen Siedetemperatur in bestimmte Gruppen aufgetrennt, siehe Abbildung 10. In diesem Prozessschritt erfolgt zunächst eine atmosphärische Destillation unter Umgebungsdruck, deren Rückstand mittels Vakuum-Destillation weiter behandelt wird.

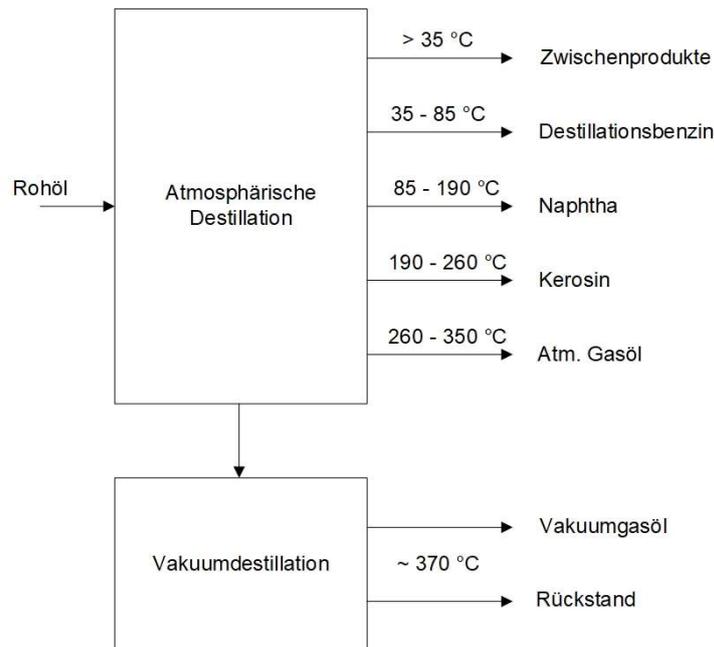


Abbildung 9: Destillation von Rohöl als Haupttrennprozess in der Erdölraffinerie eigene Darstellung nach [22].

Die an die Destillation anschließenden Weiterverarbeitungsschritte unterscheiden sich je nach zu erzeugendem Produkt deutlich voneinander. Die vorhandene Prozesskomplexität der jeweiligen Raffinerie kann in Abhängigkeit des vorhandenen Produktportfolios (stark) variieren. In den anschließenden Prozessstufen werden die verschiedenen Zwischenprodukte durch physikalische und chemische Prozesse hinsichtlich ihrer Eigenschaften verändert bzw. optimiert. Die am häufigsten angewandten Umwandlungsschritte sind: thermisches Cracken, katalytisches Cracken, Hydrocracking und Coking (Verkoken). Hierbei stellt das thermische Cracken den ältesten Prozess dar, der mittlerweile durch neuere und effizientere Prozesse ersetzt wurde [22].

In einer anschließenden Nachbehandlung werden die Produkte meist durch die Entfernung bestimmter unerwünschter Bestandteile veredelt. Ein häufig eingesetztes Verfahren ist das „Hydrotreating“, hierbei werden über Reformierung mithilfe von Wasserstoff und verschiedener Katalysatoren Schwefel und andere unerwünschte Begleitstoffe aus den Produkten entfernt.

Raffinerien können entsprechend ihrer Prozesskomplexität charakterisiert werden. So lässt sich vereinfachend sagen, dass Raffinerien mit einer geringen Komplexität meist leichtes Schweröl innerhalb weniger Prozessschritte (Destillation, Reformer, Entschwefelung der Destillate) größtenteils zu Produkten mit geringerer Qualität verarbeiten. Die kostenintensiven Umwandlungsschritte, wie das Cracken, fehlen bei solchen Anlagen zumeist. Dem gegenüber stehen Raffinerien mit hoher Prozesskomplexität, welche in der Regel schwerere Rohöle verarbeiten und im Wesentlichen höherwertige Produkte, wie Benzin, erzeugen [22].

Die *chemische Industrie* zeichnet sich durch ihre hohe Wertschöpfungstiefe aus, diese ist auf die breite Produktionspalette, bestehend aus Polymeren, Petrochemikalien, anorganischen Grundchemikalien, Fein- und Spezialchemikalien, Wasch- und Körperpflegemitteln und Pharmazeutika, zurückzuführen. Hierbei ist die Produktion von Grundchemikalien wie

Methanol, Ammoniak, Harnstoff, Ethylen, Propylen, Butadien, Chlor sowie die Aromaten Benzol, Toluol und Xylol besonders energie- und rohstoffintensiv und für rund zwei Drittel der derzeitigen Treibhausgasemissionen des Sektors verantwortlich. Etwa zehn Prozent des Stroms in Deutschland werden dafür aufgewandt. Die Herstellung von Grundchemikalien erfolgte bisher in etablierten und technologisch ausgereiften Produktionsprozessen und ausschließlich auf Basis fossiler Rohstoffe [31], [32].

Getränke- und Lebensmittelindustrie

Für die Verarbeitung und Veredlung von Getränken und Lebensmitteln sind ebenfalls erhebliche Mengen an Wärme und elektrischer Energie erforderlich. Benötigte Wärme (oft Heißwasser und Dampf) und elektrische Energie (Schockfrostern, Sterilisieren, Konservieren, Pasteurisieren, Erhitzen und Garen) werden meist über Erdgas, Heizöl oder auch biogene Brennstoffe direkt vor Ort erzeugt. Der elektrische und thermische Energieverbrauch beträgt für Deutschland ca. 216 Petajoule im Jahr [36]. Das sind circa 10 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs in Deutschland. Die Getränke- und Lebensmittelindustrie verursacht ca. 35 % der globalen CO₂-Emissionen [36]. Der regionale Wirtschaftssektor ist durch eine Vielzahl von Einzelbranchen und einer entsprechend hohen Produktvielfalt gekennzeichnet. Die Branchen: Fleischerei, Molkerei, Brauerei (alkoholische Getränke) und Bäckerei benötigen allein davon 50 % der Energie dieses Sektors. Es wird schnell ersichtlich, dass neben einer Vielzahl von Produkten auch eine Vielzahl von Prozess- und Verfahrensschritten zur Herstellung dieser Produkte erforderlich ist. Allerdings kann man trotz dieser Vielzahl auch wenige Hauptkomponenten identifizieren, die für Prozesswärme und -kälte sowie Antrieb elektrischer Motoren sorgen (mit den verbundenen Emissionen). Daraus folgt, dass standortspezifische Konzepte zur Herstellung eines bestimmten Produkts ggf. von Betrieb zu Betrieb übertragen werden können; hierfür ist in dieser Branche ein leicht höheres Potential vorhanden als dies in alle anderen Branchen der Fall ist.

Die Hauptenergieverbraucher sind entsprechend Prozesswärme, Kühlung, Prozesskälte und Antrieb elektrischer Motoren – also Technologien, welche einen hohen Verallgemeinerungsgrad unabhängig vom konkreten Endprodukt aufweisen. In 2021 betrug der Anteil der Lebensmittelwirtschaft 6,2 % der deutschen Wirtschaft [47].

Energieversorgung

Kohlekraftwerke

Kohlekraftwerke stellen weltweit die dominante Methode zur Elektrizitätserzeugung dar. Die Einteilung dieser Kraftwerke erfolgt in der Regel in vier Kategorien anhand der Eigenschaften des erzeugten Wasserdampfs (Tabelle 1). Die Effizienz des Dampfprozesses zur Stromerzeugung (Rankine Prozess) steigt den Gesetzen der Thermodynamik folgend (Carnot-Wirkungsgrad) einerseits bei höheren Turbineneintrittstemperaturen und den dafür notwendigen Dampfdrücken und andererseits bei niedrigeren Kondensationstemperaturen.

Den aktuellen Stand der Technik stellen ultra-superkritische Kraftwerke dar mit Dampftemperaturen bis zu 600 °C [23].

Tabelle 1: Einteilung von Kohlekraftwerken nach Dampfeigenschaften, eigene Darstellung nach [23].

	Subkritisch	Superkritisch	Ultra-superkritisch	A-USK (advanced ultra superkritisch)
Dampfdruck (bar)	180	250	300	350
Dampftemperatur (°C)	540	560	600	700
(Netto-)Effizienz (%)	35	40	45	48

Der Einsatz der CCS-Technologie ermöglicht eine Verringerung der CO₂-Emissionen für Kohlekraftwerke. Allerdings ist damit auch immer eine Senkung der Effizienz verbunden, da ein bestimmter Teil der Energie für den jeweiligen Prozess zur CO₂-Abtrennung, Verdichtung und unterirdischen Lagerung benötigt wird [23]. Aus wirtschaftlicher Sicht lässt sich jedoch festhalten, dass die Anwendung der CCS-Technologie bei Kohlekraftwerken kostengünstiger ist als bei Kraftwerken, welche auf Basis von Erdgas betrieben werden [24].

Gas- & Dampfkraftwerke

Gas- & Dampfkraftwerke (GuD) sind eine weitverbreitete, sehr effiziente Methode zur Wandlung von chemischer Energie in mechanische und weiter in elektrische Energie. In einem GuD-Kraftwerk wird der Prozess einer Gasturbine mit einem Dampfprozess kombiniert, was den Gesamtwirkungsgrad erhöht und gleichzeitig den Brennstoffverbrauch reduziert.

Das Prinzip eines GuD-Kraftwerks ist: Nach dem ersten Gasturbinenprozess hat das Arbeitsmedium noch genügend thermische Energie, sodass ein zweiter Prozess diese Energie nutzen und wandeln kann. Im Fall des GuD-Kraftwerks wird das Abgas der Gasturbine genutzt, um Dampf zu erzeugen, welcher anschließend in einer Dampfturbine zur Stromerzeugung genutzt wird. Moderne Systeme können Wirkungsgrade von über 60 % erreichen und gehören zu den effizientesten konventionellen Kraftwerken.

Tabelle 2: Übersicht über die spezifischen Kohlenstoffdioxid Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien, eigene Darstellung nach [25].

	Brennstoffausnutzungsgrad bezogen auf den Stromverbrauch [%]	CO ₂ -Emissionsfaktor pro kWh _{el} [g/kWh]
Erdgas	49	409
Steinkohle	40	852
Braunkohle	36	1.135

In der Tabelle 2 sind der Brennstoffausnutzungsgrad sowie der CO₂-Emissionsfaktor für die wichtigsten in konventionellen Kraftwerken verwendeten fossilen Brennstoffe genannt. Die Werte für Steinkohle liegen beim Doppelten und bei Braunkohle fast beim Dreifachen des

Wertes für den gesamten Strommix von 410 g/kWh (Stand 2021) [48]. Wenn Erdgas in Zukunft verstärkt durch LNG abgelöst werden wird, ergeben sich für Gas unter der Betrachtung der Vorketten Erhöhungen des Emissionsfaktors von ca. 15-35 %, abhängig von den betrachteten Förderregionen für Erdgas und LNG [37].

Zu ergänzen ist, dass bei einer sogenannten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), wo meist Dampf bei höheren Temperaturen für Heizungsnetze oder für die Prozesswärme entnommen wird, ein sehr hoher Energieausnutzungsgrad von bis zu 90 % erreicht wird. Typische KWK-Anlagen sind Heizkraftwerke in der Regie von Stadtwerken oder anderen regionalen Anbietern sowie Industriekraftwerke (z. B. Chemie, Papier).

3.2. Übersicht zu den Standorten

Die Ergebnisse einer detaillierten Recherche zur Erfassung der CO₂-emissionsstärksten Produktionssektoren einschließlich des Energiesektors werden zunächst tabellarisch dargestellt. Für jedes Unternehmen sind Standort, Produkt, Verfahren und Firmengröße hinterlegt. Ergänzt werden die nachfolgenden Tabellen jeweils durch eine Karte der Lage und der zugehörigen CO₂-Emissionen am betrachteten Standort. Diese Bestandsaufnahme bildet die Grundlage für die weitere Analyse der Emissionsentstehung und für zukünftige Vermeidungsoptionen im Rahmen von standortspezifischen Dekarbonisierungskonzepten.

Stahlindustrie

Tabelle 3: Unternehmen der Metall-, Eisen- und Stahlindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkte	Verfahren	Firmengröße
ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH	Eisenhüttenstadt	Flachstahl	Oxygenstahlwerk	2.500 MA
Ortrander Eisenhütte GmbH	Ortrand	Eisen-Kohlenstoff-Gusslegierungen	Prozessorgesteuerte MF-Schmelzanlage	250 MA
Voestalpine Wire Germany GmbH	Finsterwalde	Kaltstauchdraht, Eisendraht, Automatenstahldraht	Walzdraht und Drahtziehenanlagen	171 MA
MGF Metallguss Finsterwalde GmbH	Finsterwalde	Aluminiumguss	Sandgussverfahren	44 MA
Duktil Guss Fürstenwalde	Fürstenwalde	Sphäroguss, Grauguss	Sandgussverfahren	250 MA
Kunstgießerei Lauchhammer	Lauchhammer	Kunstguss (Skulpturen, Glocken, etc.)	Sandform- und Wachs ausschmelzverfahren, Keramikformverfahren	21 MA
RIWO - Metallguss Zossen GmbH	Zossen	Aluminium- und Schwermetallgussteile	Sandgussverfahren	19 MA

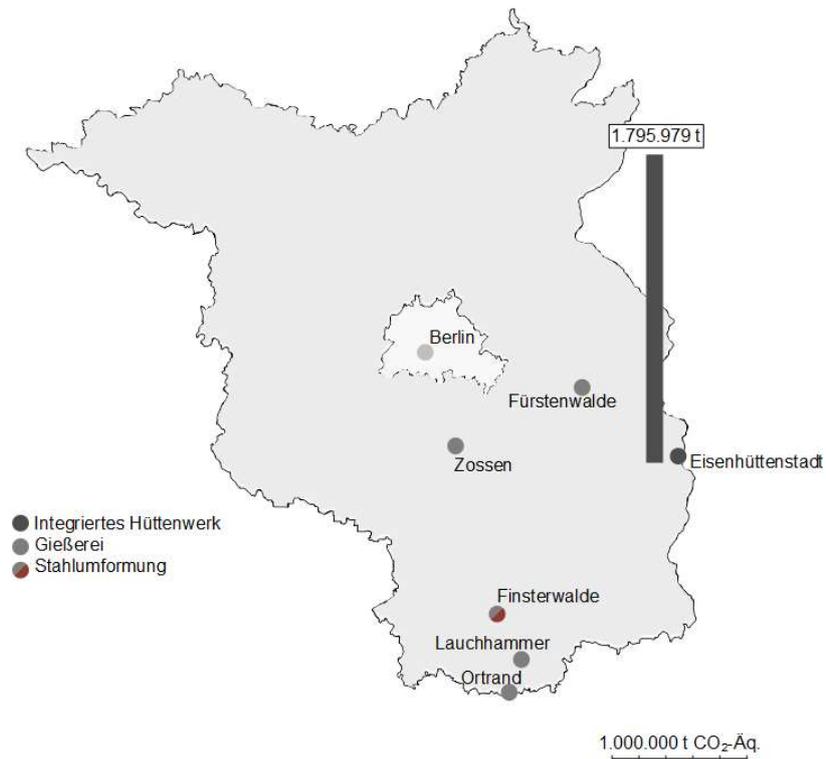


Abbildung 10: Übersicht zu den Unternehmen der Metall-, Eisen- und Stahlindustrie in Ost-Brandenburg, (Gießereien und Stahlmformung ist nicht in DEHSt gelistet, Deutsche Emissionshandelsstelle [1]), eigene Darstellung.

Zementindustrie

Tabelle 4: Unternehmen der Zementindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkte	Verfahren	Firmengröße
Cemex Deutschland AG	Eisenhüttenstadt	Transportbeton	Zementwerk ohne Klinkerherstellung	19 MA
Cemex Zement GmbH	Rüdersdorf	Zement, Bindemittel, Beton, Fließestrich, Sand, Kies	Zementwerk mit Klinkerherstellung	1.400 MA
Zementwerk Königs Wusterhausen	Königs Wusterhausen	Zement, Bindemittel, Beton, Fließestrich, Sand, Kies	Zementwerk ohne Klinkerherstellung	140 MA
Fels-Werke GmbH	Rüdersdorf	Schaumkalk	Gleichstrom- Gegenstrom- Regenerativofen und in modernisierten Normalschachtöfen	900 MA
KNAUF Deutsche Gipswerke KG	Schwarze Pumpe	Gipskartonplatten	REA-Gips und Mehretagentrockner	85 MA
Etex Building Performance GmbH	Peitz	Gipskartonplatten	Mehretagentrockner	68 MA
Wienerberger GmbH - Werk Buchwäldchen	Buchwäldchen	Vormauerziegel	Handformung, Tunnelofen	50 MA
Klinkerwerk Muhr GmbH & Co. KG	Lichterfeld	Wasserstrich Verblender, Pflaster & Riemchen, Strangpress Klinker	Handformung und Strangpressverfahren, Brennen im Tunnelofen	65 MA
PORCELAINGRES GMBH	Vetschau	Feinsteinzeug- fliesen	Zementwerk ohne Klinkerherstellung	19 MA

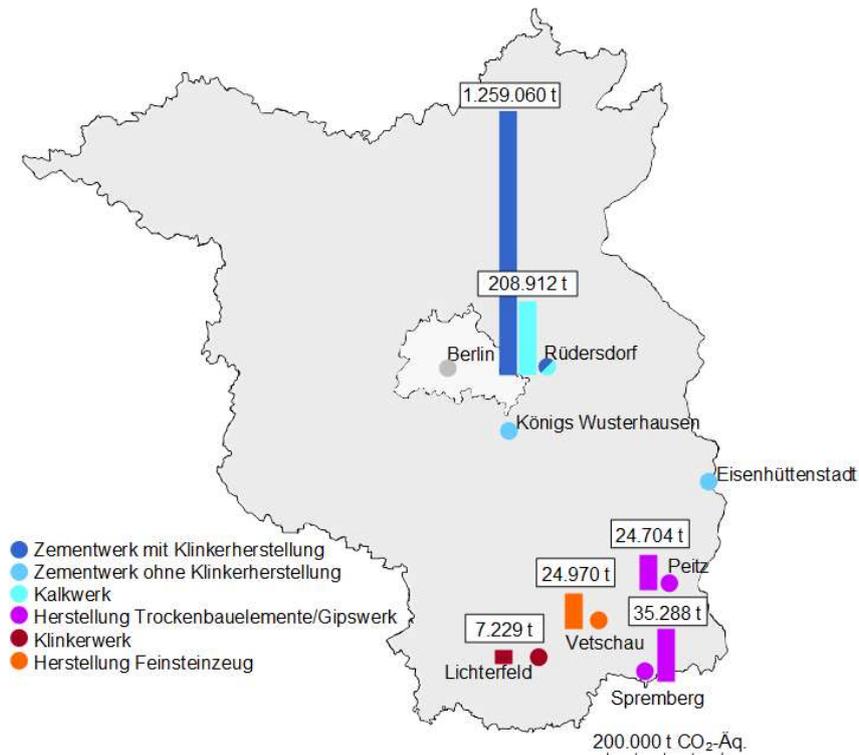


Abbildung 11: Übersicht zu den Unternehmen der Zement- und Baustoffindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Glasindustrie

Tabelle 5: Unternehmen der Glasindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkt	Verfahren	Firmengröße
Ardagh	Drebkau	Behälterglas	Glashütte	160 MA
Ardagh	Neuenhagen	Behälterglas	Glashütte	141 MA
Swarco GmbH	Schönborn	Glasperlen für Straßenmarkierung	Direktschmelzverfahren	27 MA
GMB Glasmanufaktur Brandenburg	Tschernitz	Flachglas (Solar- & Spezialglas)	Guss-Walzverfahren	300 MA

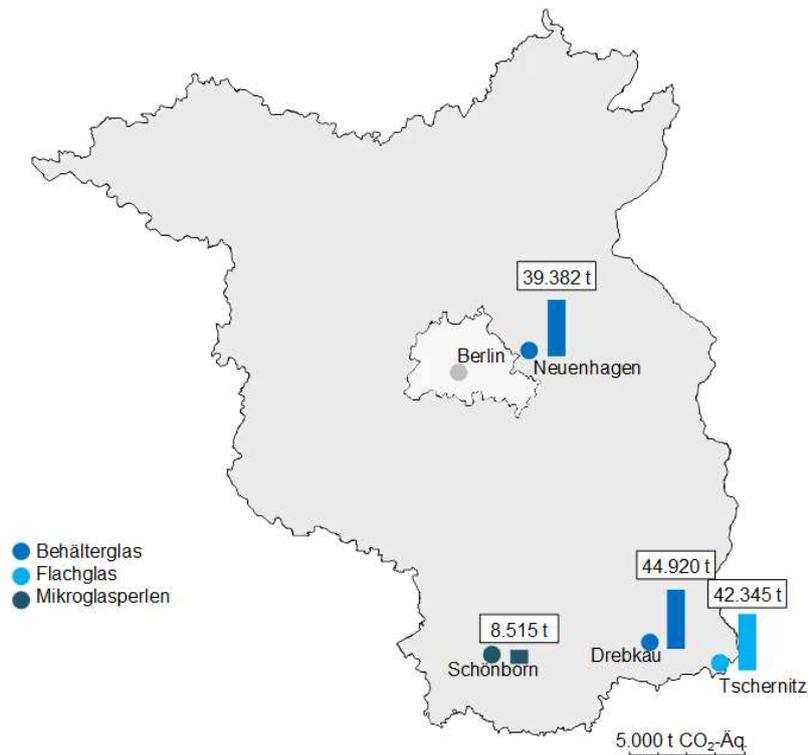


Abbildung 12: Übersicht zu den Unternehmen der Glasindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Papierindustrie

Tabelle 6: Unternehmen der Papierindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkt	Verfahren	Firmengröße
Fiberboard GmbH	Baruth/ Mark	Herstellung von HDF Platten für Laminat	Flach- und Strangpressplatten aus Holzspänen und Holzfurnier	1000 MA
Pfleiderer Baruth GmbH	Baruth/ Mark	Rohspan- und Faserplatten, weiterveredelte dekorative Produkte, Schichtstoffen, HPL-Elemente, Arbeitsplatten sowie Lackoberflächen für die Innen- und Außenanwendung	Flach- und Strangpressplatten aus Holzspänen	140 MA
Sonae Arauco GmbH Beeskow	Beeskow	Spanplatten	Flach- und Strangpressplatten aus Holzspänen	242 MA
Progroup Paper PM2 GmbH	Eisenhüttenstadt	Wellpappenrohpapier, Wellpappformate sowie die zertifizierten	Einsatz von Altpapier,	700 MA an 13 Standorten

		Next Generation-Produkte	Papiermaschine, eigenes Kraftwerk	
LEIPA Group GmbH	Schwedt	Papier	Papiermaschine	230 MA
Hamburger Rieger GmbH Papierfabrik Spremberg	Spremberg	weiße ungestrichene Wellpappe- Rohpapiere, weiße gestrichene Papiere	Papiermaschine, Stahlwalzen	450 MA

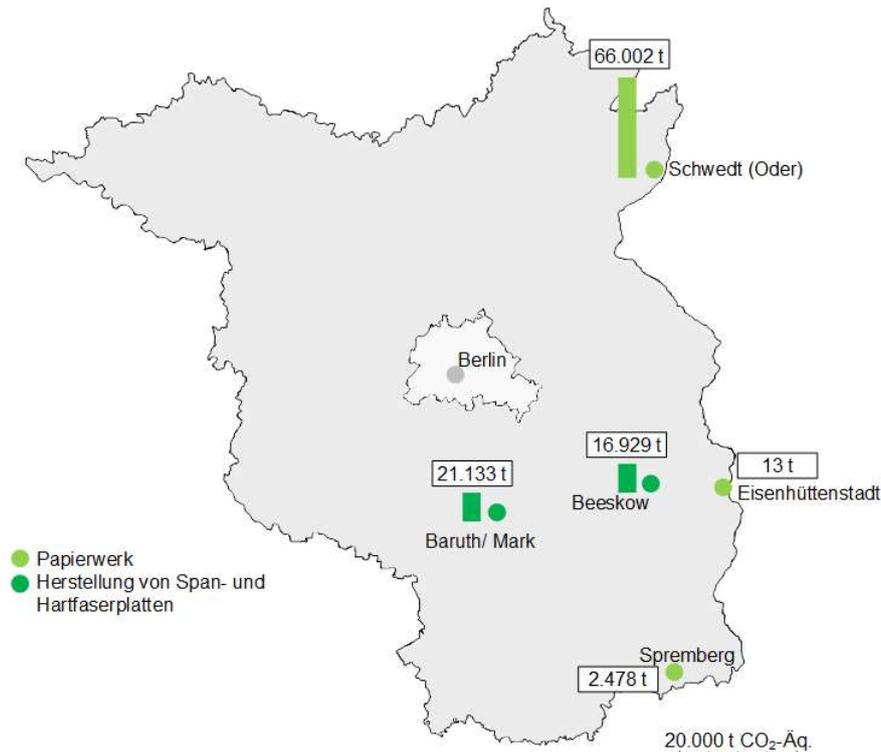


Abbildung 13: Übersicht zu den Unternehmen der Papier- und Holzverarbeitenden Industrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Raffinerien und Chemische Industrie

Tabelle 7: Unternehmen der chemischen Industrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkt	Verfahren	Firmengröße
LEAG	Schwarze Pumpe	Braunkohle	Braunkohlenveredelung	8.000 MA insgesamt
Air Liquide Deutschland GmbH (Inbetriebnahme: 2023)	Schwarzheide	Sauerstoff, Stickstoff, CO ₂ -freie Druckluft für Anlage zur Herstellung von Batteriematerial BASF	Luftzerlegungsanlage	4.000 MA
INEOS Styrolution Schwarzheide GmbH	Schwarzheide	Styrol-Kunststoffe	Dehydrierung von Ethylbenzol	3.600 MA insgesamt

BASF Schwarzheide GmbH	Schwarzheide	Schaumstoffe, PU-Dispersionen zur Oberflächenveredlung, Fungizide, Wasserbasis-Lacke, Polyurethan, Technische Kunststoffe, Kathodenmaterial (ab 2022)	Steamreforming-anlage, Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk	2.035 MA
PCK Raffinerie GmbH	Schwedt/Oder	Verarbeitung von Rohöl (Benzin, Diesel, Heizölen, Flüssiggas, Bitumen, Kerosin, Schwefel, Aromaten, Energie)	Erdölverarbeitungs- werk	1.200 MA
Galfa GmbH & Co. KG	Finsterwalde	Oberflächen- beschichtungen	Kathodischer Korrosionsschutz	230 MA in Polen und Deutschland
Grupa Azoty ATT Polymers	Guben	Polyamid	Polykondensation	68 MA
Proseat Schwarzheide GmbH	Schwarzheide	Kunststoff für Leichtbaukomponenten (Partikelschaum wie EP)	Schäumung meist mittels Butanbeladung in den Autoklaven	100 MA
ZEPPOIL Schwarzheide GmbH	Schwarzheide	Glycerin	Destillation	20 MA
puralis GmbH	Senftenberg	Schaumstoffe, Bauteile und Komponenten aus Polyurethan	Form- und Strangpressteile	60 MA

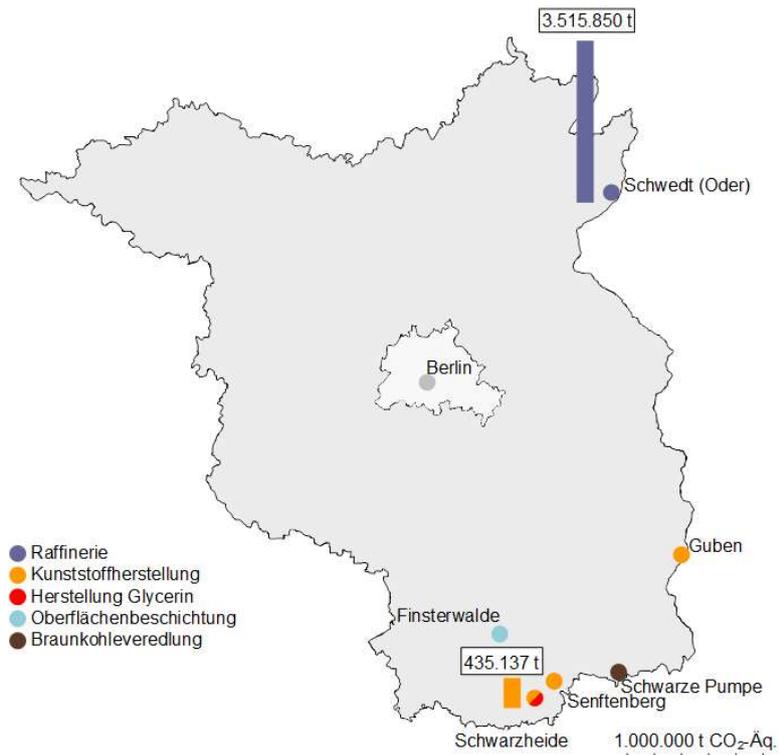


Abbildung 14: Übersicht zu den Unternehmen der chemischen Industrie in Ost-Brandenburg, (Oberflächenbeschichtung und Kunststoffherstellung teilweise nicht in DEHSt [1] gelistet) eigene Darstellung.

Getränke- und Lebensmittelindustrie

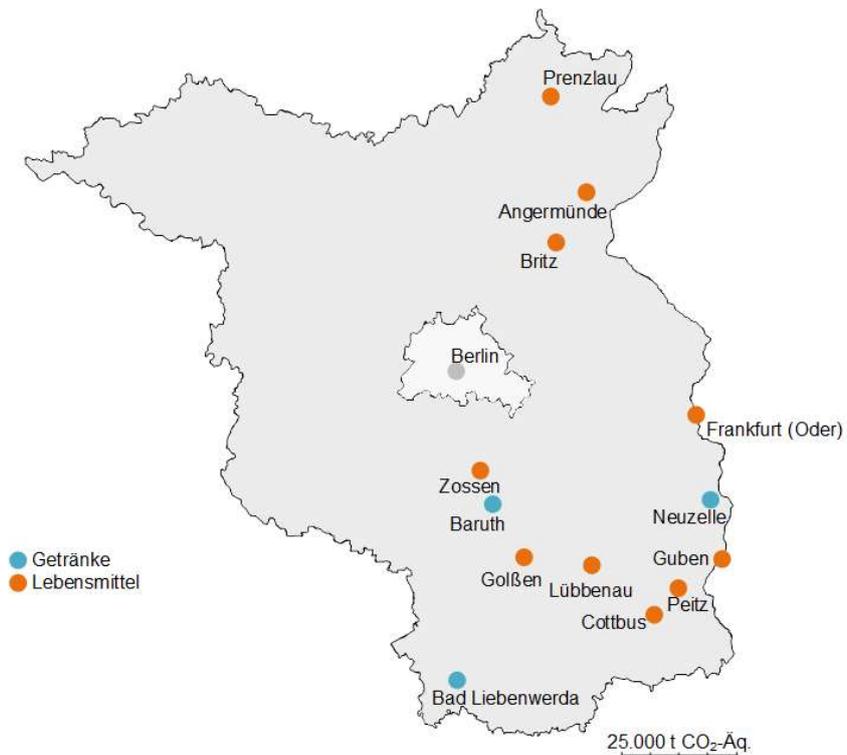


Abbildung 15: Übersicht zu Unternehmen der Getränke- und Lebensmittelindustrie in Brandenburg, (Getränke- und Lebensmittelindustrie ist nicht in DEHSt gelistet), eigene Darstellung.

Tabelle 8: Unternehmen der Getränke- und Lebensmittelindustrie in Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkt	Firmengröße
Bad Liebenwerda GmbH	Bad Liebenwerda	Mineralwasser und Erfrischungsgetränke	230 MA
Bauer Fruchtsaft GmbH	Bad Liebenwerda	Fruchtsäfte	40 MA
Brandenburger Urstromquelle GmbH	Baruth/Mark	Mineralwasser	457 MA
Klosterbrauerei Neuzelle GmbH	Neuzelle	Bier, Mixgetränke, Limonaden	46 MA
Hemme Milch GmbH & Co. KG	Angermünde	Milch und Milchprodukte	50 MA
EWN Wurstspezialitäten GmbH & Co. KG	Britz	Fleisch- und Wurstwaren	500 MA
Kunella Feinkost GmbH	Cottbus	Speiseöle, Würzmittel und Saucen	38 MA
Unicaps GmbH	Frankfurt (Oder)	Bohnenkaffee & Kaffeekapseln	42 MA
Golßener Fleisch- und Wurstwaren GmbH & Co. KG	Golßen	Wurstwaren und Feinkostsalate	200 MA
Kanow-Mühle Sagritz	Golßen	Speiseöle	11 MA
Spreewaldkonserven Golßen GmbH	Golßen	Obst- und Gemüsekonserven	200 MA
Bäckerei Dreißig	Guben	Brot- und Backwaren	800 MA
RABE Spreewald Konserven GmbH & Co. KG	Lübbenau	Obst- und Gemüsekonserven, Saucen	60 MA
Uckermärker Milch GmbH	Prenzlau	Milch und Milchprodukte	110 MA
Lienig Wildfruchtverarbeitung GmbH	Zossen	Verarbeitung von Früchten	
Peitzer Edelfisch Handelsgesellschaft mbH	Peitz	Speisefische	35 MA

Energiesektor

Der Energiesektor wurde gesondert betrachtet, da er bei den CO₂-Emissionen eine Sonderstellung einnimmt. Nach [2] ist die Energiewirtschaft der Sektor mit den höchsten Treibhausgasemissionen und versorgt die anderen Branchen mit elektrischer Energie und Prozesswärme.

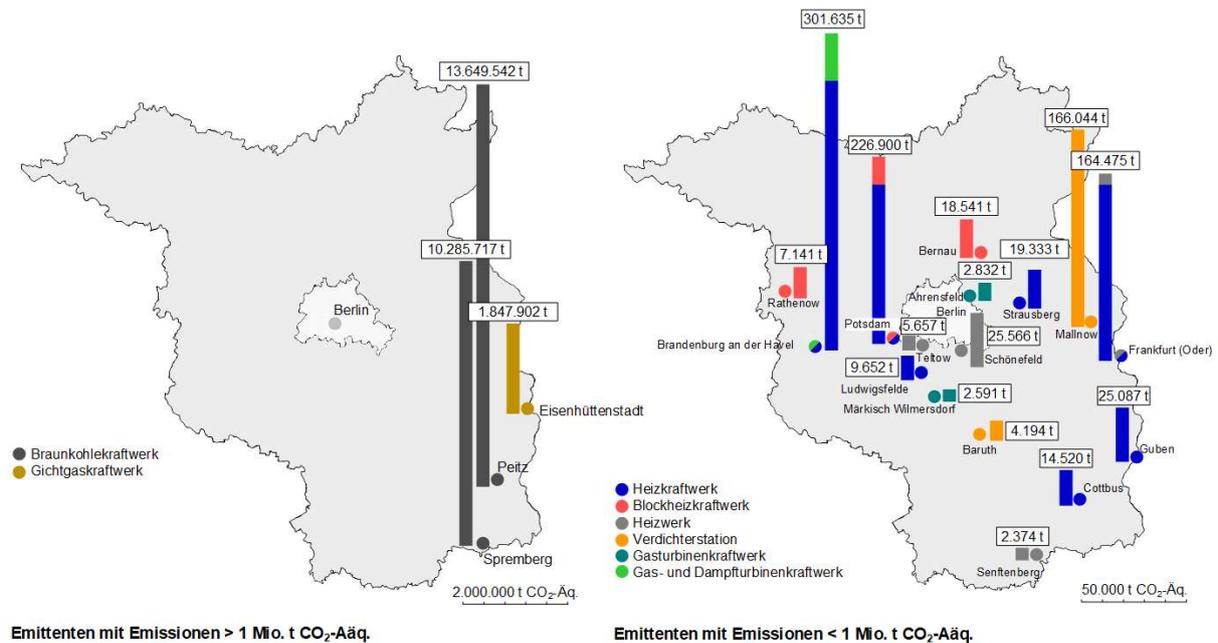


Abbildung 16: Übersicht zu Unternehmen des Energiesektors in Brandenburg, eigene Darstellung.

Tabelle 9: Unternehmen des Energiesektors in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.

Firma	Standort	Produkt	Verfahren
Lausitz Energie Kraftwerke AG	Ahrensfelde	Elektrischer Strom	Gasturbinenkraftwerk, (Kapazitätsreserve) 4 Gasturbinen je 30 MW, Brennstoff: Erdgas, Gasspeicher: 360.000 Nm ³
GASCADE Gastransport GmbH	Baruth/Mark	Erdgas	Anzahl der Verdichter: 3, Verdichterleistung: 66,3 MW (3 x 22,1 MW), max. zul. Betriebsdruck: 100 bar, Antriebsart: Gasturbine
OPAL Gastransport GmbH & Co. KG	Baruth/Mark	Erdgas	Anzahl der Verdichter: 3, Verdichterleistung: ca. 99,1 MW, max. zul. Betriebsdruck: 100 bar, Kapazität: 3,6 Mio. m ³ /h (im Normzustand), Antriebsart: Gasturbine
Stadtwerke Bernau GmbH	Bernau	Strom & Fernwärme	5 Blockheizkraftwerke (Wärmeabsatz: 80.374 MWh), Stromabsatz: 52.377 MWh
Stadtwerke Cottbus GmbH	Cottbus	Stromerzeugung & Fernwärme (74 MW _{el} / 120 MW _{th} unter Volllastbetrieb mit Spitzenlastkesseln)	HKW zur Erzeugung von Fernwärme und Strom im Kraft-Wärmekopplungs-Prozess (druckaufgeladener Wirbelschichtkessel zur Wärmeerzeugung mit angeschlossenen Rauchgas- und Dampfturbinen zur Stromerzeugung), jährlicher Bedarf an Wirbelschichtbraunkohle: ca. 130.000 - 180.000 t

Firma	Standort	Produkt	Verfahren
Vulkan Energiewirtschaft Oderbrücke GmbH	Eisenhüttenstadt	Versorgung der Stadt Eisenhüttenstadt, des Industriegebiets der ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH und Gewerbegebiete mit Strom und Wärme	Industriekraftwerk VEO, Kapazität: ca. 750 GWh Strom, ca. 130 GWh Produktionsdampf, ca. 245 GWh Fernwärme
Progroup Power 1 GmbH	Eisenhüttenstadt	Strom (bis zu 160 GWh), Prozessdampf (bis zu 1 Mio. t), Wärme (175 MW/h thermischer Leistung)	mit Ersatzbrennstoffen befeuertes Heizkraftwerk, das zur Versorgung des Papierwerks sowie anderen Industrie- und Gewerbekunden am Standort Eisenhüttenstadt mit Strom, Dampf/Wärme und sonstigen Energieträgern dient.
Stadtwerke Frankfurt Oder GmbH	Frankfurt (Oder)	Strom (jährlich erzeugte Strommenge: 170 GWh) & Fernwärme (jährlich erzeugte Fernwärmemenge: 280 GWh)	Heizkraftwerk (Gasturbine & Dampfturbine, Brennstoffe: Braunkohlestaub (72,5 MW, ca. 60.000 t/Jahr), Erdgas (78 MW, ca. 34 Mio. m ³ /Jahr)
envia THERM GmbH	Guben	Prozessdampf & Strom für Industriepark Guben	Heizkraftwerk zur Erzeugung von Prozessdampf, installierte Leistung: 1,8 MWel / 58 MWth
GASCADE Gastransport GmbH	Mallnow	Erdgas	Anzahl der Verdichter: 4, Verdichterleistung: 96,2 MW (3 x 25,4MW, 1 x 20,0 MW), max. zul. Betriebsdruck: 100 bar, Antriebsart: 3 Gasturbinen, 1 Dampfturbine
Kraftwerk Jänschwalde, LEAG	Peitz	Stromerzeugung, zusätzlich Wärmeerzeugung für den Standort sowie für Cottbus und Peitz	sechs Kraftwerksblöcke (A-F), 2 davon dienen als Reserve, Braunkohleverstromung
E.ON edis Contracting GmbH	Schönefeld	Strom, Wärme sowie Kälte und Notstromversorgung	installierte Leistung: 3.000 MW, Fernwärmeleistung: 6 x 58,2 MWth, Stromerzeugung 2020: 11,9 Mrd. kWh, Brennstoff: Braunkohle aus dem benachbarten Tagebau Jänschwalde, Mitverbrennung aufbereiteter Abfälle in den Kraftwerksblöcken A-D"
Stadtwerke Senftenberg GmbH	Senftenberg	Fernwärme	HKW (LEIPA Nord)
Spreerecycling GmbH & Co. KG	Schwarze Pumpe	Strom & Prozessdampf	BHKW auf Abfallbasis
Kraftwerk Schwarze Pumpe, LEAG	Schwarze Pumpe	Stromerzeugung, zusätzlich Fernwärmeerzeugung	Zwei Kraftwerksblöcke, Braunkohleverstromung

Firma	Standort	Produkt	Verfahren
		für Spremberg und Hoyerswerda	
Stadtwerke Strausberg GmbH	Strausberg	Strom- und Fernwärmeversorgung Strausberg	Heizkraftwerke auf Basis von Braunkohlestaub, Biogas und Erdgas

4. Grundlegende Möglichkeiten zur Dekarbonisierung

Stahlindustrie

Wasserstoff-Direktreduktion, TRL 6: Die 100%ige elektrolytische Wasserstoff-DRI-Route beinhaltet die Direktreduktion von Eisenerz unter ausschließlicher Verwendung von elektrolytischem Wasserstoffgas anstelle von Erdgas oder Kohle. Dabei wird Erz zu Direktreduktionspellets geformt, aber es gibt auch Varianten, bei denen Technologien wie Wirbelschichten zur Verwendung von minderwertigem Eisenerzfeinkorn eingesetzt werden [26].

Erdgas-Direktreduktion, TRL 9: Im Unterschied zur Wasserstoff-Direktreduktion erfolgt die Reduktion mit Gas aus fossilen Quellen; daher ist nur eine Reduktion auf ca. 60 % der CO₂-Emissionen der Hochofenroute möglich [26].

Elektrolyse, TRL 9 Bei der elektrolytischen Stahlerzeugung wird erneuerbarer Strom verwendet, um Eisenoxide in Eisen umzuwandeln. In einer Niedertemperatur-Elektrolyse (<110°C) erfolgt die Extraktion aus einer wässrigen Lösung [26].

Schmelzelektrolyse, TRL 2: Die Oxidschmelzelektrolyse ist ein elektrometallurgisches Verfahren zur direkten Herstellung von Flüssigmetall aus oxidischen Rohstoffen. Elektronen sind das Reduktionsmittel, und die Produkte der Reaktion sind reines Metall und Sauerstoff. Dieses Verfahren erfordert hohe Temperaturen von bis zu 2000 °C [26].

Plasma-Schmelzreduktion mit Wasserstoff, TRL 4-5: Bei der Schmelzreduktion mittels eines Wasserstoffplasmas wird Wasserstoff im Plasmazustand zur Reduktion von Eisenoxiden eingesetzt. Dies kann durch die Erzeugung eines Wasserstoffplasmalichtbogens zwischen einer Graphitelektrode und flüssigem Eisenoxid geschehen [26].

Elektrolichtbogenofen, TRL 9: Wird hauptsächlich zum Recycling von Stahlschrotten betrieben [6]. Durch den Einsatz von Schrott entfällt der Reduktionsschritt von Eisenerz zu Eisen, dadurch wird Energie und somit auch CO₂ eingespart; hohes CO₂-Einsparpotential bei Betrieb mit regenerativem Strom ist vorhanden. Allerdings können mit diesem Verfahren nur schwer sehr hochwertige Stähle erzeugt werden [26].

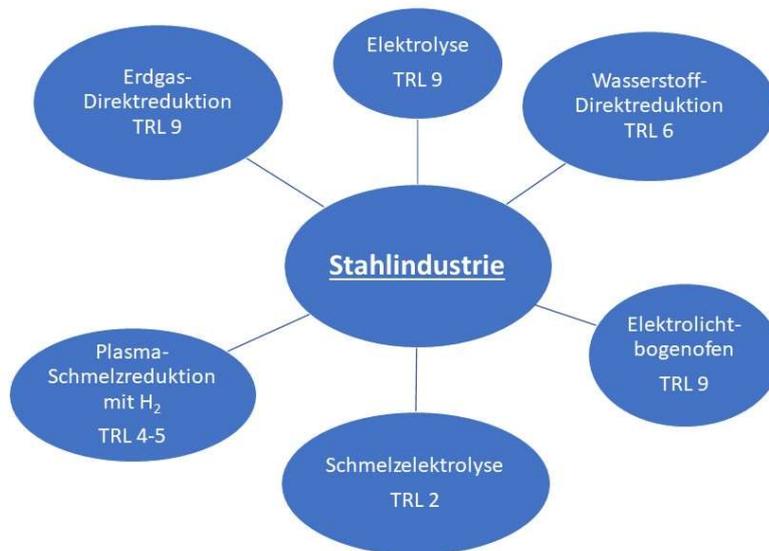


Abbildung 17: Dekarbonisierungsoptionen der Stahlindustrie.

Zementindustrie

Ersatz von fossilen Brennstoffen durch Wasserstoff, TRL 4: Ein Großteil der energiebedingten CO₂-Emissionen entsteht in den Öfen beim Brennen der Klinker durch die Verwendung von fossilen Brennstoffen. Werden die fossilen Brennstoffe durch Wasserstoff ersetzt können somit CO₂-Emissionen eingespart werden. Insgesamt muss für eine Emissionsreduktion die Produktion des Wasserstoffs auf Basis erneuerbaren Energien geschehen oder mit CCS gekoppelt werden [26].

Konzentrierende Solarenergie, TRL 6: Durch Spiegel wird die Sonneneinstrahlung konzentriert und Hochtemperaturwärme erzeugt. Diese kann für das Brennen der Klinker verwendet und somit fossile Brennstoffe eingespart werden. Vollständiger Ersatz von Brennstoffen jedoch nur in Gebieten mit ganzjährig hoher Sonneneinstrahlung möglich [26].

Kalziniertes Ton, TRL 9: Das Brennen der Klinker und die damit verbundenen prozess- sowie energiebedingten Emissionen sind maßgeblich für die CO₂-Emissionen bei der Zementerstellung. Durch den Einsatz von kalziniertem Ton kann der Klinkeranteil reduziert und somit Emissionen eingespart werden. Dieser muss zwar auch gebrannt werden, benötigt dafür aber deutlich geringere Temperaturen und setzt deutlich weniger prozessbedingtes CO₂ frei [26].

Calciumsilikat-Zement, TRL 8: Bei dieser Art von Zementen basiert die Abbindung und Aushärtung durch die Karbonisierung von Calciumoxid, wodurch nahezu die gesamten prozessbedingten CO₂-Emissionen beim Aushärten gebunden werden. Für die Anwendung sind jedoch hohe CO₂-Konzentrationen erforderlich, sodass diese CO₂-Vermeidungsoption nur zentral in der Vorfertigung von Bauteilen genutzt werden kann [26].

Elektrifizierte Klinkerherstellung, TRL 5: Anstelle der Verwendung von fossilen Brennstoffen wird der Heizprozess zum Brennen der Klinker elektrisch mit Hilfe von Plasma-Lichtbogen oder durch Widerstandsheizung realisiert. Für eine Emissionsreduktion muss die benötigte elektrische Energie jedoch auf Basis von erneuerbaren Energien erzeugt werden [26].

Effiziente Technologien zum Mahlen der Klinker, TRL 6-9: Berührungslose Mahlsysteme, Ultraschallzerkleinerung und Hochspannungsimpuls-Fragmentierung bieten die Möglichkeit, den Bedarf an elektrischer Energie zu reduzieren und flexibel zu steuern. Der Vorteil hier liegt aber im Wesentlichen auf einer Reduzierung der Anforderung an die Stromnetze [26].

Calcium-Looping, TRL 7: Die CO₂-Abscheidung ist eine der Schlüsseltechnologien zur Reduzierung der schwer zu vermeidenden prozessbedingten Emissionen. Beim Calcium-Looping wird CO₂ bei hoher Temperatur mittels zweier Reaktoren abgeschieden. Im ersten Reaktor wird Kalk als Sorptionsmittel zum Binden von CO₂ aus dem Gasstrom verwendet, wodurch Calciumcarbonat entsteht. Im zweiten Reaktor wird dieses unter hoher Temperatur regeneriert und als Produkte entstehen wieder Kalk und CO₂, welches dann gespeichert oder verwendet werden kann. Bei diesem Prozess ist ein geringerer Gesamtenergieverbrauch notwendig als bei anderen Abscheidungstechnologien. Des Weiteren eignet sich das Calcium-Looping auch für die Anwendung auf Rauchgase [26].

Oxy-Fueling, TRL 6: Beim Oxy-Fueling wird der Brennstoff mit nahezu reinem Sauerstoff anstelle von Luft verbrannt, wodurch das Rauchgas im Wesentlichen aus CO₂ und Wasserdampf besteht. Der Wasserdampf kann anschließend entwässert, das CO₂ abgeschieden und gespeichert oder verwendet werden [26].

Chemische Absorption, TRL 7: Diese erprobte und vergleichsweise kostengünstige Technologie zum Abscheiden von CO₂ aus dem Rauchgas basiert auf der Absorption von CO₂ mit Hilfe eines chemischen Lösungsmittels, in der Regel auf Basis von Aminen, und der anschließenden Regeneration. Wie bei allen Technologien zur Abscheidung von CO₂ muss jedoch die anschließende Speicherung oder Verwendung ermöglicht werden [26].

Recycling von unhydratisiertem Zement, TRL 9: Beim Aushärten des Zements kommen nach Schätzungen bis zu 50 % des Zements nicht in Kontakt mit Wasser und bleibt unhydratisiert. Neu entwickelte Betonzerkleinerungsanlagen ermöglichen die Rückgewinnung des nicht hydratisierten Zements aus Altbeton für die Wiederverwendung [26].

Direkte Abscheidung von CO₂, TRL 6: Wird Kalkstein als einer der Hauptbestandteile zur Klinkerherstellung in einem separaten Kalzinator indirekt erhitzt, kann reines CO₂ aus dem Kalkstein abgeschieden werden. Diese Prozessemissionen finden dann nicht mehr im Ofen statt und vermeiden die sonst notwendige Trennung von CO₂ aus dem Rauchgas [26].

Alkali-Aktivierte Bindemittel, TRL 9: Durch die Verwendung dieser Bindemittel kann der Einsatz von Zementklinker und damit die prozessbedingten Emissionen bei deren Herstellung vermieden werden. Das Einsparpotential hängt jedoch stark von den Materialien und den Verfahren zur Herstellung ab [26].

Zement aus nicht karbonhaltigen Calciumquellen, TRL 4: Portlandzement aus nicht karbonhaltigen Calciumquellen wie Calciumsilikatgestein, recyceltem Zement, oder anderen

calciumhaltigen Industrieabfällen erzeugt keine prozessbedingten Emissionen. Da durch entsprechende Herstellungsverfahren die gleiche chemische Zusammensetzung wie bei gewöhnlichem Portlandzement erreicht wird, gibt es keine Einschränkungen hinsichtlich der Anwendung und keine regulatorischen Hindernisse [26].

Alternative Brennstoffe, TRL 9: Durch den Einsatz von biomassebasierten Brennstoffen, Erdgas aber auch von Sekundärbrennstoffen wie Altöl, Altreifen, Tiermehl und Klärschlamm, können die energiebedingten CO₂-Emissionen im Vergleich zur Anwendung von Kohle bzw. Petrolkoks deutlich reduziert werden [27].

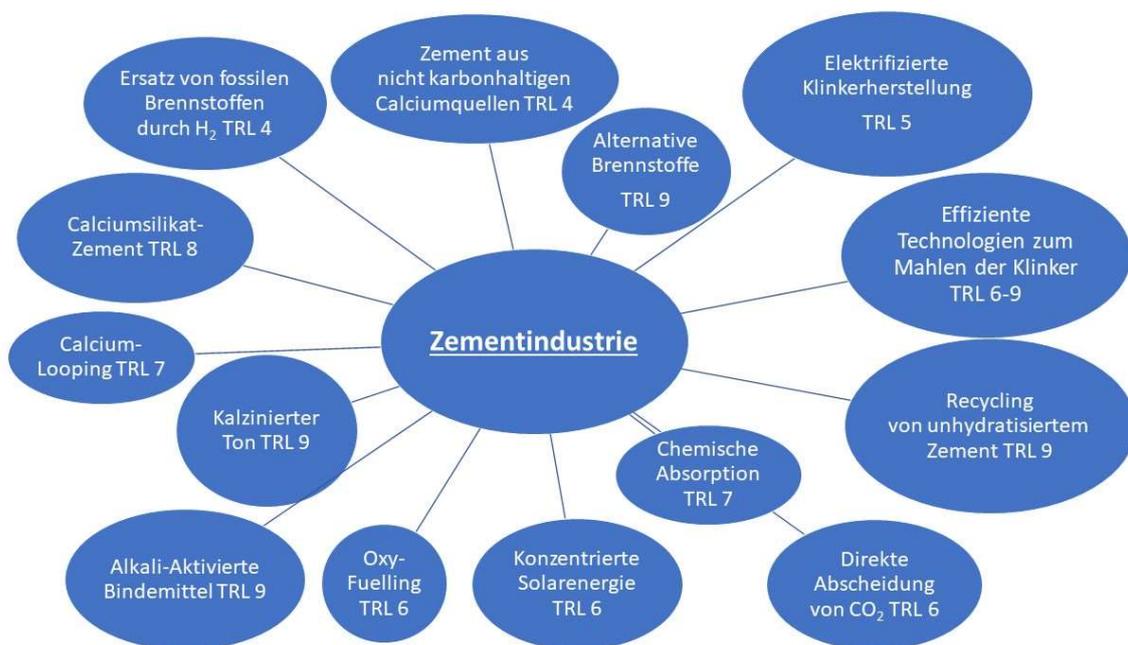


Abbildung 18: Dekarbonisierungsoptionen der Zementindustrie.

Abschließend ist festzuhalten, dass trotz der Vielzahl der zur Verfügung stehenden CO₂-Minderungsoptionen die schwierige Situation der Zementindustrie nicht übersehen werden darf, da die Optionen teilweise einen geringen technischen Reifegrad aufweisen und teilweise nur auf Teilaspekte der Prozesskette anwendbar sind.

Glasindustrie

Oxyfuel Schmelzwanne und Kombination mit CCU oder CCS, TRL 7: Bei der Oxyfuel Schmelzwanne wird der Brennstoff mit reinem Sauerstoff verbrannt, wobei das Abgas weitestgehend aus Wasserdampf und CO₂ besteht. Neben der effizienteren Verbrennung kann nach der Kondensation des Wasserdampfes das CO₂ effizient abgeschieden werden, so dass sich diese Technologie besonders in Verbindung mit Carbon Capture and Utilization (CCU) oder Carbon Capture and Storage (CCS) für eine vollständige Dekarbonisierung anbietet [28].

Vollelektrische Schmelzwanne, TRL 7: Über Elektroden wird die Schmelzenergie direkt in das Schmelzgut eingebracht. Durch die Tatsache, dass geschmolzenes Glas elektrisch leitfähig ist, findet durch den Widerstand eine Erhitzung statt. Für die Inbetriebnahme der Schmelzwanne sind konventionelle Brenner notwendig. Thermische Verluste können stark reduziert werden, da kein heißes Abgas wie bei der Verwendung fossiler Brennstoffe entsteht. Energiebedingte Emissionen können vollständig vermieden werden, so dass lediglich die prozessbedingten Emissionen verbleiben [28].

Hybridwannen, TRL 8: Bei dieser Technologie wird die benötigte thermische Energie durch elektrischen Strom als auch durch Brennstoffe bereitgestellt. Dadurch kann die Produktionskapazität im Vergleich zu einer vollelektrischen Schmelzwanne deutlich erhöht und die erhöhten Qualitätsanforderungen für bestimmte Glasprodukte eingehalten werden. Des Weiteren kann variabel auf die Verfügbarkeit der unterschiedlichen Energieträger reagiert werden [29].

Alternative Brennstoffe, TRL 4-9: Durch die Substitution fossiler Energieträger durch treibhausneutrale Gase wie Grüner Wasserstoff, synthetisches Methan oder Biogas kann eine deutliche Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen erreicht werden. Dabei können synthetisches Methan und Biogas ohne größere Anpassungen der Schmelzwanne eingesetzt werden. Die Verwendung von Wasserstoff erfordert Anpassungen an Brennern und Wanne auf Grund geänderten Strahlungsverhaltens der Flammen und höherem Wassergehalt im Abgas. Die Einsatzmöglichkeiten der treibhausneutralen Gase kann aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung und der Verbrennungseigenschaften eingeschränkt sein [28].

Kohlenstoffarme/-freie Rohstoffe, TRL 4-6: Eine Möglichkeit zur Reduzierung der prozessbedingten Emissionen, welche bis zu 30 % der Gesamtemissionen ausmachen können, bietet der Ersatz von kohlenstoffhaltigen Rohstoffen. Diese reagieren beim Erhitzen zu Oxiden und CO₂. So kann der Einsatz von vorkalzinierten Rohstoffen oder CO₂-freien Rohstoffen wie Natriumhydroxid die CO₂-Emissionen reduzieren. Die Anwendung alternativer Rohstoffe hängt jedoch stark von deren Verfügbarkeit und Kosten ab [28].

Erhöhung des Scherbenanteils durch Recycling, TRL 9: Scherben müssen für die Herstellung von Glas nur geschmolzen und nicht chemisch umgewandelt werden. Somit führt die Erhöhung des Scherbenanteils zur Reduktion der benötigten Schmelzenergie und der benötigten kohlenstoffhaltigen Rohstoffe. Dadurch können energie- als auch prozessbedingte CO₂-Emissionen reduziert werden. Aufgrund des in Deutschland bereits etablierten Recyclingsystems ist der Scherbenanteil bei bestimmten Glassorten jedoch schon sehr hoch. Eine weitere Steigerung würde einen Ausbau des Recyclingsystems und eine Erweiterung auf Glassorten wie Flach- oder Spezialglas erfordern [28].

Nutzung der Abwärme, TRL 4-8: Aufgrund der Tatsache, dass der wesentliche Energiebedarf bei der Glasindustrie auf die Prozesswärme zurückzuführen ist, stehen trotz steigender Effizienz immer noch große Mengen an Abwärme zur Verfügung. Diese kann durch Vorwärmung von Verbrennungsluft und Rohstoffen nutzbar gemacht werden. In jedem Fall sollten zunächst Maßnahmen für die Vermeidung von Abwärme getroffen werden, bevor die Nutzung der Abwärme betrachtet wird [29].

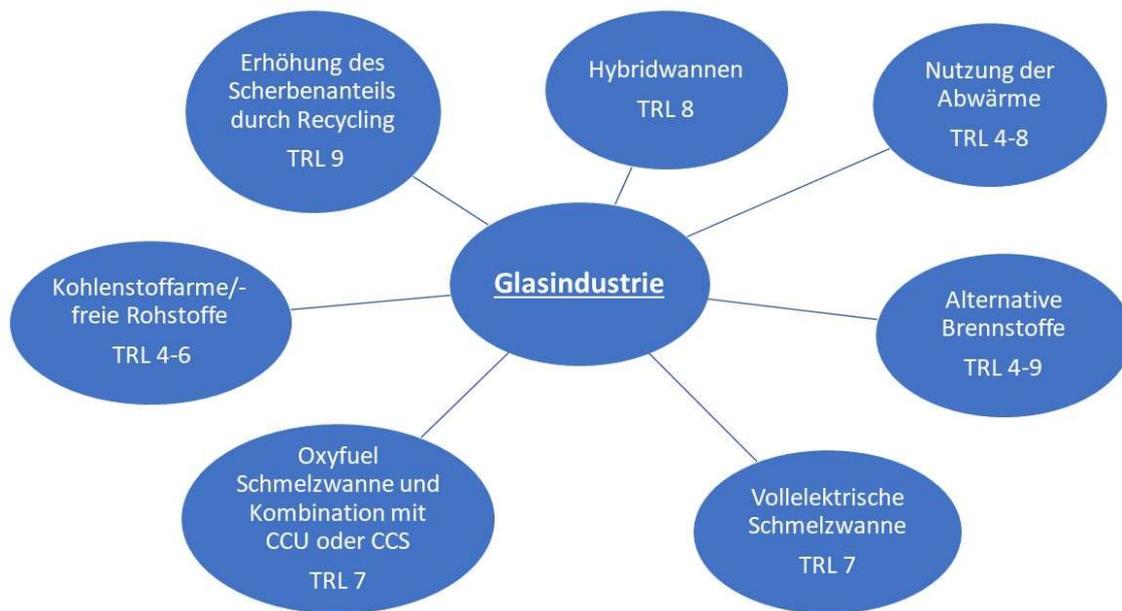


Abbildung 19: Dekarbonisierungsoptionen der Glasindustrie.

Papierindustrie

Die wichtigsten Technologien sind in der Grafik benannt und im Wesentlichen in zwei Gruppen von Dekarbonisierungsmaßnahmen unterteilt:

- Materialbasierte Maßnahmen
- Verwertung von Reststoffen
- Energetische Maßnahmen

Materialbasierte Dekarbonisierungsmaßnahmen

Kompressionsmahlung, TRL 5: Das Mahlen der Fasern erzeugt die notwendige Faseroberfläche für deren Bindung und sichert die Festigkeit des Papiers. Es beschädigt jedoch auch die Fasern, wodurch die Entwässerungseffizienz verringert wird. Durch die Verringerung der Scherkräfte bei der Druckmahlung wird die Faserschädigung reduziert und die Energieeffizienz verbessert [26].

Tiefeutektisches Lösungsmittel, TRL 4: Ein tiefeutektisches Lösungsmittel ist ein flüssiges Gemisch aus zwei Komponenten, das einen ungewöhnlich niedrigen Gefrierpunkt und eine hohe Ligninlöslichkeit aufweist. Sein Einsatz beim Zellstoffaufschluss könnte den Energiebedarf im Vergleich zu herkömmlichen chemischen Aufschlussverfahren erheblich senken, da es die Zellstoffherstellung bei niedrigen Temperaturen und atmosphärischem Druck ermöglicht. Die Technologie könnte die Emissionen bei der Zellstoffherstellung um 80 % reduzieren. Gleichzeitig kann der Verwendungsanteil der Nebenprodukte (bes. Lignin) deutlich erhöht werden [26].

Papierherstellung ohne Wasser, TRL 4: 70 % des Energiebedarfs bei der Papierherstellung entfallen auf den Einsatz von Wärme zum Trocknen. Das Papier verdankt seine Festigkeit den Wasserstoffbrückenbindungen, die beim Entzug von Wasser (dem Trocknen) entstehen. Beim Recycling werden diese Wasserstoffbrückenbindungen normalerweise durch Zugabe von Wasser gebrochen. Wenn das Wasser eliminiert werden kann, ist eine Trocknung nicht erforderlich. Für die Erzeugung der Brückenbindungen müssen alternative technologische Schritte gefunden werden [26]. Ein Beispiel ist der Einsatz von wässrigem Schaum [40].

Innovative Technologien zur mechanischen Entwässerung, TRL 5: Die Entfernung von 1 % mehr Wasser in der Pressenpartie (mechanische Entwässerung) führt zu einer Reduzierung der erforderlichen Trocknungsenergie um mindestens 3 %. Zu den innovativen mechanischen Entwässerungstechnologien gehören ultraschallunterstützte Entwässerung, vakuumgesteuertes Pressen, Impulsentwässerung, mechanische Verfahren, z. B. Verdrängerpressen oder Stahlbänder und luftunterstütztes Formen [26].

Verringerung des Wasserverbrauchs in der Leimpresse, TRL 4: Derzeit werden geleimte Papierprodukte getrocknet, bevor sie im Leimungsprozess wieder befeuchtet werden, was einen zweiten Trocknungsschritt erfordert. Eine Verringerung des Wassergehalts im Leimungsmittel, bei gleichzeitiger Erzielung der gewünschten niedrigen Viskosität, würde den Energieverbrauch der zweiten Trocknungsphase erheblich reduzieren [26].

Stoffliche Reststoffverwertung:

Vergasung und Aufwertung von Schwarzlauge, TRL 9: Schwarzlauge ist ein ligninreiches Nebenprodukt bei der Zelluloseherstellung. Bei diesem Verfahren wird Wasser unter überkritischen Bedingungen verwendet, um Kohlenstoffbindungen zu brechen und die Biopolymere des Lignins in kurzkettige Kohlenwasserstoffe aufzuspalten. Die Vergasung von Schwarzlauge verfügt über ein angemessenes Potenzial zur Herstellung kohlenstoffneutraler Brennstoffe. Allerdings sind die Kosten noch sehr hoch [26].

Ligninextraktion

Ausfällung und Ansäuerung, TRL 9: **oder mit organischen Lösungsmitteln**, TRL 5: Die Isolierung von Lignin aus Zellstoff könnte die Verwendung von Lignin für neue Industrieprodukte, wie z. B. Chemikalien, oder als Biobrennstoff ermöglichen. Diese Technologie kann zusätzliche Biomassequellen für andere Anwendungen erschließen, reduziert jedoch nicht direkt die Emissionen der Zellstoff- und Papierindustrie [26].

Pyrolyse von Nebenproduktströmen, TRL 9: Bei der Pyrolyse wird Biomasse in Abwesenheit von Sauerstoff erhitzt und zersetzt sich in Bioöl und Biokohle. Die Nebenströme der Zellstoff- und Papierverarbeitung können je nach Wassergehalt einer Pyrolyse unterzogen werden [26].

Energetische Dekarbonisierungsmaßnahmen

Der Einsatz von Grünem Wasserstoff und erneuerbaren Energien (EE-Strom) sind naheliegende Technologien auch für die Papierindustrie. Bioenergie wird in Form der Schwarzlauge, der aussortierten Fasern, sowie weiteren Reststoffen und Abfällen der Holzverarbeitung, der Zellstoffherstellung und des Altpapiers bereits effizient energetisch verwertet. Häufig sind

Papiermühlen mit entsprechenden Kraftwerken für **Ersatzbrennstoffe (EBS)** an einem Standort gebündelt. Der Einsatz von energieeffizienzsteigernden Managementsystemen, Wärmerückgewinnungsmaßnahmen und die Sektorenkopplung sind Stand der Technik. Diese Technologien müssen aber grundlegend neu auf die Emissionsreduktion oder -vermeidung ausgerichtet werden.

Weitere einzelne Technologien sind:

Elektrische Dampferzeuger oder **Luftherhitzung**, TRL 9: Dampferzeugung zum Trocknen mit Strom statt mit fossilen Brennstoffen ist eine der vielversprechendsten Technologien. Neben Dampf kann für die Trocknung auch mit Strom erhitze Luft verwendet werden. Ein Einsatz von Leistungsreglern kann den hohen Strombedarf steuern und negative Rückwirkungen auf das Stromnetz vermeiden [26].

Wärmepumpen, TRL 6: Der nachhaltige Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen in der Papierindustrie erfordert sowohl spezielle Wärmepumpen als auch die Anpassung des Papierherstellungsprozesses. Nachfolgende Dampfverdichtungsstufen sorgen für die in den verschiedenen Trocknungsabschnitten benötigten höheren Dampfdrücke [26]. Hier wird eine Kombination mit der elektrischen Dampferzeugung möglich und sinnvoll sein.

Dampferzeuger mit CCUS, TRL 5: CCUS kann auch im Zellstoff- und Papiersektor eingesetzt werden, um Emissionen aus den Dampfkesseln sowie aus anderen Nebenanlagen zu erfassen. Da schon große Mengen an Bioenergie eingesetzt werden, gibt es in dieser Branche eine hohe Kapazität für BECCS, die einen Ausgleich mit anderen CO₂-Emissionen ermöglicht [26].

Überhitzter Dampf, TRL 4: Die Trocknung in einer ausschließlich dampfbeheizten (luftfreien) Umgebung ermöglicht die vollständige Rückgewinnung von Wärmeenergie, die in nachfolgenden Prozessen oder oben genannten Technologien genutzt werden kann. Die Herausforderung besteht darin, das Dampfkondensationssystem mit einem Nasspapier-/ Wasserdampfsystem zu kombinieren, was fortschrittliche Dampfreinigungstechnologien und Lösungen erfordert, um das Austreten von Dampf aus dem System zu verhindern [26].



Abbildung 20: Dekarbonisierungsoptionen der Papierindustrie.

Chemische Industrie

Wasserstoff-Produktion

Die Spaltung von Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff kann durch verschiedene Verfahren erfolgen:

Alkalielektrolyse, TRL 9: Dabei wird eine wässrig-alkalische Lösung mittels Strom in seine Bestandteile gespalten, der an der Kathode entstehende Wasserstoff kann als Ausgangsstoff für weitere Produktion dienen [26].

PEM-Elektrolyse (Proton-Exchange-Membrane), TRL 9: Hierbei handelt es sich um eine weitere Redoxreaktion, bei der die beiden Teilreaktionen Oxidation und Reduktion räumlich getrennt ablaufen. Als Trennwand dient eine Polymermembran. Diese ist für die Protonen durchlässig, somit können diese zur Kathode gelangen um dort ein Elektron aufzunehmen und als Wasserstoff H_2 zu rekombinieren [26].

Methanpyrolyse, TRL 8: Bei dem Prozess wird Methan in gasförmigen Wasserstoff und festen Kohlenstoff gespalten, weitere Verfahren zur Wasserstoffherstellung über Methanpyrolyse sind in [41] zusammengefasst. Der Wasserstoff kann weiter für die Synthese von Ammoniak, Methanol, Rohölaufarbeitung verwendet werden [26].

Ammoniak-Produktion auf der Basis von Grünem Wasserstoff, TRL 8: Bei der Ammoniakherstellung wird im Haber-Bosch-Verfahren Wasserstoff direkt mit Stickstoff umgesetzt. Ist der eingesetzte Wasserstoff nachhaltig produziert („Grüner Wasserstoff“)

und nicht mehr länger aus der Spaltung von Erdgas gewonnen, ist damit auch die Ammoniakherstellung dekarbonisiert [26].

Methanol-Produktion durch Biomasse- und Abfallvergasung, TRL 8: Der Biomasse-Rohstoff wird in Synthesegas umgewandelt, dabei entstehen CO und Wasserstoff. Beide Reaktionsprodukte werden dann für die Methanolsynthese aufbereitet.

Eine alternative Methanolsyntheseroute verwendet das Abfallprodukt CO₂, das mit Grünem Wasserstoff zu Methanol umgesetzt wird [26].

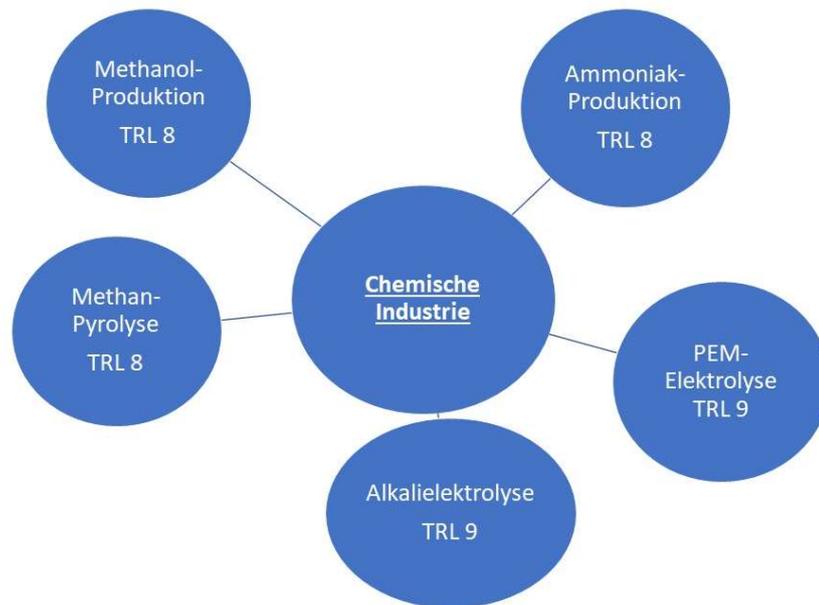


Abbildung 21: Dekarbonisierungsoptionen der Chemischen Industrie.

Getränke- und Lebensmittelindustrie

Entsprechend der Vielfalt von Produkten und Sparten sind die materialbasierten Dekarbonisierungsmaßnahmen, welche direkt in den Produktionsschritten den Ressourcenverbrauch reduzieren, von einer hier nicht beschreibbaren Bandbreite. Als Beispiel sei das folgende genannt:

Neue Produkte basierend auf pflanzlichen Rohstoffen (Vegetarische und Vegane Produkte), TRL 3-9: Die CO₂-Emission vegetarischer Produkte ist etwa um ein Drittel geringer als entsprechender tierischer Produkte [45].

CO₂ wird als Konservierungsstoff verwendet um die Haltbarkeit der Lebensmittel zu erhöhen. Es wird auch als Hilfsstoff verwendet: bspw. als Kohlensäurelieferant oder zum Entkoffeinieren von Kaffee [49].

Energetische Dekarbonisierungsmaßnahmen sind den oben z. B. bei der Papierindustrie genannten sehr ähnlich. Ein hoher Anteil der direkten CO₂-Emission wird durch den Einsatz

fossiler Brennstoffe in Blockheizkraftwerken verursacht. Hier ist die Erzeugung von Prozesswärme im niedrigen und mittleren Temperaturbereich meist entscheidender als die Stromerzeugung und so wird – wie bereits beschrieben – ein hoher Ausnutzungsgrad des fossilen Brennstoffes erreicht. Die Prozesswärme wird in Form von Dampf, Warmwasser und Raumwärme erzeugt. Sie wird vor allem für das Trocknen, Reinigen, Backen, Kochen, Sterilisieren, Pasteurisieren genutzt [50], [51].

Bezug von Strom aus Erneuerbaren Energien, TRL 9: An erster Stelle wird diese Maßnahme stehen. Die Firmen können hier mit der Errichtung von entsprechenden Anlagen im Produktionsstandort (z. B. Nutzung der Dachflächen für PV oder Solarthermie) oder auch in seiner Nähe die Energiewende im zweifachen Sinn beschleunigen und damit auch die Stromnetze entlasten. Mit diesen Maßnahmen würden die entsprechenden indirekten CO₂-Emissionen (Scope 2) vermieden. In diesen Komplex zählt die mögliche Erneuerung der Stromverbraucher, z. B. der Einsatz energieeffizienter Beleuchtungssysteme oder auch die Erneuerung von E-Motoren – basierend auf einer Analyse des Produktlebenszyklus.

Elektrische Dampferzeuger oder Lufterhitzung, TRL 9 – wo möglich in Kombination mit

Wärmepumpen, TRL 6: Hiermit kann der gesamte Prozesswärmebedarf für die meisten oben genannten Prozesse gedeckt werden. Eine Kombination der Anlage mit der Kälteerzeugung und der Integration von **thermischen Speichern**, TRL 5-8, ist produktions- und standortspezifisch zu prüfen. Die Nutzung der Abwärme als Wärmequelle führt zu einer besonders hohen Steigerung der Energieeffizienz.

Wasserkreislaufwirtschaft, TRL 9: Mit Reinigungsanlagen lässt sich der Wasserverbrauch deutlich reduzieren und eine entsprechende Wasserkreislauf-Wirtschaft aufbauen. Diese kann oft mit der Abwärmenutzung gekoppelt werden, da das Abwasser oft Temperaturen deutlich über der Umgebungstemperatur aufweist [38].

Logistik, TRL 9: Die internationalen und nationalen Transporte von Obst, Gemüse, Getreide, Fleisch usw. verursachen einen CO₂-Ausstoß von rund drei Gigatonnen, dies entspricht rund 30 Prozent der gesamten Emissionen der Nahrungsproduktion ohne die Landnutzung. Die Stärkung der Regionalität der gesamten Branche – sowohl bezüglich der von Produktvermarktung als auch der Rohstoffversorgung kann diese Emission deutlich reduzieren. Dazu gehört auch der Einsatz von Transportmitteln, welche ebenfalls Grüne Energie verwenden und die Verwendung von ressourcenschonender Verpackung, in Kombination mit Recycling- und Pfandsystemen.

Abfallvermeidung, TRL 9: Eine besondere Rolle – auch unter ethischen Aspekten – kommt der Vermeidung von Lebensmittelverlusten und der Lebensmittelverschwendung zu. Hier muss die gesamte Kette vom Feld bis auf den Teller beachten. Die Lebensmittelabfälle in Höhe von 6,1 Mt (2015) treten hälftig bei der Ernte, Verarbeitung und Lagerung sowie beim Endverbraucher auf [42].

Um die Dekarbonisierungsziele in der Lebensmittelindustrie (bzw. der gesamten Nahrungsmittelwirtschaft) zu erreichen, wird ein entscheidender Schwerpunkt die Analyse der Energie- und Stoffströme der Produktion sein und darauf aufbauend die Erarbeitung von zielgerichteten Maßnahmen und Transformationsschritten. Es zeigt sich hierbei deutlich, dass bei den Unternehmen nicht die „eine“ Dekarbonisierungsstrategie verfolgt werden kann. Nur eine individuelle auf die spezifische Produktion ausgerichtete und die firmenspezifischen und örtlichen Randbedingungen beachtende Strategie wird zielführend sein. Die hier beschriebenen Technologien sollen helfen, diese basierend auf allgemeinen Grundsätzen effizient zu erarbeiten. Zwei der wichtigsten Aspekte sind zum einen der Umbau der Energiebereitstellung unter maximaler Nutzung der Abwärme (Energieeffizienz) und zum anderen der Umgang mit Bioreststoffen sowie der Abfallverwertung:

Bioreststoffe sind als Ressource zu betrachten und sollten zu anderen Produkten verarbeitet werden. Hier muss eventuell ein Down-Cycling akzeptiert werden. Stofflich nicht verwertbare Reststoffe können z. B. in **Bioraffinerien**, TRL 7-9, zu Grundstoffen der chemischen Industrie verarbeitet werden. Danach kann und soll eine energetische Verwertung erfolgen. [43] zeigt anschaulich ein Beispiel, in dem genau diese technologische Reihenfolge realisiert wurde.

Die eingesetzte Prozesswärme verlässt die Anlage in Form von Abwärme. Diese gilt es so effizient wie möglich wieder der Produktion zuzuführen. In der Vergangenheit haben die geringen Energiepreise es zugelassen, dass die Abwärmenutzung nicht zwingend erforderlich war. Hauptaugenmerk war die Produktion in der angestrebten (hohen) Qualität und Menge.

Ähnlich wie bei den Reststoffen gilt auch hier eine Kaskadierung: Wenn möglich sollte die Abwärme direkt im Produktionsprozess wiederverwendet werden. Wärmepumpen können hier ein entscheidender technologischer Baustein werden und die Produktion von Dampf im notwendigen Temperaturbereich übernehmen. **Wärmespeicher, die Kälteerzeugung** und die Verwendung von **Kältespeichern** sind weitere ergänzende Bausteine. Abwärme, die nicht mehr im Kernprozess der Produktion genutzt werden kann, sollte in den Nebenprozessen und für die Heizung der Gebäude lokal genutzt werden. Ein nächster Schritt kann die Abgabe der Wärme für **Fern- und Nahwärmenetze**, TRL 9, sein.

In diesem Wirtschaftszweig wird die Verantwortung in Bezug auf die Ressourcenschonung besonders deutlich. Es geht nicht nur um den anstehenden Umbau der Wirtschaft, sondern gleichzeitig um den schonenden Umgang mit den natürlichen Ressourcen (Luft, Land, Wasser).



Abbildung 22: Dekarbonisierungsoptionen der Getränke- und Lebensmittelindustrie

5. Fragebogen zu den Dekarbonisierungsmaßnahmen und die Auswertung

Überblick zum Fragebogen

Der Fragebogen wurde als Teil dieser Studie entworfen und im April 2023 an 80 Unternehmen per E-Mail versendet. Zur Erhöhung der Rückläuferquote wurden einige Firmen danach erneut angeschrieben oder telefonisch kontaktiert. Die Kurzversion des Fragebogens sowie die grafische Auswertung der erhaltenen Antworten ist im Anhang A „Dekarbonisierungsfragebogen“ zu finden. Auf die versendete Umfrage haben 16 Firmen geantwortet, mit 16 weiteren Firmen wurden Interviews geführt. Damit beträgt die Rücklaufquote 32 Unternehmen was 40 % der angefragten Unternehmen entspricht. Nach Branchen aufgeteilt liegt der Rücklauf für Stahl- und metallverarbeitende Industrie, Getränke- und Lebensmittelindustrie und den Energiesektor bei 20 %, für Glasindustrie, Chemische Industrie und Raffinerien bei 10 % und für die sonstigen Industrien bei 20 % (unter sonstigen Industrien werden kleine Dienstleisterbetriebe wie Reparaturwerkstatt, Reinigung oder Waschanlage geführt).

Die Größe der Betriebe lässt sich nach [46] in vier Kategorien unterteilen: Die erste Kategorie mit 9 % bilden die sehr kleinen KMU's (unter 9 Mitarbeiter), zweite Kategorie mit 44 % bilden die kleinen KMU's (unter 49 Mitarbeiter), die dritte Kategorie mit 31 % sind die KMU's (unter 249 Mitarbeiter) und die letzte Kategorie mit 19 % sind die Großbetriebe (über 250 Mitarbeiter).

Fragebogenauswertung

Der Hauptteil der Befragung bestand aus einem Fragenkomplex zu Dekarbonisierungsmaßnahmen, Energieversorgung, Wasserstoffnutzung, Recycling sowie möglichen Hemmnissen bei deren Umsetzung bzw. Anwendung.

Aus den erhaltenen Antworten lässt sich die Priorität der Dekarbonisierungsmaßnahmen aus Sicht der befragten Firmen wie folgt ableiten (Abb. 23, Frage 5): Die Wärmerückgewinnung (ca. 80 %) erhält nicht überraschend die größte Relevanz, da dies eine Effizienzmaßnahme ist, die eine gemeinsame Herausforderung vieler Branchen darstellt.

Die hohe Bedeutung der „Grünen“ Brennstoffe (ca. 70 %), wie Wasserstoff und Biomasse korreliert mit dem Bedarf an Wärme auf hohem Temperaturniveau ($T > 1000$ Celsius) vieler Branchen, ebenso wie mit der stofflichen Nutzung von Kohlenstoff aus Biomasse und grünem Wasserstoff mindestens für die Stahl- und Chemieindustrie.

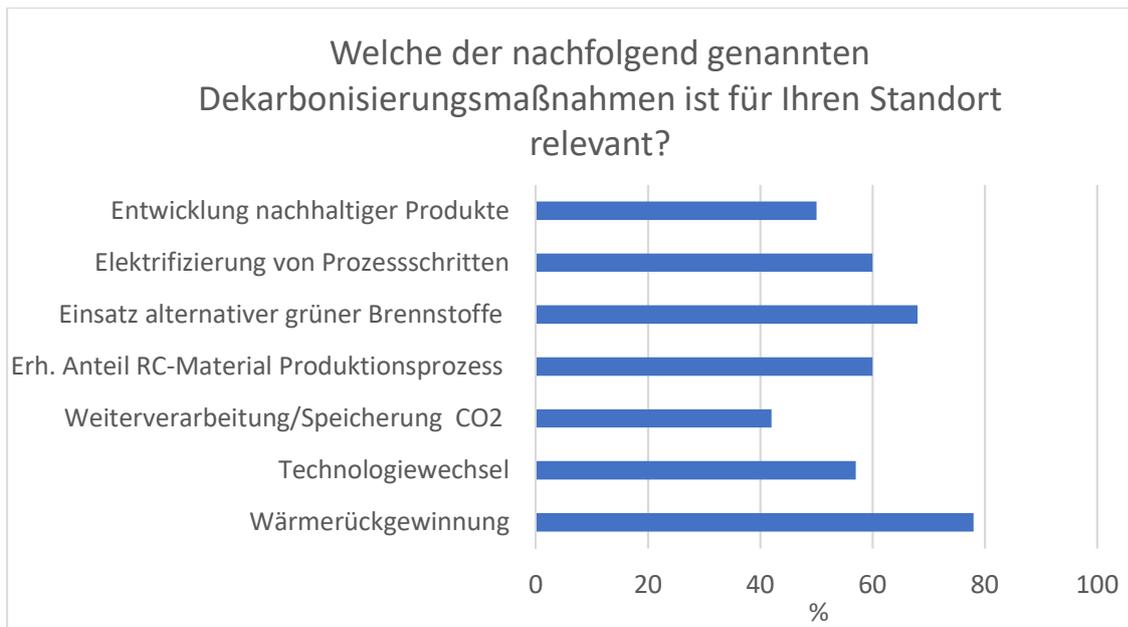


Abbildung 23: Antwort auf die Frage 5.

Weiter in der Prioritätsliste stehen Elektrifizierung energieintensiver Prozessschritte, Erhöhung des Anteils an Recyclingmaterial im Produktionsprozess (je 60 %) und Technologiewechsel (ca. 55 %). Die Speicherung und Weiterverarbeitung von CO₂ hat bisher eine geringe Relevanz (ca. 40 %), da die Betriebe in erster Linie die Vermeidung von CO₂ anstreben. Dennoch sind die Speicherung und Weiterverarbeitung für all die Branchen interessant, in denen eine Vermeidung nicht möglich ist, z. B. in der Zement- und Glasindustrie.

Auch ca. 60 % der Betriebe hält eine Voll- oder Teilelektrifizierung für möglich, siehe Abbildung 23. Als limitierende Faktoren werden hohe Investitionskosten, fehlende Planungssicherheit, unzureichende Anschlusskapazität und fehlende Energieinfrastruktur angegeben, Abbildung 28. Die Elektrifizierung der industriellen Produktion kann durch gezielte Sensibilisierung der Fachkräfte (z. B. Schulungen) an Relevanz gewinnen. Die Politik kann über gezielte Förderprogramme wie die „Bundesregelung der Transformationstechnologie“ des BMWK's den Ausbau der Elektrifizierung beschleunigen [44].

Die Streuung der Antworten bezüglich der sieben angefragten Maßnahmen ist (vielleicht abgesehen von den beiden Extremwerten) ist relativ gering. Dies unterstreicht die These, dass nur ein ganzes Bündel von Transitionsschritten zum Ziel führen wird. Dies wird eine exakte Planung und konzentrierte Umsetzung in dem gesetzlich vorgegebenem engen Zeitrahmen erfordern.

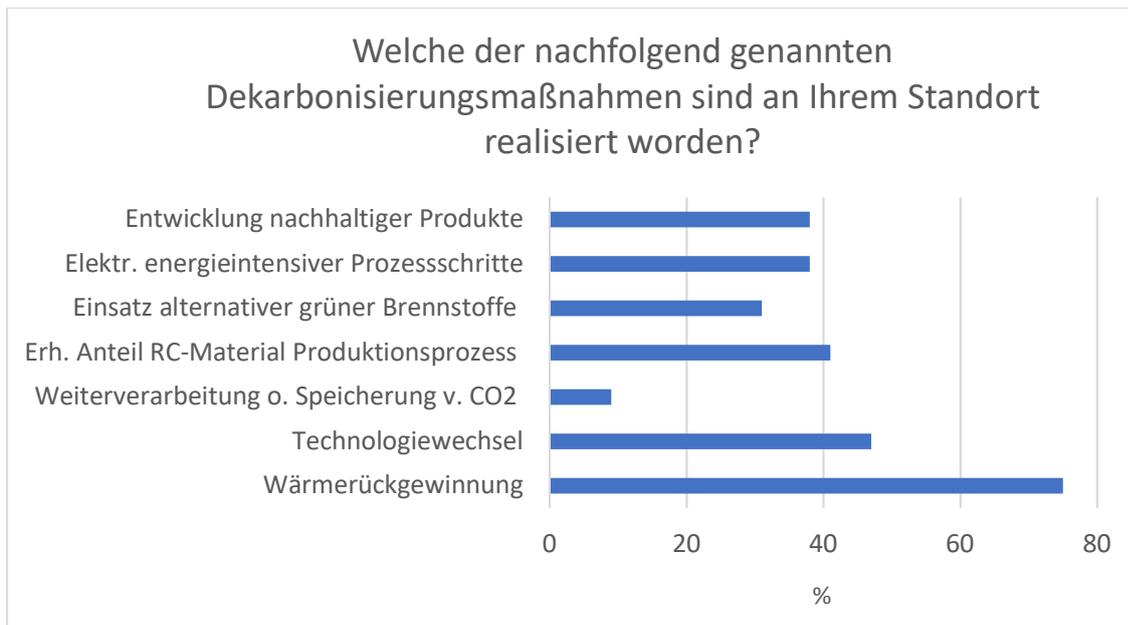


Abbildung 24: Antwort auf die Frage 6.

Die Auswertung bereits erfolgter Dekarbonisierungsmaßnahmen (Abbildung 24, Frage 6) ergibt, dass die energetische Optimierung weitestgehend stattgefunden hat und das Potential der bisher verwendeten Technologien ausgereizt wurde. Die Wärmerückgewinnung ist die am häufigsten umgesetzte Dekarbonisierungsmaßnahme (ca. 75 %), da diese bei hohem TRL kostenoptimal in vielen Betrieben in kurzer Zeit implementiert werden kann. Der Technologiewechsel (ca. 50 %) folgt an zweiter Stelle, d. h. nach eigenen Angaben der Betriebe hat mehr als die Hälfte einen Technologiewechsel vollzogen. Daraus folgt aber andererseits, dass die Hälfte der Betriebe ihn noch vor sich hat; diese Situation spiegelt das hohe Risiko wider, das mit einem Technologiewechsel verbunden ist.

Die durchgeführten Technologiewechsel sind wahrscheinlich von überschaubarem technischem Risiko mit einem hohen TRL und einem beherrschbaren Investitionsaufwand. Wir erwarten, dass die ausstehenden 50 % der Technologiewechsel mit größeren Herausforderungen verbunden sind.

Weiter unten in der Prioritätenliste stehen Maßnahmen wie Erhöhung des Anteils an Recyclingmaterial, Elektrifizierung und Entwicklung nachhaltiger Produkte (je ca. 40 %). Hier besteht noch Handlungsbedarf bezüglich Akzeptanz und auch Verfügbarkeit dieser Technologien. Weiterhin bestehen Unsicherheiten zur Entwicklung des Elektrizitätspreises relativ zum Gaspreis. Der Einsatz alternativer Grüner Brennstoffe (30 %) wird mit der steigenden Verfügbarkeit, dem Ausbau der Transport- und Infrastrukturwege weiter steigen. Der größte Handlungsbedarf liegt bei der Weiterverarbeitung oder Speicherung von CO₂ (10 %), diese Technologie erfordert nicht nur weiteren Ausbau der Infrastruktur, sondern auch eine langfristige politische Strategie im Umgang mit unvermeidbaren CO₂-Emissionen.

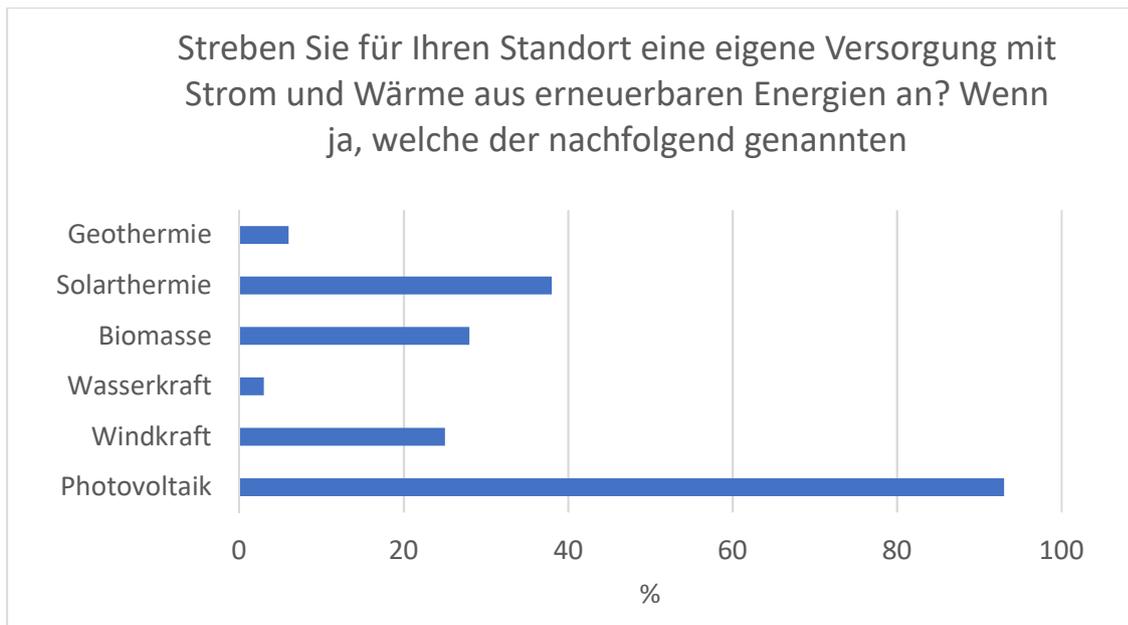


Abbildung 25: Antwort auf die Frage 7.

Die Versorgung mit regenerativ erzeugtem Strom und Wärme (Abb. 25, Frage 7) wird bei über 90 % der befragten Betriebe angestrebt, daher ist der Ausbau von PV- und Windanlagen ein guter und richtiger Weg. Hierbei ist zu beachten, dass die steigende Nachfrage nach regenerativer Energie zu hohen Anforderungen an das Stromverteilnetz wie auch an verschiedene Speichertechnologien führen wird.

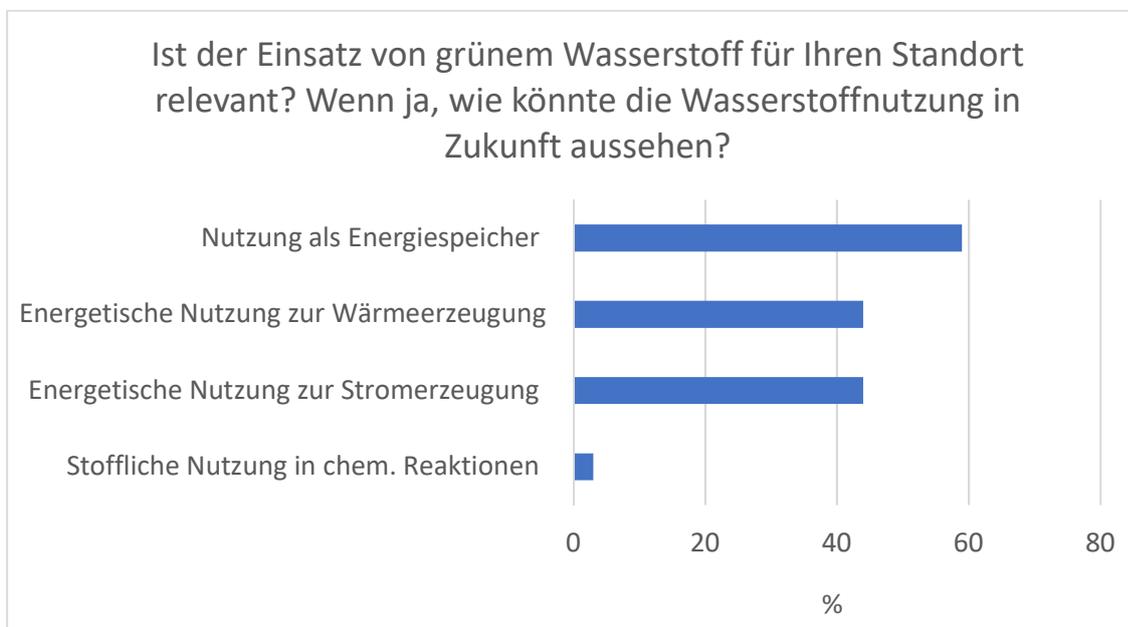


Abbildung 26: Antwort auf die Frage 9.

Der Einsatz von Grünem Wasserstoff (Abb. 26, Frage 9) zur Erzeugung von Wärme und/oder Strom ist für je ca. 40 % der Betriebe interessant. Diese Zurückhaltung liegt zu einem in der knappen Verfügbarkeit wie auch an der fehlenden Versorgungsinfrastruktur mit Grünem Wasserstoff. Etwa 60 % der Betriebe, die geantwortet haben, sehen eine Nutzung von Wasserstoff als Energiespeicher notwendig für die Anwendung im Strom oder Wärmebereich.

Dabei sind die hohen Investitionskosten, fehlende Planungssicherheit und fehlende politische Rahmenbedingungen die drei größten Hürden des Übergangs zu erneuerbaren Energien, die fast von allen Befragten genannt werden (Abb. 27, Frage 8). Hier besteht noch Handlungsbedarf seitens der Politik, durch Schaffung von entsprechenden wirtschaftlichen Anreizen und klaren gesetzlichen Vorgaben mit festgelegtem Zeithorizont.

Überraschend ist, dass das Recycling wenig Relevanz (16 %) bekommt. Die Akzeptanz für das Recycling kann durch die Aufklärung der Bedeutung von Sekundärrohstoffen und über die Erstellung von Datenbanken für Sekundärrohstoffe gesteigert werden.

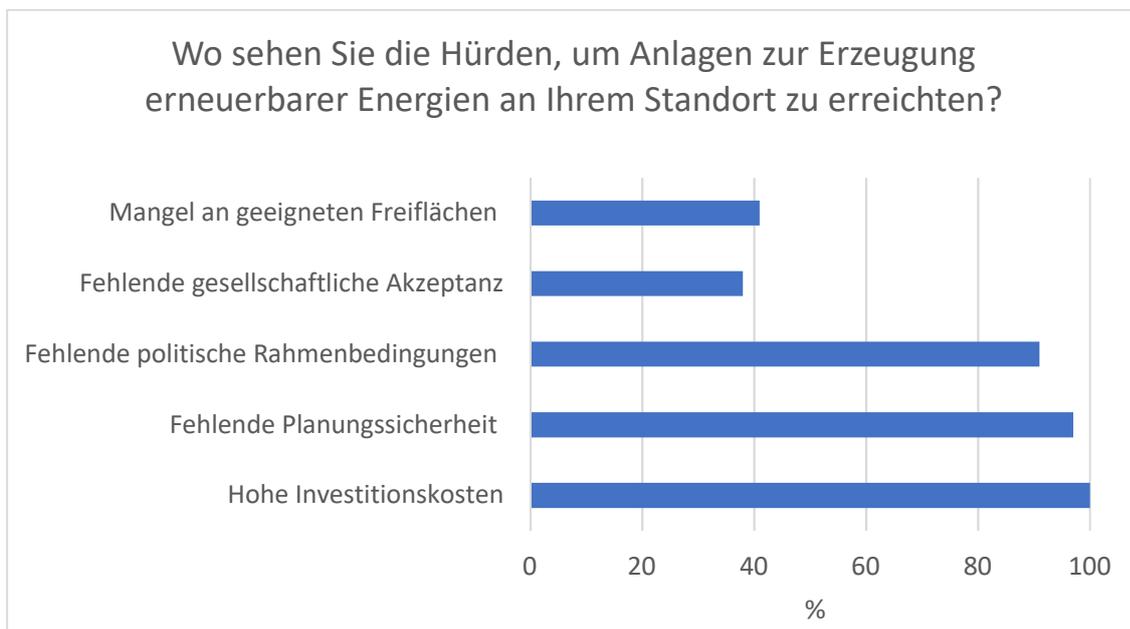


Abbildung 27: Antwort auf die Frage 8.

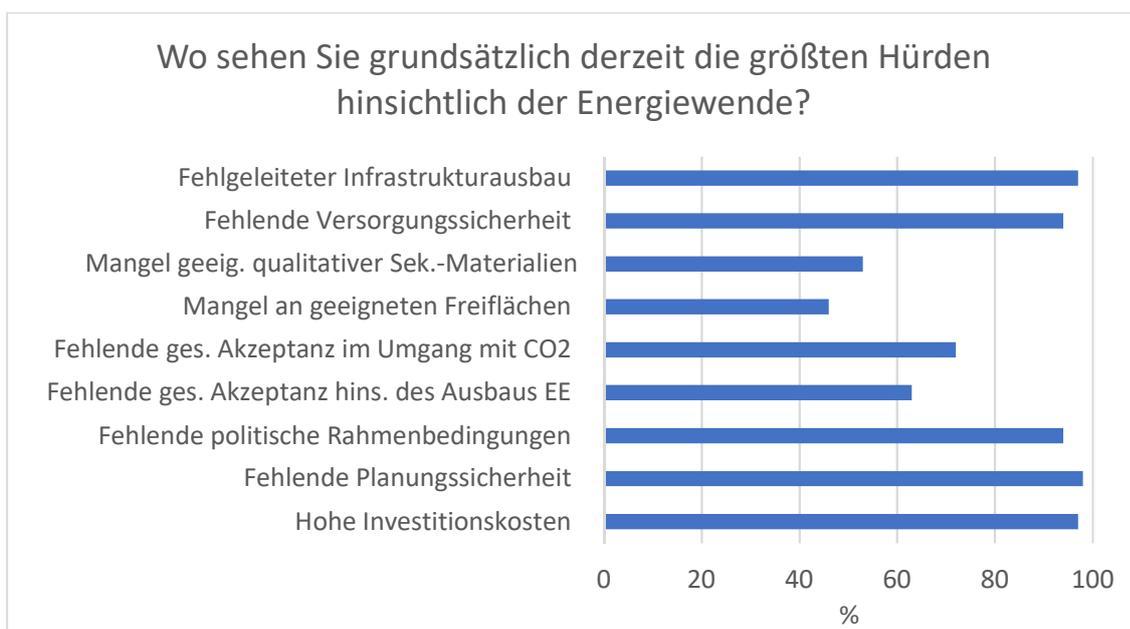


Abbildung 28: Antwort auf die Frage 13.

Zusätzlich zu den bereits aufgezählten limitierenden Faktoren für eine Dekarbonisierung (hohe Investitionskosten, fehlende Planungssicherheit und fehlende politische Rahmenbedingungen) geben viele Betriebe in Bezug auf Hemmnisse der Energiewende (Abb. 29, Frage 14) noch den fehlenden Infrastrukturausbau, fehlende Versorgungssicherheit sowie fehlende gesellschaftliche Akzeptanz hinsichtlich des Umgangs mit CO₂ und dem Ausbau erneuerbarer Energien.

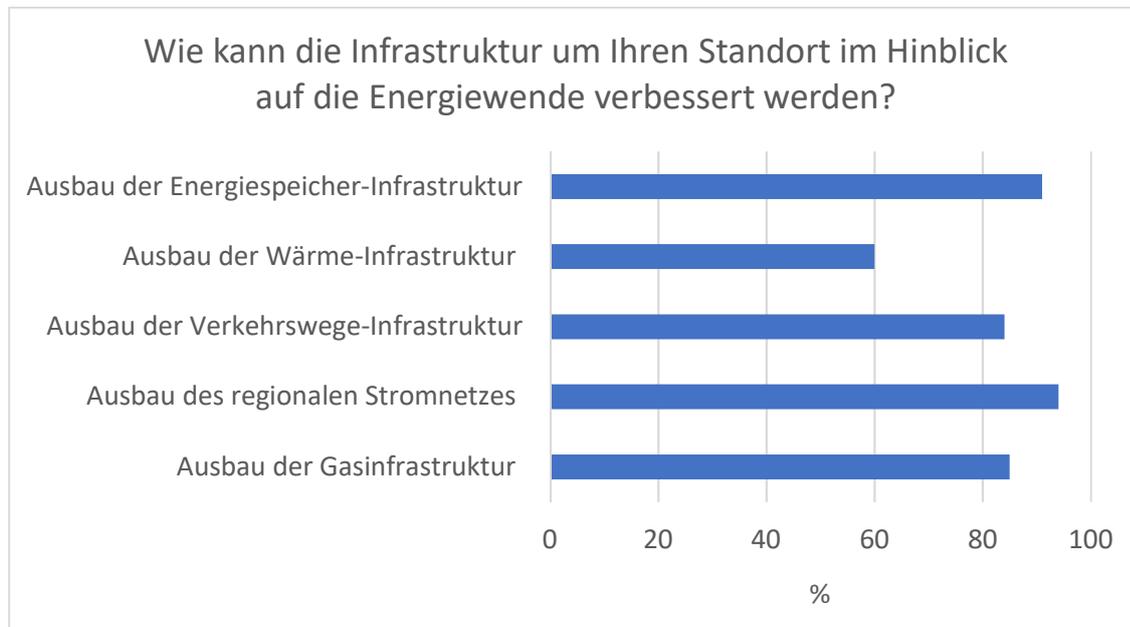


Abbildung 29: Antwort auf die Frage 14.

Spezifisch zum Infrastrukturausbau an den jeweiligen Standorten (Abb. 29, Frage 14) können aus Sicht der Betriebe durch Ausbau des Strom- und Gasnetzes (80 – 90 %) wie der Speicher-Infrastruktur (90 %) günstige Voraussetzungen für die (weitere) Transformation geschaffen werden.

Im weiteren Fragenkomplex werden sowohl standort- wie branchenspezifischen Bereiche näher beleuchtet, hierbei geht es um die Stahl- und metallverarbeitende Industrie, um die chemische Industrie und Raffinerien, um die Getränke- und Lebensmittelindustrie und um den Energiesektor.

Die Zement- und Baustoffindustrie, Glasindustrie, Papier- und Holzindustrie haben keine Antworten auf die für ihre Branchen spezifischen Fragen zurückgesendet.

Stahlindustrie

Die metallverarbeitende Industrie forciert den Übergang von konventionellen kohlenstoffhaltigen zu den kohlenstofffreien Reduktionsmitteln. Neben dem allgemein anerkannten Transformationspfad zu Direktreduktion von Eisenerz mit Grünem Wasserstoff wird der vermehrte Einsatz von Elektrolichtbogenöfen (Elektrifizierung des Schmelzprozesses)

ebenfalls als Priorität benannt. Die Kombination mit einem erhöhten Schrottanteil der zu schmelzenden Chargen ist naheliegend und wird ebenfalls als wichtige Option zur CO₂-Minderung betrachtet (25 %). Als technische Randbedingung ist hier allerdings auch der Zusammenhang zwischen der Qualität des erzeugten Stahls und der Höhe des Schrottanteils zu beachten.

Leider blieb im Rücklauf offen, ob bezüglich der Direktreduktion nur Grüner Wasserstoff betrachtet wird. Da die Frage nach der „Farbe“ des Wasserstoffs (CO₂-Intensität seiner Herstellung) unbeantwortet blieb, kann im Rahmen der Studie keine Aussage gemacht werden, ob und welches Übergangsszenario verfolgt wird, bis Grüner Wasserstoff in ausreichender Menge zur Verfügung stehen wird. Ebenso blieb die Frage nach Energieeinsparmaßnahmen über mögliche Wärmerückgewinnung offen; auch hier steht diese Branche vor Änderungen: Effizientes Wärmemanagement in Verbindung mit dem neuen Kernprozess der Wasserstoff-Direktreduktion kann einen deutlichen Beitrag zur Effizienzsteigerung leisten.

Chemische Industrie

Der Fokus aktueller Dekarbonisierungsmaßnahmen liegt auf der nachhaltigen Prozesswärme und Dampferzeugung sowie der Dekarbonisierung des Energiebezugs. Typisch für die Branche ist der wärmegeführte Betrieb zur Dampferzeugung in eigenen Kraftwerken mit Strom, der bisher meist ein Nebenprodukt war. Daher ist auch die Benennung von vermehrter Elektrifizierung als wichtige Dekarbonisierungs- und Effizienzmaßnahme nachvollziehbar.

Die Umstellung auf Grünen Wasserstoff zur stofflichen wie energetischen Nutzung wird ebenso häufig als alternativer Brennstoff genannt wie die Beimischung von Wasserstoff zu Erdgas.

Energiesektor

Mögliche CO₂-Einsparungen über Erhöhung der Systemeffizienz bei der Erzeugung von Strom und Wärme haben in den Antworten die höchste Priorität. Gefolgt von den beiden Themen Kraft-Wärme-Kopplung als Effizienztechnologie und Power-to-X als Speichertechnologie; diese Themen werden jeweils in 2/3 der Rückläufer als wichtigstes Thema benannt. Das korreliert mit der häufig genannten Abwärmenutzung zu Steigerung der Effizienz. Als noch wichtiger wird jedoch richtigerweise Ausbau und Modernisierung der Verteilnetze gesehen, zur Vermeidung von Netzabregelung oder Zwischenspeicherung gekoppelt mit anschließender Rückverstromung.

Bezüglich F&E-Bedarf ist aus der häufigen Nennung von Power-to-X klar, dass die Herausforderung der Speicherung von Strom aus fluktuierenden regenerativen Quellen

erkannt wurde und Lösungen gesucht werden. Dazu passend ist die Aussage, dass Forschungsbedarf sowohl bei Sektorenkopplung als auch bei Energiespeichern besteht.

Getränke- und Lebensmittelindustrie

Als aktuelle Dekarbonisierungsmaßnahmen werden neben der Erhöhung des Anteils regenerativer Energien im Produktionsprozess und nachhaltige Verpackung (mit jeweils ca. 75 %) der Einsatz neuartiger Hochtemperatur-Wärmepumpen (50 %) genannt. Pfandsysteme fallen mit 25 % als Maßnahme dagegen deutlich ab. Ursache hierfür könnte sein, dass Pfandsysteme schon entsprechend etabliert sind und im Umfang nur noch moderat gesteigert werden könnten.

Im Bereich Energieeinsparmaßnahmen werden Energiespeicher sehr häufig als geeignete Option genannt. Dies ist konsistent mit den Antworten zum Forschungsbedarf – hier wird Speichertechnologie als genauso wichtig wie Automatisierung und Prozesssteuerung gesehen.

6. Dekarbonisierungsmaßnahmen

Das DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse als ausführende Forschungsstelle dieser Studie hat eine große Anzahl von Firmen kontaktiert und mit unterschiedlicher Modelltiefe deren Produktionsprozesse modelliert. Ziel war es, die wesentlichen Energie- und Stoffströme zu erfassen und aus der energetischen Betrachtung und Auswertung der Modellergebnisse gemeinsam mit den Produktionsverantwortlichen Dekarbonisierungsstrategien oder auch einzelne Maßnahmen zu identifizieren. Es handelt sich hierbei meist um deutsche Firmen, oft mit einem regionalen Fokus auf die Lausitz und damit sind diese Ergebnisse auch für ostbrandenburgische Firmen relevant. Die Ergebnisse aus den Branchen Papierproduktion, Glasherstellung und aus der Automobilzuliefererindustrie stellen wir hier vor.

Die Energiewende bzw. Dekarbonisierung kann nur erfolgreich umgesetzt werden, wenn die Firmen für sich entsprechende „Umbaupläne“ spezifisch für ihre Produktion erarbeiten, wobei zusätzlich standortspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden müssen. Dabei gilt wie auch schon bei Modernisierungsmaßnahmen in der Vergangenheit: Ein Kernelement werden immer technologische Änderungen sein, welche zu einer Effizienzsteigerung bzw. Senkung des Energie- bzw. aller Ressourcen beiträgt, wobei die Emissionsreduktion in der jetzt anstehenden Transformation den Vorrang haben muss.

Eine Vielzahl der vielversprechenden und auch hier bewerteten Technologien sind noch auf einem TRL vor der Marktdurchdringung oder an deren Schwelle (TRL 5-7). Diese sind nach klassischen ökonomischen Kennwerten zurzeit (noch) nicht darstellbar, weshalb die Rahmenbedingungen langfristig und verlässlich gestaltet sein müssen, damit Brandenburg und Deutschland die Emissionsziele des Industriesektors erfüllen können.

Die oben genannte technische Analyse gestattet die passgenaue Auswahl der Dekarbonisierungsschritte sowie deren techno-ökonomisch optimale Kombination. Die einseitige Fokussierung auf eine einzelne Technologie wird fast immer im verbleibenden Zeitrahmen nicht zum Ziel führen. Es wird ein Bündel von Maßnahmen sein. Dabei gilt das Prinzip, die Energieströme und Emissionen erst im direkten Produktionsprozess, danach in der gesamten Produktionsanlage und dann dem Standort insgesamt zu mindern. Erst danach sollte die Umsetzung standortübergreifender Maßnahmen erfolgen.

1. Glasindustrie

Durch die industrielle Forschungstätigkeit konnte der Kontakt zu einem Unternehmen der Glasindustrie aufgebaut werden. Es ist bekannt, dass die Glasindustrie zu den energieintensivsten Industriesektoren in Deutschland gehört. Neben Behälterglas werden auch Flachglas und Spezialglas durch den Einsatz der Energieträger Erdgas und Strom hergestellt. Als direkte CO₂-Emission ist die Verbrennung von Erdgas und als indirekte CO₂-Emission die Nutzung von Strom zu sehen. Der eigentliche Schmelzprozess des sogenannten Gemenges ist

der energieintensivste Prozessschritt im gesamten Glasherstellungsprozess. Dieser Schmelzprozess erfolgt in Glasschmelzwannen, welche nach den Bedürfnissen des herzustellenden Glases ausgelegt wird. Gegenwärtig kommen in Deutschland vier Schmelzwannentypen (Quer- und U-Flammenwannen, Hybride-Schmelzwannen, Oxy-Fuel-Schmelzwannen und elektrische Schmelzwannen) zum Einsatz.

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschungsinstitut und Unternehmen konnten erste standortspezifischen Herausforderungen im Dekarbonisierungsprozess identifiziert werden. Das Unternehmen hat sein Produktportfolio auf Spezial- und Flachgläser ausgerichtet. Das bedeutet, der Schmelzprozess des Gemenges erfolgt in einer Sauerstoff-Brennstoff-Schmelzwanne dem sogenannten Oxy-Fuel-Schmelzverfahren. Das Oxy-Fuel-Schmelzverfahren ist ein technisch ausgereiftes und in der Spezialglasindustrie seit Jahren weltweit etabliertes Schmelzverfahren. Als Oxidationsmedium wird dem Energieträger Erdgas reiner Sauerstoff zugeführt. Der Vorteil der Oxy-Fuel-Schmelzwanne gegenüber den anderen Schmelzwannen ist die Energieeinsparung beim Aufheizen der Verbrennungsluft und die Minimierung der NO_x -Abgasvolumenströme. Als Abgas wird gegenwärtig Wasserdampf und CO_2 freigesetzt. Es besteht aber die technische Möglichkeit, den anfallenden Wasserdampf durch Kondensation vollständig aus dem Abgasvolumenstrom abzuscheiden. Das verbleibende reine CO_2 ließe sich dann theoretisch durch die CCUS Technologie (CO_2 -Abscheidung und/oder CO_2 -Speicherung) vollständig eliminieren und der Schmelzprozess wäre damit dekarbonisiert.

Da die CCUS-Technologie nicht in Deutschland etabliert ist, müssen andere Wege zur CO_2 -Minderung auf ihre Umsetzbarkeit hin untersucht werden. Für die bestehende Oxy-Fuel-Schmelzwanne bietet sich daher die Nutzung von regenerativen Brennstoffen an. Wird bspw. das bisher verwendete Erdgas vollständig durch Wasserstoff ersetzt, so würden rein theoretisch im Abgasvolumenstrom keine CO_2 -Emissionen mehr vorhanden sein. Das bedeutet, der energieintensive Schmelzprozess in der Oxy-Fuel-Schmelzwanne wäre damit CO_2 -neutral. Aber regenerativ hergestellter Wasserstoff muss in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen. Ein Transport über Straße oder Schiene entfällt allein aus der Tatsache, dass entsprechende Mengen an Wasserstoff zur Verfügung stehen müssen. Da Deutschland über ein gut ausgebautes Erdgasnetz verfügt und die Glasindustrie bereits an diese Infrastruktur angeschlossen ist, sollte die Bereitstellung des regenerativen Energieträgers Wasserstoff über eine Pipeline der Vorrang gegeben werden. Unter Berücksichtigung des geplanten Wasserstoffnetzausbaues bis 2050 und der bisher fehlenden Anbindung des Industriepartners sollte dem beschleunigten Ausbau/Anschluss Rechnung getragen werden.

Der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger für den Schmelzprozess bedeutet aber auch einen erheblichen Mehraufwand an Forschung, um die hohe Qualität des Spezialglases beizubehalten. Denn die chemischen Mechanismen des Wasserstoffes sind bei der Verbrennung und in der Schmelze unter Laborbedingungen bekannt, aber für großtechnische Anlagen liegen noch keine validierten Ergebnisse vor. In Laborversuchen konnte nachgewiesen werden, dass der Wasserstoff zu erheblichen Veränderungen bei den Verbrennungs- und Schmelzbedingungen in der Schmelzwanne und schlussendlich auch in der Glasschmelze führt.

Die Wechselwirkungen von Wasserstoff, und Glasqualität müssen noch besser verstanden werden.

Wie bereits oben erwähnt, wird der verwendete Strom zur Erzeugung des Sauerstoffes als indirekte CO₂-Emission gesehen. Hier bietet sich als technische Anlagenerweiterung die Sauerstoffproduktion am Standort an. Durch die Integration eines Elektrolyseurs könnte zusätzlicher Wasserstoff für den Schmelzprozess erzeugt werden und gleichzeitig der anfallende Sauerstoff dem Oxy-Fuel-Schmelzverfahren zu geführt oder gespeichert werden. Notwendige Infrastrukturmaßnahmen wären ein beschleunigter Ausbau des bisherigen 50 kV Netzes auf 110 kV.

2. Papierindustrie

Die Papierherstellung erfolgt auf sehr großen Papiermaschinen (Länge bis zu 250 m – siehe Abschnitt 3.1). Die im Abschnitt 3.2 genannten materialbasierten Dekarbonisierungsmaßnahmen würden einen erheblichen Umbau bzw. Neuentwicklung der Papiermaschinen mit entsprechend hohem Investitionsaufwand erfordern. Da deren TRL oft noch <5 ist, wird die Entwicklung zur Marktreife nach großtechnischer Demonstration noch einige Zeit beanspruchen. In den Fallstudien wurde in Absprache mit den Auftraggebern der Schwerpunkt auf die energetischen Maßnahmen gesetzt. Damit ist eine deutliche Reduktion der CO₂-Emission möglich, welcher Grad an Dekarbonisierung erreicht werden kann lässt sich aus den vorliegenden ersten Ergebnissen noch nicht abschließend bewerten. Eine standort- und prozessspezifische Betrachtung wird am Beispiel der LEIPA Group GmbH (Abschnitt 7) durchgeführt.

Die Dampferzeuger der auftraggebenden Firmen werden bisher zum Großteil mit Ersatzbrennstoff (EBS) betrieben. Es werden die eigenen organischen Abfälle der Papierproduktion aber auch Abfälle aus der Umgebung thermisch verwertet. Deren langfristige Einstufung als „Grüner“ Brennstoff ist nicht gesichert. Die Dampferzeugung lässt sich gut elektrifizieren und so auf Strom aus erneuerbaren Quellen umstellen. Laufende Studien der Industriepartner untersuchen die Möglichkeit, aus Wind und Sonne im nahen Umfeld der Fabriken Strom zu erzeugen. Hier kann der Einsatz einer neuen Generation von Wärmepumpen eine deutliche Reduzierung des Strombedarfes bewirken. Diese Technologie steht kurz vor der Erprobung im realen industriellen Umfeld. Die Wärmequelle kann Abwärme des Trocknungsprozesses, bei gleichzeitiger Steigerung der Energieeffizienz, aber auch lokal solarthermisch erzeugte Wärme sein.

Ein massiver Umbau der Papiermaschine selbst ist sehr zeit- und kostenintensiv. Graduelle Anpassungen um den Wasserverbrauch oder auch die Verbesserung der Pressschritte zu Beginn der Trocknung können zur Reduktion des Energiebedarfes beitragen.

Bestimmte Events / Störungen in der Papierproduktion können zu einer nicht planbaren kurzzeitigen deutlichen Steigerung des Dampf- und damit des Energiebedarfes führen. Dies wird derzeit durch den Einsatz von Gas- oder Ölbrennern abgedeckt.

Die wechselseitigen Abhängigkeiten von Energie-, Stoff- und Maschineneffizienz erfordern eine intensive ganzheitliche Analyse des Ist-Standes wie auch die Analyse zukünftiger Produktionsanforderungen an den Energiebedarf (Zeit, Ort, Form). Vielversprechende Strategien und Maßnahmen sollten im nächsten Schritt mit geeigneten computergestützten Modellen (digitaler Zwilling) bewertet und auf dieser Basis die optimale techno-ökonomische Variante identifiziert werden.

3. Automobilzulieferer (Nutzfahrzeugreifen)

Bei der Runderneuerung von Nutzfahrzeugreifen werden im Wesentlichen zwei Verfahren angewendet. Bei der Kaltrunderneuerung wird ein bereits vulkanisierter Laufstreifen auf eine abgeraute Karkasse aufgebracht und in einem Autoklav auf ca. 110°C erhitzt. Bei der Heißrunderneuerung wird Material auf die abgeraute Karkasse aufgetragen und in einer Presse bei 165°C vulkanisiert, wodurch auch die Form- und Profilgebung erfolgt. Dieses Verfahren entspricht im Wesentlichen auch der Herstellung von neuen Nutzfahrzeugreifen, wobei bei der Runderneuerung die intakte Karkasse wiederverwendet wird. In beiden Verfahren wird die Wärme durch Sattedampf zur Verfügung gestellt, welcher bisher mit Hilfe von Erdgas erzeugt wird und somit maßgeblich für die Emissionen des Prozesses verantwortlich ist. Aufgrund der klaren Vorgabe der Arbeitsschritte lag der Fokus der Fallstudie auf der Energieeffizienz des Prozesses durch Nutzung von Abwärme und auf der Elektrifizierung der Dampferzeugung.

Als nutzbare Abwärmequellen wurden das heiße Kondensat, welches die Autoklaven und Pressen verlässt, und die abzukühlenden Reifen selbst identifiziert. Das heiße Kondensat wird bereits für das Heizen der Produktionshalle und für die Warmwassererzeugung verwendet und danach direkt dem Dampferzeuger wieder zugeführt. Die heißen Reifen werden zum Abkühlen in der Halle gelagert, wodurch die darin gespeicherte Wärme besonders in den warmen Monaten ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. Für deren Nutzung existieren aktuell keine auf dem Markt verfügbaren Lösungen speziell für Fahrzeugreifen, wodurch sich hier ein Entwicklungsbedarf ergibt. Insgesamt ist im Bereich der Wärmenutzung von abzukühlenden, zähflüssigen oder festen Medien ein großer Forschungsbedarf vorhanden.

Für die Elektrifizierung der Dampferzeugung wurden Wärmepumpen und elektrische Dampferzeuger identifiziert. Elektrische Dampferzeuger können ohne großen Aufwand in die bestehende Infrastruktur integriert werden und erfordern geringere Investitionskosten als Wärmepumpen. Aufgrund der geringeren Effizienz haben sie jedoch höhere Betriebskosten zur Folge. Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Wärmepumpen ist es hingegen notwendig, hochwertige Wärmequellen zur Verfügung zu haben. Diese liegt nach Analyse des Prozesses jedoch nur in Form der abzukühlenden Reifen vor, so dass alternative Wärmequellen erschlossen werden müssten. Möglichkeiten ergeben sich hier bei der Verwendung von

Solarthermieanlagen in Verbindung mit thermischen Speichern, welche dann als Wärmequelle für eine Wärmepumpe dienen können. Dieses System muss speziell für die Anforderungen des vorliegenden Prozesses ausgelegt und angepasst werden, um eine optimale und wirtschaftliche Integration zu gewährleisten. Aufgrund der unsicheren Lage am Energiemarkt und der damit schwer zu treffenden langfristigen Investitionsentscheidungen, wurde sich zunächst für die Anschaffung eines elektrischen Dampferzeugers entschieden. Der Ausbau der bereits vorhandenen PV-Anlage ist für den Betrieb einer Wärmepumpe als auch eines elektrischen Dampferzeugers eine wirtschaftlich sinnvolle Unterstützung.

7. Standort- und prozessspezifische Evaluierung am Beispiel der LEIPA Group GmbH

Am näher untersuchten Produktionsstandort - LEIPA Group GmbH in Schwedt/Oder wurde in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner eine standort- und prozessspezifische Dekarbonisierungsstrategie weiterentwickelt.

Die Firma LEIPA Group GmbH betreibt schon seit vielen Jahren einen kontinuierlichen technologischen Entwicklungsprozess, nicht nur um die Produktion effektiver zu gestalten, sondern auch um mit techno-ökonomischen Maßnahmen die Energieeffizienz zu steigern und den Umweltschutz kontinuierlich zu verbessern. Aus den Ergebnissen vorangegangener Studien, den Ausgangsdaten der Produktion und der Anlagenkonfiguration, die dem DLR von der LEIPA Group GmbH zur Verfügung gestellt wurden, wurden Maßnahmen vorgeschlagen, grob konzipiert und simulationstechnisch untersucht. Es erfolgte noch keine Modellierung des gesamten Produktionsprozesses (und der Hilfsprozesse). Es zeigt sich, dass dies sowie eine detaillierte technoökonomische Bewertung zu einer umfassenden Dekarbonisierungsstrategie notwendig sein wird.

Nachfolgend werden untersuchte Einzelmaßnahmen kurz vorgestellt und unter dem Blickwinkel CO₂-Emission und Steigerung der Energieeffizienz – hier insbesondere die Nutzung von bisher nicht genutzter Abwärme – bewertet.

Schon jetzt wurden wichtige Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfe für die Dekarbonisierung der energieintensiven Papierproduktion - für den Übergang zur CO₂-neutralen Produktion ermittelt

Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Aufwertung der Abwärme der Abwasserreinigungsanlage

In den Abwasserreinigungsanlagen (ARA) des nördlichen und südlichen Betriebsbereiches werden insgesamt jährlich ca. 9 Millionen m³ Wasser vor der Einleitung in die Oder aufgereinigt. Zwischen den Stufen der anaeroben und aeroben Aufbereitung muss das Wasser von ca. 40 °C auf 30 °C heruntergekühlt werden. In der südlichen ARA geschieht dies derzeit durch Kühlung gegen Umgebungsluft in Hybridkühltürmen. Mittels einer Wärmepumpe ließe sich dieses im Vergleich zur Umgebung relativ hohe Temperaturniveau nutzen, um Dampf bei geringem Druck zu produzieren und eine der Produktionsschienen zu bedienen. Entsprechend der Wärmekapazität des Wassers ergibt sich bei der Abkühlung ein Potential von 12 MW Wärmeleistung. Um dieses mit einer idealen Wärmepumpe von 30 °C auf 133,5 °C (entsprechend der Siedetemperatur von Wasser bei 2 bar_ü) zu heben, sind mindestens 4,11 MW notwendig (COP_{th} = 3,92). Heutige Großwärmepumpen erreichen eine Effizienz von ca. 50 % der idealen Wärmeleistungszahl, somit werden 12,5 MW an elektrischer Antriebsleistung benötigt. Diese Leistung stehe wiederum auch an der Wärmesenke zur Verfügung, sodass sich eine Wärmebereitstellung von 24,5 MW ergibt, entsprechend 34 t/h Dampf bei einem COP von 1,96. Da dieser Wert unterhalb des Verhältnisses von Strom - zu Gaspreis von ca. 2,25 liegt (Auskunft von LEIPA Group GmbH), ist eine solche Wärmepumpe aktuell auch bei Vernachlässigung der relativ hohen Investitionskosten derzeit nicht wirtschaftlich zu betreiben. Hinzukommt, dass Strom aus regenerativen Quellen genutzt werden müsste, um die mit der

Stromproduktion einhergehenden CO₂-Emissionen zu vermeiden. Als mittelfristige Maßnahme zur Reduzierung der Emissionen sollte dies dennoch betrachtet werden, zumal auch die CO₂-Intensität des deutschen Strommixes zukünftig weiter abnehmen wird und die CO₂-Abgabe kontinuierlich steigen wird.

Mit der Wärmepumpe ließen sich insgesamt 37,2 GWh/a an Wärme bereitstellen, bei einem Strombedarf von 18,3 GWh/a. Die Jahresarbeitszahl beträgt also 2,06. Bei Bereitstellung des Stroms entsprechend der aktuellen durchschnittlichen Erzeugung in Deutschland mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 434 g/kWh [54] ist mit der Elektroenergiebereitstellung die Emission von ca. 7.926 t pro Jahr CO₂ verbunden.

Durch die von der Wärmepumpe bereitgestellte Wärme wird zunächst die Dampferzeugung der Großraumwasserkessel verdrängt, danach der Wirbelschichtkessel des nördlichen Kraftwerks. Die Verdrängung der Dampferzeugung im Wirbelschichtkessel wird allerdings auch nur zu einer zeitlichen Verschiebung führen indem die Leistung des Kessels gedrosselt wird. Da der Kessel zur Verbrennung der Faserrest- und Spuckstoffe genutzt wird, werden diese ohnehin verbrannt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass letztlich ausschließlich Erdgas verdrängt wird. Die spezifischen CO₂-Emissionen bei der Erdgasverbrennung betragen 200,8 kg/MWh [54]. Der feuerungstechnische Wirkungsgrad der Großraumwasserkessel wird hier mit 90 % angenommen. Demnach ließe sich durch die Wärmepumpe eine CO₂-Emission von 8.308 t/a vermeiden. Verglichen mit der oben berechneten und mit der Stromproduktion assoziierten CO₂-Emission ergibt sich, dass der Einsatz der Wärmepumpe nur dann ökologisch sinnvoll ist, wenn diese ausschließlich mit Strom aus regenerativen Energiequellen betrieben wird.

Faserreststoff-Vortrocknung

Unter Faserreststoff (FRST) wird der bei der Aufbereitung von Altpapier anfallende Schlamm bezeichnet. Er setzt sich vor allem aus nicht wiederverwertbaren Faserabfällen, Füllstoffen und papierfremden Verunreinigungen zusammen [53]. Im LEIPA-Werk am Standort Schwedt wird der gesamte anfallende FRST zur Befuerung des WSK genutzt. Dabei liegt seine Restfeuchte im Bereich 50-65 % [56]. Problematisch ist, dass die Zusammensetzung und Restfeuchte des FRST stark variieren. Als Konsequenz ergeben sich Schwankungen bei der Wärmebereitstellung des WSK, die wiederum die Menge an erzeugtem Frischdampf beeinflussen. Ein weiterer Nachteil ist, dass FRST generell einen hohen Wassergehalt und einen niedrigen Heizwert besitzt. Viel Wärmeenergie wird beim Verdampfen des Wassers verbraucht und ist damit für die Dampferzeugung verloren.

Es wird vorgeschlagen, den Reststoff in einem neuen separaten Offline-Prozess – also in einer entsprechenden Anlagenerweiterung zu trocknen. Das Rauchgas der Dampferzeuger kann hier als Wärmequelle dienen. In dem konzipierten Trocknermodell wurden die Wärmeströme zunächst unter dem technischen-ökologischen Aspekt optimiert. Die durchgeführten Modellrechnungen liefern einen ersten Anhaltspunkt, wie bisher ungenutzte Abwärme aus dem Rauchgas des WSK zur Trocknung des FRST verwendet und so sein Heizwert erhöht werden kann. Es wurde gezeigt, dass auf diese Weise auf die Feuerung von Frischholz gänzlich

verzichtet und der Altholzbedarf gesenkt werden kann. Damit könnten 21.287 t CO₂ pro Jahr eingespart werden.

Um das Konzept technisch umzusetzen, muss auf jeden Fall die Kinetik des Trocknungsprozesses berücksichtigt und zusätzliche Fördereinrichtungen wie Fließbänder und Ventilatoren miteingeplant und ausgelegt werden. Sind die Abmaße und Leistungsbedarfe der Maschinen bekannt, können anschließend auch ihre assoziierten CO₂-Emissionen bestimmt werden. Entweder sollten die elektrischen Leistungen durch zusätzlichen Dampf, der in einer Turbine vor Ort entspannt wird (siehe folgender Abschnitt), oder durch hinzugekauften grünen Strom gedeckt werden. Anschließend kann über vorhandene Kostenfaktoren der dimensionierten Maschinen eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt werden. Erweist sich das Konzept als wirtschaftlich rentabel und kann darüber hinaus sichergestellt werden, dass das beladene Rauchgas nach Trocknung und Gaswäsche die geforderten Emissionsgrenzwerte einhält, ist diese Maßnahme sehr gut geeignet, große Mengen an CO₂ einzusparen und dies bei relativ geringem Aufwand für die dafür erforderlichen Umbaumaßnahmen.

Integration einer Dampfturbine nach dem Wirbelschichtkessel und Hochdruckkessel

Die Einführung einer Dampfturbine anstelle eines Expansionsventils im Bereich Nord nach den Dampferzeugern WSK und HDK ist eine weitere Möglichkeit die CO₂-Emissionen herabzusetzen. Dies entspricht einer klassischen Kraft-Wärme-Kopplung wie sie auch im Bereich Süd angewendet wird. Im Bereich Nord gibt es oder gab es eine Dampfturbine, welche aber nicht zu dem derzeit betriebenen Dampfregime passt.

Es wird erwartet, dass die von der eingeführten Dampfturbine erzeugte Energie sowohl für die bestehenden als auch für die in Zukunft geplanten elektrischen Anlagen, wie zusätzliche Papiermaschinen, elektrische Kessel oder Wärmepumpen von Nutzen sein wird. Der zusätzliche Dampf, der benötigt wird, um die Energie, die der Dampf in der Turbine abgibt wurde ebenfalls berechnet. Es wurde dabei davon ausgegangen, dass der zusätzliche Dampf aus den GWKs im Süden geliefert werden kann, da die GWKs eine flexible Betriebskapazität haben und der zusätzliche Dampf direkt aus dem Süden mit den gleichen Druckniveaus ergänzt werden könnte. Der Ersatz von bestehendem Strom mit hohem CO₂-Ausstoß durch Strom, der von der Dampfturbine erzeugt wird, kann zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen führen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass etwa 7.237 t CO₂ jährlich durch den Ersatz des Expansionsventils durch eine Dampfturbine vermieden werden.

Möglichkeiten der Integration eine Wärmepumpe an der Papiermaschine in Werk Nord

Im Rahmen einer Vorstudie wurde die Integration einer Hochtemperatur-Wärmepumpe (HTWP) an der Papiermaschine 5 untersucht. Dabei war das Ziel zu sondieren, ob es Möglichkeiten der HTWP-Integration gibt, um diese Technologie in industrieller Umgebung zu demonstrieren und zu testen. Für die Wärmepumpe wurde der Rankine-Prozess gewählt, da dieser Wasser bzw. Wasserdampf als Arbeitsmedium verwendet und somit zum Dampfsystem

der Papierfabrik passt. Eine umfassendere Modellierung der Papiermaschine soll in naher Zukunft in einem möglichen gemeinsamen Projekt erfolgen. Die Erkenntnisse dieser Vorstudie sind aber wertvoll für diese Untersuchung und werden hier erläutert. Es wurden neben der thermodynamischen Konzeptentwicklung auch bereits mögliche Aufstellungsorte an der Papiermaschine sowie eine erste grobe Kostenschätzung durchgeführt. Die Wärmepumpe an der Papiermaschine würde, wie die Wärmepumpe der Abwasserreinigungsanlage, die Dampfschiene bedienen. Da hier die Temperatur der Wärmequelle deutlich höher ist, wäre prinzipiell auch eine Einspeisung auf anderen Dampfschienen möglich. Dabei wurde ein COP von 3,34 für den geschlossenen Kreislauf bzw. 3,9 für den offenen Kreislauf abgeschätzt. Für die Dampfschiene im südlichen Bereich, müsste eine zusätzliche Verbindungsleitung mit dieser Druckstufe verlegt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass etwa 7.200 t CO₂ jährlich durch den Ersatz der Hochtemperatur-Wärmepumpe bzw. der Brüdenverdichtung (MVR) vermieden werden können.

Einsatz von Paludi-Fasern

Die LEIPA Group GmbH verwendet ausschließlich Altpapier als Rohstoff, trotzdem sind alternative Faserquellen ein wichtiges Thema. So arbeitet – insbesondere der Standort Schwedt – in verschiedenen Konsortien und Projekten mit, in denen eine nachhaltige und ökologische Versorgung der Papierindustrie mit Rohstoffen thematisiert wird.

Hier kann die Nutzung von sogenannten Paludikulturen eine wichtige Rolle spielen [55]. LEIPA unterstützt die sogenannte „Allianz der Pioniere“ bzw. das Greifswalder Moorzentrum. Ihr Anliegen ist die Wiederbewässerung von trockengelegten Moorflächen. Mit dieser Maßnahme wird deren CO₂-Emission deutlich reduziert, gleichzeitig können diese Flächen mit den entsprechenden Technologien ökologisch vertretbar weiter für den Pflanzenbau genutzt werden.

CO₂-Abtrennung aus dem Rauchgas der Dampferzeuger

Das Konzept zur CO₂-Abtrennung (Carbon Capture - CC) aus dem Rauchgas wurde am Beispiel des Wirbelschichtkessels (WSK) untersucht. Der hier angenommene CC-Prozess basiert auf der chemischen Absorption des CO₂ aus dem Rauchgas. CO₂ strömt aus dem WSK kommend von unten in den Absorber der eine Packungskolonie ist. Im Gegenstrom dazu wird von oben kontinuierlich Lösungsmittel (in der Regel Amin-Lösungsmittel) hinzugefügt, von dem das CO₂ chemisch absorbiert wird. Über die Packungshöhe hinweg wird das Rauchgas auf diese Weise von CO₂ gereinigt. Das CO₂-freie Abgas wird im oberen Teil des Absorbers mit Wasser gewaschen, um geringe Mengen von in die Gasphase übergegangenem Lösungsmittel rückzugewinnen. Die CO₂-Konzentration im austretenden Abgas hängt von der Packungshöhe ab. Je größer die Kolonne ist, desto mehr CO₂ kann abgetrennt werden. Der gasförmige Produktstrom der Desorptionskolonne enthält nach der Kühlung und Flüssigkeitsabscheidung überwiegend das abgeschiedene CO₂ (Konzentration über 90 Vol.-%) der Rest ist Wasser. Die

Modellierung chemischer Prozesse anhand thermodynamischer und chemischer Parameter zeigt, dass bei einem 85 %igen CO₂-Abscheidungsszenario 276.094 t CO₂ aus dem Rauchgas jährlich entfernt werden könnten. Für ein 50 %iges CO₂-Abscheidungsszenario sind es 160.720 t CO₂ jährlich. Die CO₂-Konzentration im Produktstrom könnte erhöht werden, indem die Kondensattemperatur weiter gesenkt wird, wodurch mehr Wasser auskondensiert.

Verbesserung der Infrastruktur des Industriestandortes Schwedt/Oder

Die Stadt Schwedt und die dort ansässigen Firmen haben sich zusammengeschlossen und planen die JTF-Förderung soweit wie möglich für die Weiterentwicklung der Infrastruktur der Region zu nutzen. Schwedt verfügt bereits über eine gute Infrastruktur. Hier sind das Straßen- und Schienennetz, die Anbindung an die schiffbare Oder (Hafen), das Stromnetz mit allen üblichen Spannungsstufen, das Wasser- und Abwassernetz, die Erdgasversorgung, der Fernwärmestern der Stadt und das gut ausgebaute Telekommunikationsnetz zu nennen.

Auf diesen Chancen aufbauend ist ein zielgerichteter Aus- und Umbau entsprechend den Zielen der Energiewende sowie der Steigerung der Zirkularwirtschaft geplant – bei mindestens gleichzeitigem Erhalt oder bevorzugt bei einem Ausbau der industriellen Wertschöpfung. Hierbei soll auf die bestehende Infrastruktur und vor allem das vorhandene Know-how zurückgegriffen werden, um zielgerichtet die Transformationsziele höheren Zirkularitätsgrad in der Produktion, Erhöhung des Anteils grüner Medien und Klimaneutralität zu erreichen.

Dafür ist insbesondere eine Versorgung mit EE-Strom und grünen Wasserstoff erforderlich. Diese Anschlüsse sind geplant, können aber nicht mit JTF-Mitteln realisiert werden.

JTF-geförderte Infrastrukturen könnten sein:

- Biogenes CO₂ als Rohstoff zur weiteren Verarbeitung und Herstellung von grünen Wasserstoffderivaten
- Grüne Wärme zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme und städtischer Wärme
- Weitere nachrüstbare Medientrassen – in Abhängigkeit der Ergebnisse aus der zu erfolgenden Bedarfsanalyse.

Die Weiterentwicklung der Infrastruktur mit den Fördermitteln aus dem JTF sichert eine hohe Nachhaltigkeit der zukünftigen Nutzung und kommt zunächst allen ansässigen Firmen zu Gute und bietet darüberhinaus gleichzeitig hervorragende Bedingungen für Neuansiedlungen.

Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden verschiedenen Maßnahmen zur Reduktion der mit der Papierherstellung direktverbundenen Treibhausgasemissionen untersucht, es erfolgte noch keine Modellierung des gesamten Produktionsprozesses (und der Hilfsprozesse). Die Betrachtung erfolgt standortspezifisch und ist nur auf den Produktionsstandort - LEIPA Group GmbH in Schwedt/Oder angepasst, da die Firmenprozesse meistens standortspezifisch sind

(und auf andere Papierhersteller nicht übertragbar sind), da jedes Industriestandort eigenes Energieversorgungssystem besitzt.

Wie bereits ausgeführt, sollte vor einer Umsetzung eines Dekarbonisierungskonzeptes eine umfassende Modellierung der Produktionsprozesse einschließlich der Nebenprozesse erfolgen. Mit diesem „Digitalen Zwilling“ kann eine technoökonomische Bewertung und Optimierung erfolgen. In dieser Studie erfolgte noch keine Modellierung des gesamten Produktionsprozesses (und der Hilfsprozesse).

Papier ist weitestgehend ein Naturprodukt (Zellstoff überwiegend aus Holz gewonnen). Alternative Quellen (z. B. die genannten Paludi-Kulturen) können dieses in der Zukunft teilweise ersetzen. Für die Dekarbonisierungsstrategie der Papierindustrie ist entscheidend, wie die thermische Verwertung und die damit einhergehende CO₂ – Emission der Faserreststoffe zukünftig aus politischer, regulatorischer und ökonomischer Sicht bewertet werden wird. Dies gilt für die LEIPA Group GmbH im besonderen Maße, da sie ausschließlich Altpapier verarbeitet und ihren thermischen Energiebedarf zu über 80 % aus der Verbrennung der Faserreststoffe und von Ersatzbrennstoff (EBS), der aus regionalem Müllaufkommen stammt, deckt. Eine stoffliche Nutzung der Faserreststoffe ist denkbar. Hier wurde aber noch kein tragfähiger Einsatz für hochwertige Produkte gefunden.

Diese Aussagen gelten auch für die Nutzung von Frisch- oder Altholz, das derzeit im WSK als (Stütz-)Brennstoff verwendet wird. Hier gilt es zu beachten, dass die Waldwirtschaft für die nächsten 10 bis 15 Jahre ein sehr hohes Holzangebot prognostiziert, welches aus dem Ausfall vieler Nadelbaumarten und den deshalb notwendigen ökologischen klimaangepassten Waldumbau resultiert.

Die vorgeschlagenen technischen Einzelmaßnahmen basieren auf dem Stand der Technik, wobei für die Hochtemperatur-WP ein TRL von 5 gilt und über Demo-Projekte der Technologiereifegrad erhöht werden muss. Diese Einzelmaßnahmen könnten also nach einer positiven technoökonomischen und -ökologischen Bewertung umgesetzt werden. Der Einsatz von neuen Zellstoffquellen, die CC-Technologie und auch der Ausbau der Standort-Infrastruktur erfordert sicher eine langfristige Strategie und Umsetzungsphase.

In Abbildung 30 sind die Auswirkungen der betrachteten Maßnahmen auf die CO₂-Emissionen dargestellt. Die im ersten Balken dargestellten Emissionen sind dabei die tatsächlichen Emissionen inklusive des biogenen Anteils. Der zweite Balken zeigt die fossilen Emissionen des Jahres 2019 als Referenzwert. Bei der Implementierung der Faserreststofftrocknung ergibt sich durch die Vermeidung der Verbrennung von Frisch- und Altholz ein externer Reduktionseffekt. Die Dampfturbine erlaubt es, den externen Strombezug und die damit verbundenen Emissionen leicht zu reduzieren, während die Wärmepumpe den Erdgasbezug reduzieren kann und einen relevanten Effekt auf die Emissionen nur dann aufweist, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben wird. Durch die CO₂-Abscheidung erhöht sich die Menge des produzierten CO₂ signifikant, insbesondere wenn die erforderliche Wärme durch Erdgas bereitgestellt wird. Die tatsächlich emittierte Menge lässt sich jedoch reduzieren. Dies gilt in verstärktem Maße für die Option der Integration einer Wärmepumpe in den Prozess der Abscheidung. Ein weiterer großer Hebel stellt der Bezug von Strom aus regenerativen Energien dar. Wird die Wärmepumpe für die Abscheidung mit solchem Strom betrieben, ergeben sich

nur noch sehr geringe Emissionen. Durch eine Kombination der genannten Maßnahmen sind sogar negative CO₂-Emissionen möglich.

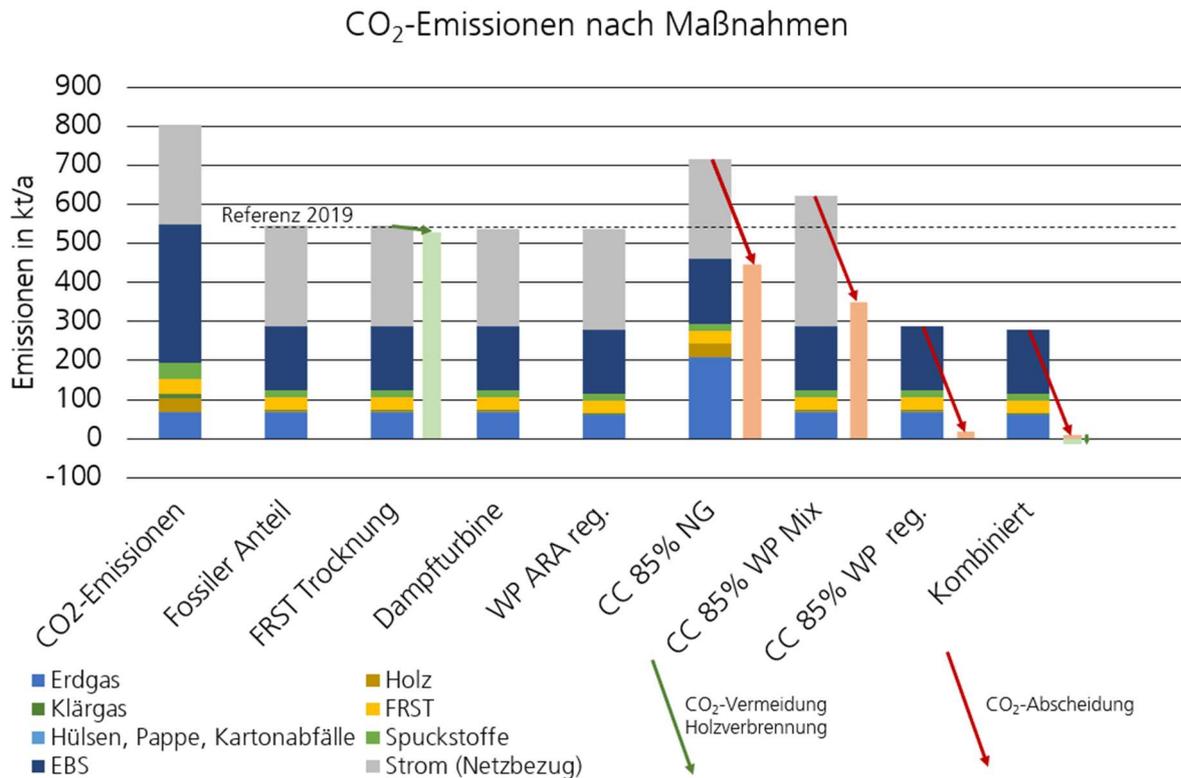


Abbildung 31: Maßnahmen und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen des Gesamtwerks. WP ARA: Wärmepumpe mit Abwärme aus der Abwasserreinigungsanlage. CC: Kohlenstoffdioxidabscheidung. NG: Erdgas. Mix: Strombezug nach derzeitigem Netzmix. reg.: Bezug regenerativen Stroms.

Im Vergleich zum Referenzwert von 546.809 t/a (CO₂-Emissionen in 2019 [52], [57]) lässt sich durch die beschriebenen Maßnahmen eine Minderung der CO₂-Emissionen um 320.126 t/a oder etwa 60 % erreichen.

Es zeigt sich also, dass mit den kurz- und mittelfristigen Maßnahmen nur eine geringe Vermeidung von CO₂-Emissionen möglich ist. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle möglichen Maßnahmen betrachtet wurden. So ist eine weitere Wärmepumpenintegration denkbar, um mehr Erdgas zu verdrängen. Hier sollten weitere Ansätze untersucht und hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit technologisch und wirtschaftlich bewertet werden.

Die langfristigen Maßnahmen erscheinen hinsichtlich der Dekarbonisierung aussichtsreicher, wobei ein Bezug von Strom aus regenerativen Energiequellen theoretisch sofort umsetzbar wäre, jedoch nur bilanziell zu einer Reduktion von Emissionen führt. Daher hat der Ausbau der gemeinsamen Energieinfrastruktur für den Industriestandort Schwedt basierend auf den erneuerbaren Energiequellen für den Industriestandort Schwedt erhebliche Synergieeffekte in der Defossilisierung.

Bezüglich der Abscheidung von Kohlenstoffdioxid ist festzustellen, dass diese zu einer starken Reduktion der CO₂-Emissionen führt, unter der Annahme, dass das CO₂ langfristig gespeichert (CCS) bzw. ohne erneute Freisetzung in die Atmosphäre weiterverwendet (CCU) werden kann, wobei auch die gesellschaftliche Akzeptanz zu prüfen ist. Die vorgeschlagenen Wärmepumpen

für die Integration in den Abscheidungsprozess müssen erst noch entwickelt werden. Zusätzlich erhöht sich durch den dafür notwendigen zusätzlichen Strombezug die oben genannte Problematik.

8. Zusammenfassung und Handlungsempfehlung

Die vorliegende Studie hat das Ziel, standortspezifische Dekarbonisierungsoptionen für Ostbrandenburg zu erarbeiten. In diesem Zusammenhang wurde eine Standortanalyse der industriellen Produktion in Bezug auf die CO₂-Emissionen durchgeführt und eine Übersicht unterteilt nach Emissionsmengen erstellt. Die Hauptemittenten in Ostbrandenburg sind, Zement-, Stahl- und Chemische Industrie, Glas- und Papierindustrie emittieren kleinere CO₂-Mengen. Die einzelnen Produktionsverfahren wurden nach Branchen strukturiert und kurz beschrieben. Die allgemeinen Dekarbonisierungsmaßnahmen wurden ebenfalls branchenspezifisch aufgeteilt und kurz beschrieben. Die ostbrandenburgischen Betriebe wurden in einem anonym durchgeführten Verfahren nach ihren Dekarbonisierungsmaßnahmen betragt. Aus der Auswertung der Umfrageergebnisse wurden standort- und branchenspezifischen Maßnahmenpakete für Glas-, Papier- und Automobilzulieferer-Industrie abgeleitet. Anschließend wurden Handlungsempfehlungen für Industrie und Politik formuliert.

Handlungsempfehlung für die Industrie

Die Elektrifizierung der Produktionsprozesse hat begonnen und ist konsequent fortzusetzen.

- bei den Investitionsentscheidungen ist weniger der Ist-Stand an verfügbarem regenerativem Strom zu Grunde zu legen, als vielmehr der aus Projektionen ableitbare zukünftige Anteil über die Laufzeit der entsprechenden Umrüst- oder Neuinvestition
- für Produktionsschritte, für die eine Elektrifizierung nicht möglich ist, gilt dieses Argument entsprechend bezüglich der Verfügbarkeit von CO₂-arm hergestelltem Wasserstoff und anderen Brennstoffen, welche ebenfalls auf erneuerbaren Quellen basieren

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, ein klares Bild zum standortspezifischen verfügbaren Energiepotential zu entwickeln.

- anstehende Dekarbonisierung der Industrie und die damit verbundenen Investitionen in neue Technologien für die Emissionsminimierung und -vermeidung in der eigenen Produktion sollte für einen umfassenderen Ansatz des „Design-for-Circularity“ genutzt bzw. vorhandene Ansätze deutlich ausgebaut werden. In der Natur gibt es keinen Abfall. Dieser Grundsatz sollte auch immer mehr Handlungsvorbild für die Industrie werden: Eine umfassende Ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft in Kombination mit CO₂-Vermeidung
- bei der Entwicklung neuer Technologien und Produkte sollte es nicht mehr nur, um die Effizienzsteigerung, Gewichtsminimierung und Minimierung des Rohstoffeinsatzes sowie die Leistungsfähigkeit während der Nutzungsphase gehen, sondern auch um die

Verwendungsperspektive am Lebensende der Produkte und Anlagen. Dies kann signifikant zur Reduzierung der Rohstoffabhängigkeit als auch der Reduzierung von Rohstofftransporten beitragen

Leider war die Beteiligung der Unternehmen an der Umfrage nicht so aktiv wie erhofft, auch mehrmaliges Anfragen blieb oft ohne Resonanz. Damit wurde von Firmen die Chance vergeben aktiv in das drängende und wichtige Thema CO₂-Minderung einzusteigen. Es ist für die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit essentiell ein ganzheitliches Konzept zu Dekarbonisierung und Effizienzsteigerung zu entwickeln vor dem Hintergrund der Energiepreisentwicklung, der Versorgungssicherheit und der anstehenden Verteuerung von CO₂-Zertifikaten.

Handlungsempfehlung für die Politik

Aus den Umfrageergebnissen lassen sich die folgenden Handlungsempfehlungen ableiten:

- Ausbau der Energieinfrastruktur für die Anforderungen des Industriesektors
- Die langen Investitionszyklen in vielen Branchen erfordern Planungssicherheit durch klare Rahmenbedingungen um die hohen Investitionskosten des Übergangs zu einer nachhaltigen Energieversorgung abzusichern und CO₂-Minderungen zu befördern
- Sicherstellen der Versorgungssicherheit und der Anschlusskapazität für die benötigten Energieträger
- Schaffung von Akzeptanz in der Gesellschaft für die Transformation, insbesondere für den Umgang mit Wasserstoff und CO₂

Insofern setzt die alle Sektoren umfassende Brandenburgische Energiestrategie (siehe Abbildung 1) mit ihren sechs Handlungsfeldern gerade für den Industriesektor die relevanten Schwerpunkte und schafft ein günstiges Umfeld für die Umsetzung der notwendigen Transformationsschritte. Aus dieser Strategie des Landes müssen konkrete Maßnahmen im Hinblick auf die Gewährleistung der Versorgungssicherheit, die Beschleunigung des Netzausbaus, der Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft, den Hochlauf der grünen Wasserstoffwirtschaft und eine erfolgreiche Wärmewende abgeleitet werden.

Weiterhin sollten die Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie Recycling und Kreislaufwirtschaft den Übergang zu den effizienten und klimafreundlichen Produktionsverfahren anreizen.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt (2022): Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2021
- [2] A. Ito, N. Götz u. F. Bauer (2021). Grüner Deal für Grünen Stahl. Wer zahlt die Rechnung?, München
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2020): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien, URL: https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf
- [4] M. Wortler, F. Schuler, N. Voigt, T. Schmidt, P. Dahlmann, H.B. Lungen u. J.-T. Ghenda (2013): Steel's Contribution to a Low-Carbon Europe 2050: Technical and Economic Analysis of the Sector's CO₂ Abatement Potential
- [5] W. Xu, W. Cao, T. Zhu, Y. Li u. B. Wan (2015): Material Flow Analysis of CO₂ Emissions from Blast Furnace and Basic Oxygen Furnace Steelmaking Systems in China. *steel research int.* 86(9):1063–1072. doi:10.1002/srin.201400228
- [6] P. Cavaliere (2019): Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Springer International Publishing, Cham
- [7] P. Pulm u. H. Raupenstrauch (2014): Roadmap Industrie. F&E-Fahrplan Energieeffizienz in der energieintensiven Industrie, Wien
- [8] V. Chevrier, L. Lorraine u. H. Michishita (2021): MIDREX® Process: Bridge to Ultra-low CO₂ Ironmaking. *Kobelco Technology Review* 39:33–40
- [9] J. Rissman (2018): Cement's role in a carbon-neutral future
- [10] D.N. Huntzinger, T.D. Eatmon (2009): A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production* 17(7):668–675. doi:10.1016/j.jclepro.2008.04.007
- [11] J. Ruppert, C. Wagener, S. Palm, W. Scheuer u. V. Hoenig (2019): Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie. Abschlussbericht
- [12] P. Bains, P. Psarras u. J. Wilcox (2017): CO₂ capture from the industry sector. *Progress in Energy and Combustion Science* 63:146–172. doi:10.1016/j.pecs.2017.07.001
- [13] S. Cloete, A. Giuffrida, M.C. Romano u. A. Zaabout (2020): Economic assessment of the swing adsorption reactor cluster for CO₂ capture from cement production. *Journal of Cleaner Production* 275:123024. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123024
- [14] M. Achternbosch u. K.-R. Bräutigam (2000): Herstellung von Zementklinker Verfahrensbeschreibung und Analyse zum Einsatz von Sekundärbrennstoffen, Karlsruhe
- [15] T. Hübner, A. Guminski, S. von Roon u. E. Rouyrre (2020): Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der Zement- und Kalkindustrie. Bericht an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

- [16] Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021): Branchenausblick 2030+. Die Glasindustrie, Berlin
- [17] M. Zier, P. Stenzel, L. Kotzur u. D. Stolten (2021): A review of decarbonization options for the glass industry. *Energy Conversion and Management*: X 10
- [18] T. Fleiter, B. Schломann u. W. Eichhammer (Hrsg) (2013): Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien. Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale". Fraunhofer-Verlag, Stuttgart
- [19] T. Fleiter, D. Fehrenbach, E. Worrell u. W. Eichhammer (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. *Energy* 40(1):84–99. doi:10.1016/j.energy.2012.02.025
- [20] A.F. Abdul-Manan, A. Arfaj u. H. Babiker (2017): Oil refining in a CO₂ constrained world: Effects of carbon pricing on refineries globally. *Energy* 121:264–275. doi:10.1016/j.energy.2017.01.046
- [21] O.S. Bayomie, O.Y. Abdelaziz u. M.A. Gadalla (2019): Exceeding Pinch limits by process configuration of an existing modern crude oil distillation unit – A case study from refining industry. *Journal of Cleaner Production* 231:1050–1058. doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.041
- [22] M.J. Kaiser (2017): A review of refinery complexity applications. *Pet. Sci.* 14(1):167–194. doi:10.1007/s12182-016-0137-y
- [23] K. Goto, K. Yogo u. T. Higashii (2013): A review of efficiency penalty in a coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture. *Applied Energy* 111:710–720. doi:10.1016/j.apenergy.2013.05.020
- [24] R.S. Middleton u. J.K. Eccles (2013): The complex future of CO₂ capture and storage: Variable electricity generation and fossil fuel power. *Applied Energy* 108:66–73. doi:10.1016/j.apenergy.2013.02.065
- [25] P. Icha P, T. Lauf u. G. Kuhs (2021): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2020. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-26_cc-45-2021_strommix_2021_0.pdf
- [26] International Energy Agency (2023): ETP Clean Energy Technology Guide. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide> [Zugriff: 11.09.2023]
- [27] International Energy Agency (2018): Technology Roadmap - Low Carbon Transition in the Cement Industry. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>
- [28] M. Leisin u. P. Radgen (2022): Glas 2024 - Dekarbonisierung der Glasindustrie. Stuttgart: Bundesverband Glasindustrie e.V. URL: <https://www.bvglas.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2738&token=d0e5fc3de0c90256568ee3a064ec4d470e41b500>

- [29] J. Jäger, S. Detsch, E. Gebhard, A. Kühn u. A. Sailer (2023): Systematisch Energieeffizienz steigern und CO₂-Emissionen senken in der Glasindustrie. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), URL:
https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2023/LEITFADEN_Systematisch_Energieeffizienz_steigern_und_CO2-Emissionen_senken_in_der_Glasindustrie.pdf
- [30] Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg (2022): ENERGIESTRATEGIE 2040. URL:
<https://mwae.brandenburg.de/media/bb1.a.3814.de/Energiestrategie2040.pdf>
- [31] R. Geres, A. Kohn, S. Lenz, F. Ausfelder, A.M. Bazzanella und A. Möller (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München: Future Camp Climate GmbH, URL:
<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>
- [32] A.M. Bazzanella und F. Ausfelder (2017): Technology Study - Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V., URL:
https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf
- [33] Umweltbundesamt (2022): Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2021 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. URL:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/220310_vjs_2021_-_begleitender_bericht_-_sauber_vbs_korr_kurzfassung.pdf
- [34] Umweltbundesamt (2023): Papiererzeugung, Papierverbrauch und Altpapierverbrauch. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/bild/tab-papiererzeugung-papierverbrauch> [Zugriff: 21. September 2023]
- [35] Wirtschaftsverband Papierverarbeitung e.V. (o.D.): Recycling schont Ressourcen. URL:
<https://papierverarbeitung.de/wpv/umwelt/recycling/> [Zugriff: 21. September 2023]
- [36] C. Costa Jr, E. Wollenberg, M. Benitez, R. Newman, N. Gardner und F. Bellone (2022) Roadmap for achieving net-zero emissions in global food systems by 2050. Scientific Reports, Volume 12, 15064
- [37] J. Wachsmuth, S. Oberle, A. Zubair und W. Köppel (2019): Wie klimafreundlich ist LNG? - Kurzstudie zur Bewertung der Vorkettenemissionen bei Nutzung von verflüssigtem Erdgas (LNG). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, URL:
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-15_cc_21-2019_roadmap-gas_lng.pdf
- [38] International Life Sciences Institute (2008): Considering Water Quality for Use in the Food Industry. URL:
https://ilsa.eu/wp-content/uploads/sites/3/2016/06/R2008Con_H2O.pdf
- [39] Veolia Water Technologies Deutschland GmbH (2018): Lösungen für die Lebensmittelindustrie – Abwasserbehandlung, Wasserrecycling, Wasseraufbereitung. URL:
https://www.veoliawatertechnologies.de/sites/g/files/dvc2981/files/document/2020/05/Lebensmittelindustrie_Veolia_0.pdf

- [40] VTT Technical Research Centre of Finland (2023): Foam Forming Platform. URL: <https://www.vttresearch.com/en/ourservices/foam-forming-platform> [Zugriff: 21. September 2023]
- [41] S. Dermühl und U. Riedel (2023): A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies. *Fuel*, Volume 340, 127478
- [42] Lebensmittelverband Deutschland (2023): Lebensmittelverluste und Lebensmittelverschwendung. URL: <https://www.lebensmittelverband.de/de/lebensmittel/nachhaltigkeit-und-umwelt/verluste-verschwendung> [Zugriff: 21. September 2023]
- [43] Fachverband der Nahrungs- und Genussmittelindustrie Österreichs (2023): Österreich isst informiert – Best Practice: Bioraffinerien verwerten Rohstoffe. URL: <https://www.oesterreich-isst-informiert.at/verantwortung/best-practice-bioraffinerien-verwerten-rohstoffe/> [Zugriff: 21. September 2023]
- [44] Bundesministerium für Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): BKR-Bundesregelung Transformationstechnologien. URL: <https://www.bundesanzeiger.de/pub/publication/z1UOYpff38bpp09Pk9N/content/z1UOYpff38bpp09Pk9N/BAanz%20AT%2004.08.2023%20B1.pdf?inline>
- [45] Bundesumweltamt (o.D.): Mein CO₂-Schnellcheck. URL: https://uba.co2-rechner.de/de_DE/ [Zugriff: 21. September 2023]
- [46] Europäischen Union (2003): EMPFEHLUNG DER KOMMISSION vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0361>
- [47] Lebensmittel Magazin (2023): Die deutsche Lebensmittelwirtschaft in Zahlen. URL: <https://www.lebensmittelmagazin.de/wirtschaft/20230419-deutsche-lebensmittelwirtschaft-branchenzahlen-2021/> [Zugriff: 21. September 2023]
- [48] P. Icha, T. Lauf und G. Kuhs (2023): Entwicklungen der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2022. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf
- [49] A. Bazzanella und D. Krämer (2017): Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz – Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO₂. Frankfurt am Main: DECHEMA e.V., URL: https://dechema.de/dechema_media/Bilder/Publikationen/CO2_Buch_Online.pdf
- [50] J. Schulz, M. von Bargen und B. Küther (2014): Energieeffizienz in Bäckereien – Energieeinsparungen in Backstuben und Filialen. Bremerhaven: EnEff Bäckerei, URL: <https://www.selbstaendig-im-handwerk.de/downloads/News/EnEffBaeckerei-Leitfaden-Juli2014.pdf>
- [51] B. Schmitt, C. Lauterbach und K. Vajen (2021): Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswärme in Brauereien. Kassel: Institut für thermische Energietechnik, Universität Kassel, URL:

[https://www.solarzentrum-hamburg.de/site/wp-content/uploads/2020/07/Leitfaden zur Nutzung solarer Prozesswaerme in Brauereien.pdf](https://www.solarzentrum-hamburg.de/site/wp-content/uploads/2020/07/Leitfaden_zur_Nutzung_solarer_Prozesswaerme_in_Brauereien.pdf)

- [52] F. Benecke, 2023: LEIPA Group GmbH Standort Schwedt Umwelterklärung 2023 – Berichtsjahr 2022
- [53] Informations – Portal – Abfallbewertung (IPA), 2020: Papierherstellung. Herkunft und charakteristische Zusammensetzung, [Informationsportal zur Abfallbewertung - IPA](#)
- [54] P. Icha, T. Lauf (2023): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2022, Hrsg: Umweltbundesamt
- [55] <https://de.wikipedia.org/wiki/Paludikultur> (Abgerufen im Dezember 2023)
- [56] Terra Nova, 2021: [Terra Nova GmbH – Handel - Entsorgung Papierindustrie - Reststoffe \(terranova-gmbh.ch\)](#)
- [57] B. Klawun (2020): Bericht des Immissionsschutzbeauftragten für das Jahr 2019 Werk Süd, LEIPA Group GmbH

Anhang

Anhang A: Dekarbonisierungsfragebogen

Sehr geehrte Teilnehmerin und Teilnehmer,

die Unternehmen in Ostbrandenburg stehen vor Herausforderungen der Energiewende. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, stellt die Politik Roadmaps und Studien für verschiedene Dekarbonisierungsszenarien zur Verfügung. Diese sollen den Unternehmen als Orientierung und Handlungsempfehlung für ihre Dekarbonisierungsmaßnahmen dienen, berücksichtigen jedoch nicht die jeweiligen Standortspezifika. Die vom Land Brandenburg in Kooperation mit dem DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse durchgeführte Studie zur Dekarbonisierung der Industrie in Ostbrandenburg (DIO) soll diese Informationslücke schließen.

Die Beantwortung der Fragen wird ca. 10-15 Minuten in Anspruch nehmen. Wir danken Ihnen für Ihre Unterstützung!

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr. **Uwe Riedel** | Direktor

Institut für CO₂-arme Industrieprozesse (DI) | Walther-Pauer-Straße 5 | 03046 Cottbus
Gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie des Landes Brandenburg

1. Zu welcher Branche zählt Ihr Unternehmen?

Bitte Zutreffendes anklicken!

- Stahl- und metallverarbeitende Industrie
- Zement- und Baustoffindustrie
- Chemische Industrie und Raffinerien
- Energiesektor
- Glasindustrie
- Papier- und holzverarbeitende Industrie
- Getränke- und Lebensmittelindustrie
- Sonstiges

2. Wie viele Mitarbeiter (MA) sind in Ihrem Unternehmen beschäftigt?

- < 9 MA
- < 49 MA
- < 249 MA
- > 250 MA

3. Dürfen wir Sie für weitere Fragen im Nachgang kontaktieren?

- Ja, Kontaktdaten:
- Nein, Teilnahme anonym

4. **Haben Sie Anregungen, Fragen oder Wünsche, die Sie an uns richten möchten?**
5. **Welche der nachfolgend genannten Dekarbonisierungsmaßnahmen sind für Ihren Standort relevant?**

Bitte Zutreffendes auswählen bzw. nicht genannte Maßnahmen unter Sonstiges ergänzen!

- Energetische Optimierung (z. B. Wärmerückgewinnung)
 - Umstellung auf alternative Prozessrouten (Technologiewechsel)
 - Weiterverarbeitung oder Speicherung von CO₂ (CCU/CCS)
 - Erhöhung des Anteils an Recyclingmaterial im Produktionsprozess
 - Einsatz alternativer, Grüner Brennstoffe (z. B. Biomasse, Wasserstoff)
 - Elektrifizierung energieintensiver Prozessschritte
 - Entwicklung nachhaltigerer Produkte (Sustainable product designs)
 - Sonstiges
6. **Welche der nachfolgend genannten Dekarbonisierungsmaßnahmen sind an Ihrem Standort bereits realisiert worden?**
 - Energetische Optimierung (z. B. Wärmerückgewinnung)
 - Umstellung auf alternative Prozessrouten (Technologiewechsel)
 - Weiterverarbeitung oder Speicherung von CO₂ (CCU/CCS)
 - Erhöhung des Anteils an Recyclingmaterial im Produktionsprozess
 - Einsatz alternativer, Grüner Brennstoffe (z. B. Biomasse, Wasserstoff)
 - Elektrifizierung energieintensiver Prozessschritte
 - Entwicklung nachhaltiger Produkte (Sustainable product designs)
 - Sonstiges
 7. **Streben Sie für Ihren Standort eine eigene Versorgung mit Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien an? Wenn ja, welche der nachfolgend genannten Maßnahmen ist für Sie relevant?**
 - Photovoltaik
 - Windkraft
 - Wasserkraft
 - Einsatz von Biomasse
 - Solarthermie
 - Geothermie
 - Sonstige Maßnahme
 - Keine der oben genannten Optionen ist zutreffend. Es ist keine eigene Versorgung mit Strom und Wärme geplant.
 8. **Wo sehen Sie die Hürden, um Anlagen zur Erzeugung erneuerbaren Energien an ihrem Standort zu errichten?**
 - Hohe Investitionskosten

- Fehlende Planungssicherheit (bspw. zeitaufwendige Genehmigungsprozesse oder hohe rechtliche Hürden)
- Fehlende politische Rahmenbedingungen
- Fehlende gesellschaftliche Akzeptanz
- Mangel an geeigneten Freiflächen
- Sonstiges

9. Ist der Einsatz von Grünem Wasserstoff für Ihren Standort relevant? Wenn ja, wie könnte die Wasserstoffnutzung in Zukunft aussehen?

- Stoffliche Nutzung in chemischen Reaktionen (z. B. als Reduktionsmittel oder Grundchemikalie)
- Energetische Nutzung zur Stromerzeugung
- Energetische Nutzung zur Wärmeerzeugung
- Nutzung als Energiespeicher (z. B. zur Verbesserung der Versorgungssicherheit)
- Der Einsatz von Grünem Wasserstoff wird nicht angestrebt

10. Wie schätzen Sie die Möglichkeit der Elektrifizierung von Produktionsprozessen für Ihren Standort ein?

- Die Produktion kann vollständig elektrifiziert werden.
- Die Produktion kann nur teilweise elektrifiziert werden.
- Eine vollständige Elektrifizierung der Produktion ist nicht möglich

11. Was sind die limitierenden Faktoren für die Elektrifizierung von Produktionsprozessen an Ihrem Standort?

- Hohe Investitionskosten
- Fehlende Planungssicherheit
- Unzureichende Anschlusskapazität
- Fehlende Energieinfrastruktur
- Sonstiges

12. Ziehen Sie Recycling (bspw. Aus Produktionsabfällen) als Option zur weiteren Energieeinsparung bzw. zur Dekarbonisierung Ihres Betriebs in Betracht?

- Ja
- Noch unklar
- Nein

13. Wo sehen Sie grundsätzlich derzeit die größten Hürden hinsichtlich der Energiewende/Dekarbonisierung?

- Hohe Investitionskosten
- Fehlende Planungssicherheit (bspw. zeitaufwendige Genehmigungsprozesse oder hohe rechtliche Hürden)
- Fehlende politische Rahmenbedingungen (klar strukturierte Roadmap)
- Fehlende gesellschaftliche Akzeptanz hinsichtlich des Ausbaus von erneuerbaren Energien
- Fehlende gesellschaftliche Akzeptanz hinsichtlich Umgangs mit CO₂
- Mangel an geeigneten Freiflächen (z. B. EE-Ausbau)
- Mangel an geeigneten Sekundärmaterialien mit entsprechender Qualität
- Fehlende Versorgungssicherheit (Grüner Strom, alternative Brennstoffe)
- Fehlender Infrastrukturausbau
- Sonstiges

14. Wie kann die Infrastruktur um Ihren Standort im Hinblick auf die Energiewende verbessert werden?

- Ausbau der Gas-Infrastruktur (z. B. Grüner Wasserstoff)
- Ausbau des regionalen Stromnetzes
- Ausbau der Verkehrswege-Infrastruktur (Gütertransport)
- Ausbau der Wärme-Infrastruktur (Fernwärme)
- Ausbau der Energiespeicher-Infrastruktur
- Sonstiges

Spezifisch Stahl- und metallverarbeitende Industrie

15. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Direktreduktion auf Wasserstoffbasis
- Direktreduktion auf Basis von Erdgas im Schachtofen (z. B. MIDREX, HYL III oder PERED)
- Direktreduktion auf Basis von Erdgas über Wirbelschichtreaktor (z. B. Circored, Circofer oder FINMET)
- Direktreduktion im Drehrohrofen auf Basis von Kohle (z. B. SL/RN oder SL/RN-Xtra)
- Schmelzreduktion (z. B. Corex, Finex oder HiSarna)
- Elektrifizierung des Schmelzprozesses (Elektrolichtbogenofen)
- Erhöhung des Schrotteinsatzes
- Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)
- Einsatz nachwachsender Rohstoffe (z. B. Bio-Koks)
- Erzeugung von Eisenschwamm über Direktreduktion von Hüttenreststoffen im Drehherdofen (INMETCO)
- Partielles Einblasen von Reduktionsmittel (z. B. Wasserstoff) in die Schmelzzone des Hochofens

- Sonstiges

16. Welche alternativen Reduktionsmittel planen Sie für die Stahlproduktion einzusetzen?

- Grüner Wasserstoff
- Türkiser Wasserstoff
- Blauer Wasserstoff
- Grauer Wasserstoff
- Biokoks/-kohle
- Sonstiges

17. Welche Energieeinsparmaßnahmen (bspw. Wärmerückgewinnung) haben für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Optimierung des Hüttengasverbundes
- Gichtgasrückführung
- Gasrezirkulation an der Sinteranlage
- Abwärmenutzung der Sinteranlage
- Kokstrockenkühlung zur Abwärmenutzung der Koksofenanlage
- Abwärmenutzung brennstoffbeheizter Anlagen
- Abwärmenutzung des Konvertergases
- Abwärmenutzung des LBO-Abgases (z. B. zur Schrottvorwärmung)
- Fernwärmeauskopplung (z. B. für chem. Industrie oder kommunale Versorgung)
- Endabmessungsnahes Gießen
- Optimierung der hüttenwerkseigenen Kraftwerke
- Optimierung elektrischer Antriebe
- Sonstiges

18. Sehen Sie Forschungsbedarf hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung an Ihrem Standort?

- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
- Wärmerückgewinnung aus Hochofenschlacke
- Methanbasierte Direktreduktion
- Wasserstoff-Suspensionsreduktion
- Hydrogen Plasma Smelting Reduction Process (HPSR)
- Elektrolytische Eisengewinnung (ULCOWIN)
- Eisenelektrolyse (ULCOLYSIS)
- Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf.

19. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Optimierung des Klinkerfaktors
- Nutzung dekarbonisierter Einsatzstoffe (z. B. gemahlener Brechsand aus dem Gebäudeabbruch)
- Substitution von Kohle/Petrolkoks durch Erdgas zur Feuerung des Drehrohrs
- Erhöhung des biogenen Anteils bei der Brennerfeuerung CCUS
- Optimierte Ofendesign und intelligente Abgasführung
- Einsatz energieeffizienter Mahlaggregate
- Abwärmenutzung der Klinkerherstellung
- Sonstiges

20. Falls Ihre Dekarbonisierungsstrategie CCUS beinhaltet, welchen Ansatz ziehen Sie generell in Betracht?

- Geologische Speicherung
- Mineralisierung von CO₂ (Bewitterung von Altbeton)
- Injektion des abgeschiedenen CO₂ in Frischbeton
- Erzeugung von Biomasse (z. B. CO₂-Einsatz zur Verbesserung des Pflanzenwachstum in Treibhäusern oder zur Kultivierung von Mikroalgen)
- Erzeugung von foodgrade CO₂
- Power-to-Gas
- Power-to-Liquid

21. Welche Rohstoffalternativen sind für Ihren Standort bzgl. der weiteren Reduzierung der prozessbedingten Emissionen der Zementherstellung relevant?

- Kalzinierte Tone
- Puzzolan
- Kalksteinmehl
- Landwirtschaftliche Rückstände (z. B. Reishülsenasche oder Silikastaub)
- Sekundärrohstoffe (z. B. Ziegelmehle aus dem Gebäudeabbruch)
- Sonstiges

22. Sehen Sie Forschungsbedarf hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung an Ihrem Standort?

- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
- Neue Bindemittel (z. B. Geopolymere, CSA-Zemente, Zement auf Basis von MgO, Carbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten))
- Einsatz von Wasserstoff/Ammoniak zur Brennerfeuerung
- Elektrifizierung der Klinkerherstellung

- Erweiterte Abwärmenutzung (z. B. ORC-Anlagen)
- Alternative Zusatzstoffe in Mehrkomponentenzementen
- CO₂-optimierter Beton
- Erweiterter Einsatz von Recyclingmaterialien
- Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf

Spezifisch Chemische Industrie und Raffinerien

23. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Grundsätzliche Dekarbonisierung der standortspezifischen Energie- und Wärmequellen
- Substitution fossiler Kohlenstoffquellen durch nachhaltige Alternativen (z. B. Naphtha aus Biomasse)
- CCUS auf Basis produktionsbedingter Abgase
- CCUS auf Basis von Nebenprodukten der Hauptverfahren
- CCUS auf Basis von aus der Umgebungsluft abgetrenntem CO₂
- Substitution konventioneller Reduktionsmittel durch klimafreundliche Alternativen (z. B. Grüner Wasserstoff)
- Nachhaltige Dampf- und Stromerzeugung
- Erweiterte Kreislaufwirtschaft (z. B. chemisches Recycling von Kunststoffabfällen zur Synthese von Olefinen und Aromaten)
- Elektrifizierung von Produktionsprozessen (z. B. elektrische Beheizung v. Steamcrackeranlagen)
- Sonstiges

24. Welche alternativen Brennstoffe ziehen Sie in Betracht?

- Grüner Wasserstoff
- Wasserstoffbeimischung in Erdgas
- Biomassebasierte Brennstoffe
- Siedlungsabfälle
- Klärschlamm
- Sonstiges

25. Welche Energieeinsparmaßnahmen haben für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Optimierung elektrischer Antriebe
- Ausbau stationärer Energiespeicher
- Optimierung der Frisch- bzw. Brauchwasseraufbereitung
- Erzeugung elektrischer Energie durch Wärmerückgewinnung (z. B. ORC-Anlagen)
Wärmerückgewinnung durch den Einsatz von Wärmepumpen
- Recycling von Produktionsrückständen
- Kreislaufführung von Kohlenstoffquellen

- Sonstiges
- 26. Sehen Sie Forschungsbedarf hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung an Ihrem Standort?**
- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
 - Nachhaltige Herstellung von Olefinen und Aromaten
 - Nachhaltige Methanolsynthese
 - Synthetisches Naphtha (z. B. durch Pyrolyse von Kunststoffabfällen)
 - Entwicklung neuartiger katalytischer Materialien (z. B. Ethylendarstellung mittels Elektrokatalyse)
 - Weiterentwicklung der Methanpyrolyse
 - Weiterentwicklung der Hochtemperatur (Feststoffoxid)
 - Elektrolyse zur Wasserstoffgewinnung aus Prozessdampf
 - Entwicklung von thermochemischen Prozessen zur Wasserstoffgewinnung
 - Entwicklung photokatalytischer Prozesse (z. B. photokatalytische Wasserspaltung)
 - Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf

Spezifisch Energiesektor

- 27. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?**
- Ausbau erneuerbarer Energien
 - Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)
 - Erhöhung des biogenen Anteils bei der Brennerfeuerung
 - Erhöhung des Sekundärbrennstoffanteils bei der Brennerfeuerung
 - Substitution fossiler Brennstoffe durch Green Fuels
 - Ganzheitliche Betrachtung und Optimierung von Prozessen
 - Ganzheitliche Betrachtung der Power-to-X Technologien
 - Gezielter Einsatz von KWK-Anlagen als Brückentechnologie
 - Sonstiges
- 28. Welche Energieeinsparmaßnahmen haben für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?**
- Sektorenkopplung
 - Erweiterte Digitalisierung (Smart Grid)
 - Modernisierung der Verteilernetze
 - Ausbau von stationären Energiespeichern
 - Erweiterte Abwärmenutzung
 - Erweiterte Kreislaufwirtschaft
 - Optimierung elektrischer Antriebe
 - Erweiterung des Freileitungsmonitorings
 - Sonstiges

29. Welchen Forschungsbedarf sehen Sie hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung?

- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
- Sektorenkopplung zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit (z. B. Elektromobilität)
- Technologien zur Energiespeicherung (z. B. Batteriespeicher)
- Optimierung der vorhandenen Technologien zur Erzeugung von Grünem Wasserstoff
- Integration solarthermischer Kraftwerke zur Stromerzeugung
- Großflächige Anwendung der petrothermalen Geothermie
- Optionen zur hinreichenden Elektrifizierung von energieintensiven Industrieprozessen (z. B. Elektroschmelzen)
- Optimierung der vorhandenen Power to Liquid (PtL) Technologien
- Nutzung von Reststoffen aus der Landwirtschaft (z. B. Stroh) zur Erzeugung von Bioethanol
- Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf.

Spezifisch Glasindustrie

30. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Brennerfeuerung durch alternative Energieträger (z. B. Wasserstoffbeimischung)
- Einsatz biomassebasierter Brennstoffe zur Brennerfeuerung
- Elektrifizierung der Glasschmelzwanne (z. B. Hybridschmelzwanne)
- Erweiterte Abwärmenutzung (z. B. Wärmebereitstellung zur Vorwärmung von Einsatzstoffen)
- Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)
- Erhöhung des Altglaseinsatzes
- Einsatz nachwachsender Rohstoffe (z. B. Reishülsenasche) im Glasgemenge
- Sonstiges

31. Welche alternativen Brennstoffe ziehen Sie für die Brennerfeuerung der Glasschmelzwanne derzeit in Betracht?

- Reiner Wasserstoff
- Wasserstoffbeimischung in Erdgas
- Biomassebasierte Brennstoffe
- Sonstiges

32. Welche Maßnahmen zur Dekarbonisierung, insbesondere auch CCUS-Technologien, ziehen Sie an der Glasschmelzwanne generell in Betracht?

- Hybridglasschmelzwanne (80 % mit Grünem Strom, 20 % mit Erdgas betrieben)
- Vollständig elektrifizierte Glasschmelzwanne

- Oxyfuel Glasschmelzwanne
- Geologische Speicherung (CCS)
- Power-to-Gas
- Power-to-Liquid

33. Sehen Sie Forschungsbedarf hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung an Ihrem Standort?

- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
- Auswirkungen des Wasserstoffeinsatzes bei der Brennerfeuerung auf die Glasqualität
- Vollständige Elektrifizierung der Glasschmelzwanne, insbesondere bei großen Glasschmelzwannen (z. B. Behälterglasindustrie)
- Alternative Glasgemenge
- Optimierung der Sammelsysteme zur Erhöhung des Altglaseinsatzes
- Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf

Spezifisch Papier- und Holzverarbeitende Industrie

34. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS)
- Erhöhung des Biomasseeinsatzes als Energieträger bei der Energie-/Dampferzeugung
- Erhöhung des Altpapiereinsatzes durch effiziente Kreislaufwirtschaft
- Einsatz nachwachsender Rohstoffe (z. B. Miscanthus)
- Elektrifizierung der Produktionsprozesse
- Brennerfeuerung der KWK-Anlage durch Grüne Gase (z. B. Grüner Wasserstoff)
- Kontaktlose elektrische/wasserstoffbasierte Trocknung
- Einsatz einer Hochtemperaturwärmepumpe
- Einsatz von ORC-Anlagen zur Stromerzeugung aus Abwärme
- Sonstiges

35. Welche Energieeinsparmaßnahmen haben für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Wärmerückgewinnung aus der Trocknungsanlage
- Abwärmenutzung brennstoffbeheizter Anlagen
- Fernwärmeauskopplung (z. B. für kommunale Versorgung)
- Vergasung von Schwarzlauge
- Optimierung elektrischer Antriebe
- Kompressionsmahlung
- Optimierter Materialeinsatz (z. B. durch Einsatz neuartiger Faserstrukturen)
- Nachfrageseitige Flexibilität bei der Papierproduktion
- Sonstiges

36. Sehen Sie Forschungsbedarf hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung an Ihrem Standort?

- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
- Einsatz tief eutektischer Lösungsmittel zur Energieeinsparung
- Einsatz von Lignin zur Produktion von Plattformchemikalien in Bioraffinerien
- Einsatz der tiefen Geothermie zur Wärmebereitstellung für die Papiertrocknung
- Einsatz der Solarthermie zur Wärmebereitstellung für die Papiertrocknung
- Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf

Spezifisch Getränke und Lebensmittelindustrie

37. Welche Dekarbonisierungsmaßnahme hat für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Stromversorgung auf Basis erneuerbarer Energien
- Ganzheitliche Betrachtung und Optimierung von Produktionsprozessen
- Etablierung von fortschrittlichen Trocknungstechnologien
- Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen zur Wärme- bzw. Kälteerzeugung
- Umstellung von Fuhrparks auf Elektrofahrzeuge
- Etablierung innovativer Logistikkonzepte
- Etablierung regionaler Wertschöpfungsketten
- Nachhaltiges Verpackungsmaterial
- Etablierung einer erweiterten Kreislaufwirtschaft (z. B. Einführung von Pfandsystemen)
- Sonstiges

38. Welche Energieeinsparmaßnahmen haben für Ihren Standort derzeit oberste Priorität?

- Wärmerückgewinnungsmaßnahmen bei Trocknungs- und Kälteanlagen
- Abwärmenutzung brennstoffbeheizter Anlagen (z. B. durch ORC-Analgen)
- Fernwärmeauskopplung (z. B. für kommunale Versorgung)
- Errichtung von Energiespeichern
- Optimierung elektrischer Antriebe
- Optimierung der Abwasseraufbereitung
- Sonstiges

39. Sehen Sie Forschungsbedarf hinsichtlich konkreter Fragestellungen zur Energiewende bzw. Dekarbonisierung an Ihrem Standort?

- Ja, ich sehe Forschungsbedarf hinsichtlich:
- Technologien zur stationären Energiespeicherung
- Technologien zur Abwärmenutzung
- Digitalisierung der Produktion (Industrie 4.0)
- Optimierung von Automatisierungs- und Steuerungssystemen
- Nein, ich sehe keinen konkreten Forschungsbedarf

Anhang B: Auswertung Fragebogen

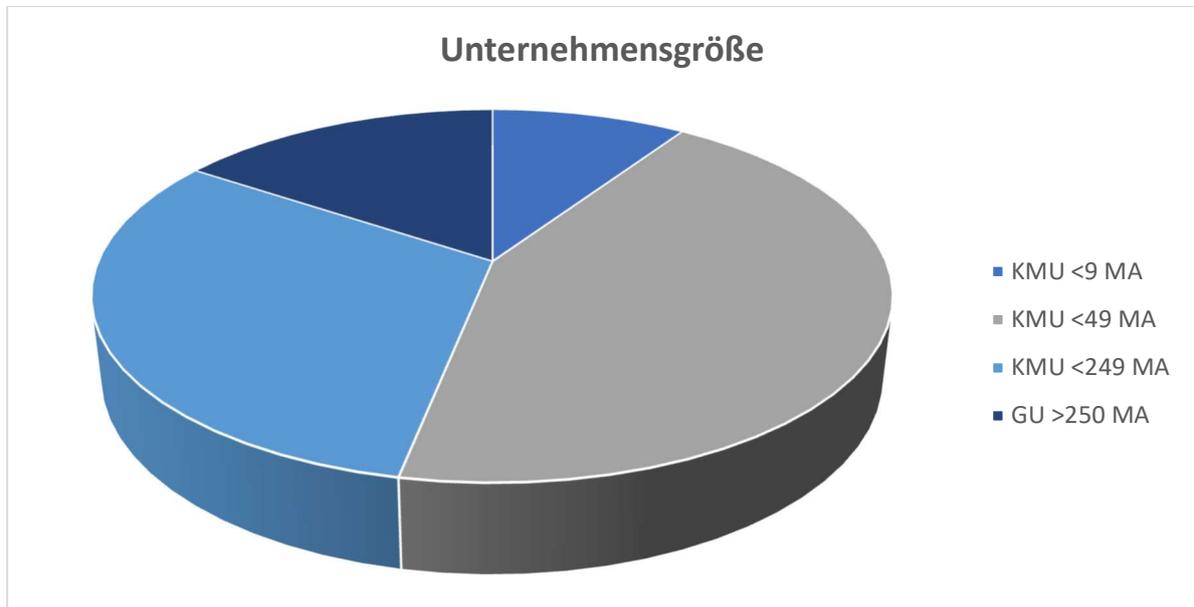


Abbildung 32: Darstellung der Unternehmensgröße der Unternehmen mit Rückmeldung.

Die Antworten werden mit „wenig relevant“, „unrelevant“, „relevant“, „sehr relevant“ und „äußerst relevant“ gewichtet. Die Summe aller Antworten beträgt 100%. In den folgenden Abbildungen sind die Antworten der Kategorien „relevant“, „sehr relevant“ und „äußerst relevant“ zusammengefasst.

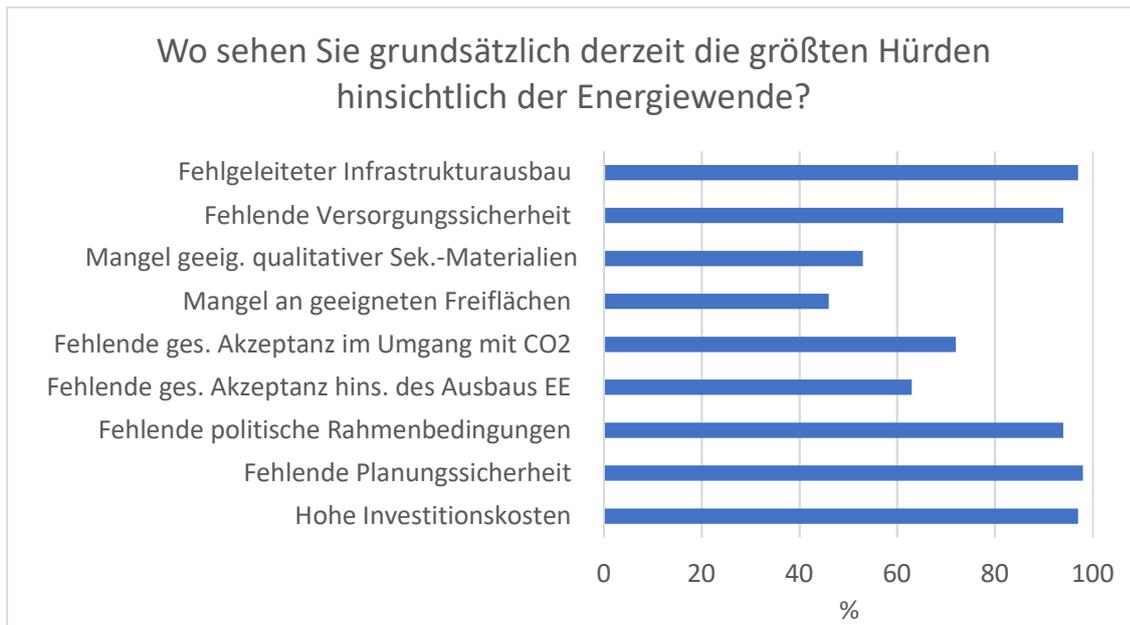


Abbildung 33: Antwort auf die Frage 13.

Stahlindustrie

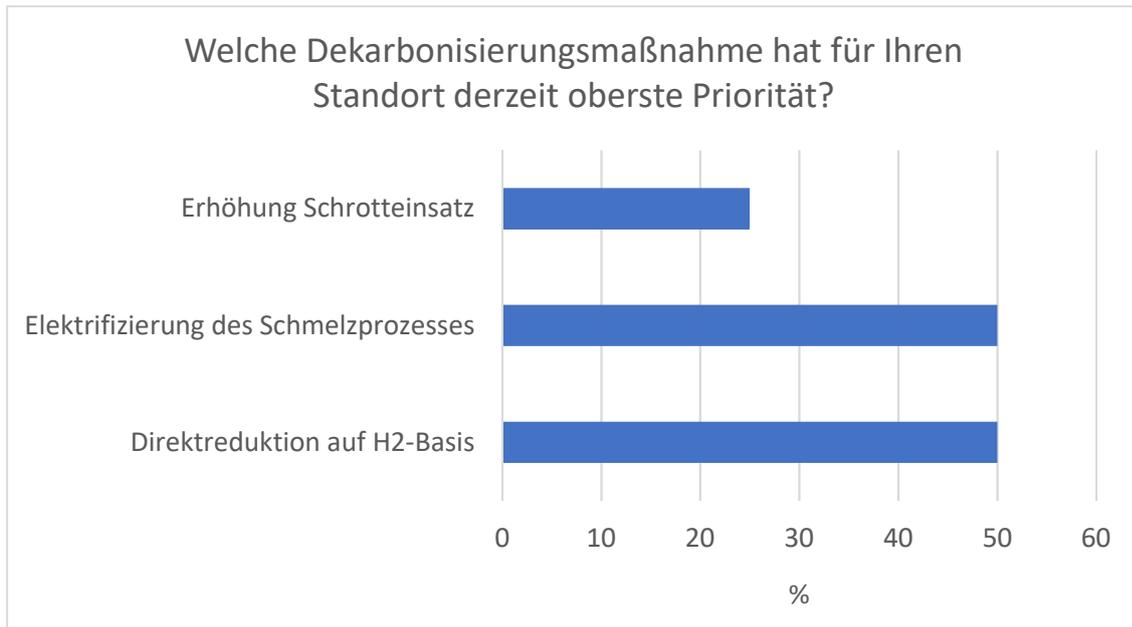


Abbildung 34: Antwort auf die Frage 15.

Chemische Industrie

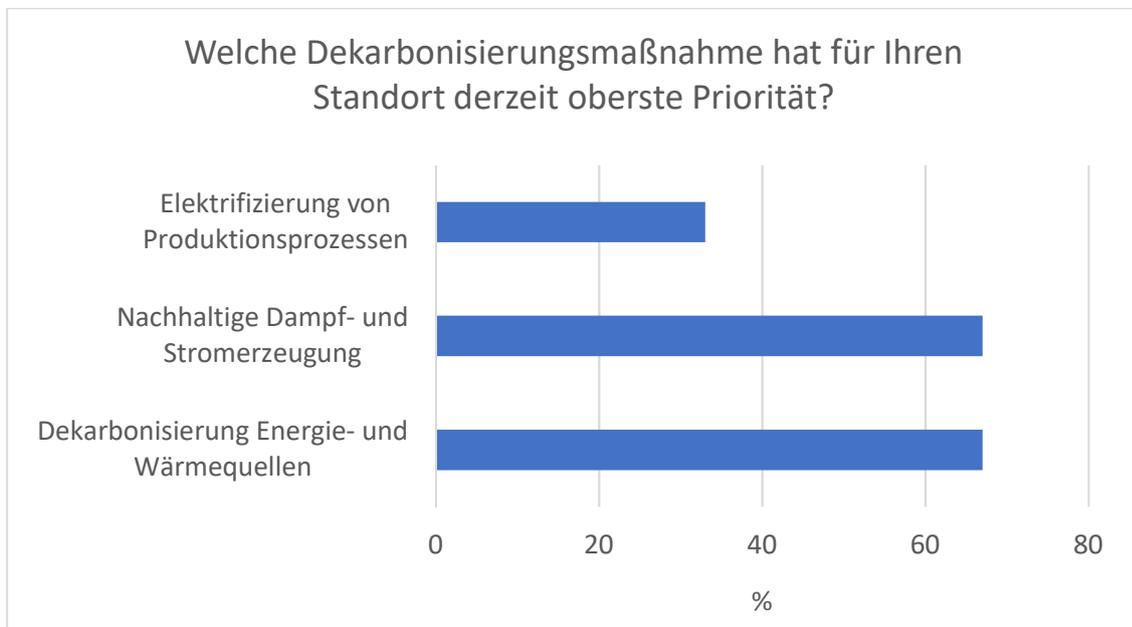


Abbildung 35: Antwort auf die Frage 22.

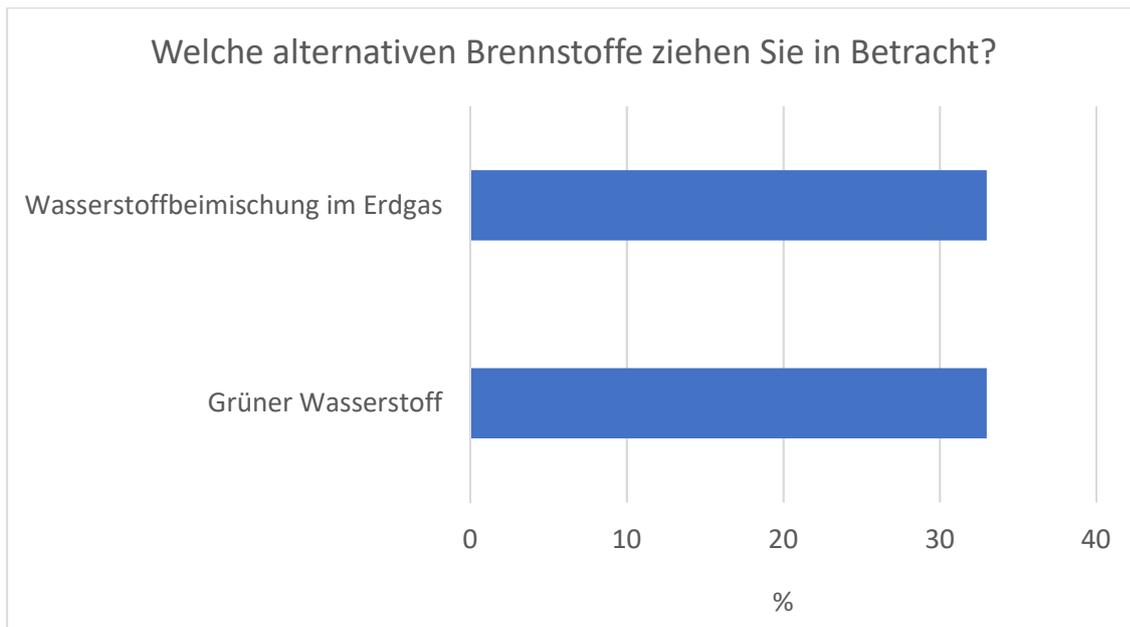


Abbildung 36: Antwort auf die Frage 23.

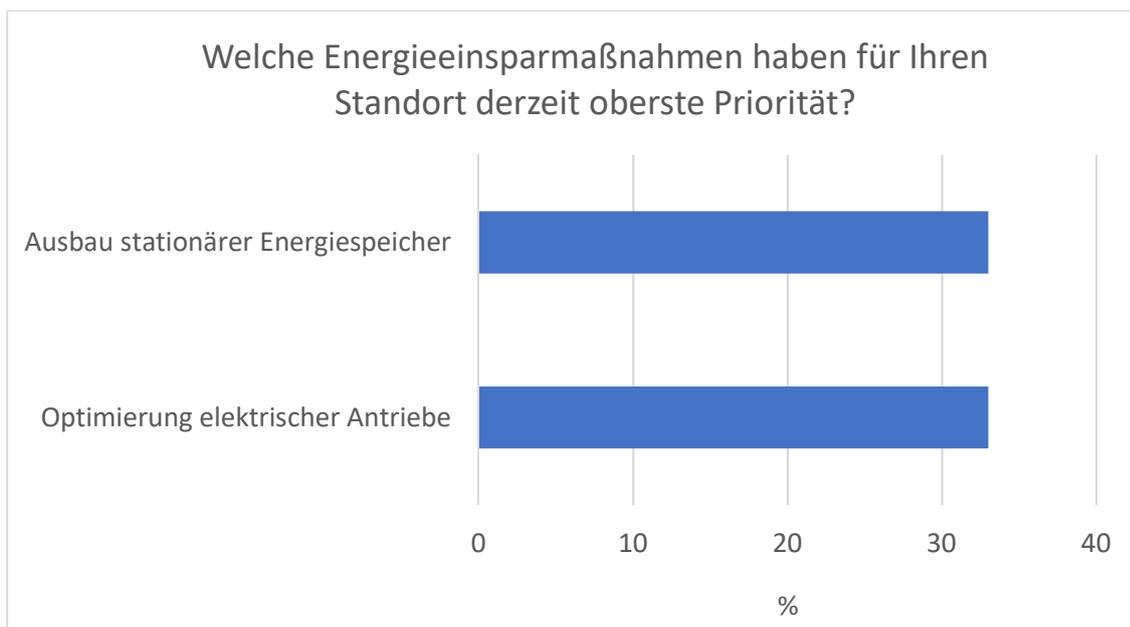


Abbildung 37: Antwort auf die Frage 24.

Energiesektor

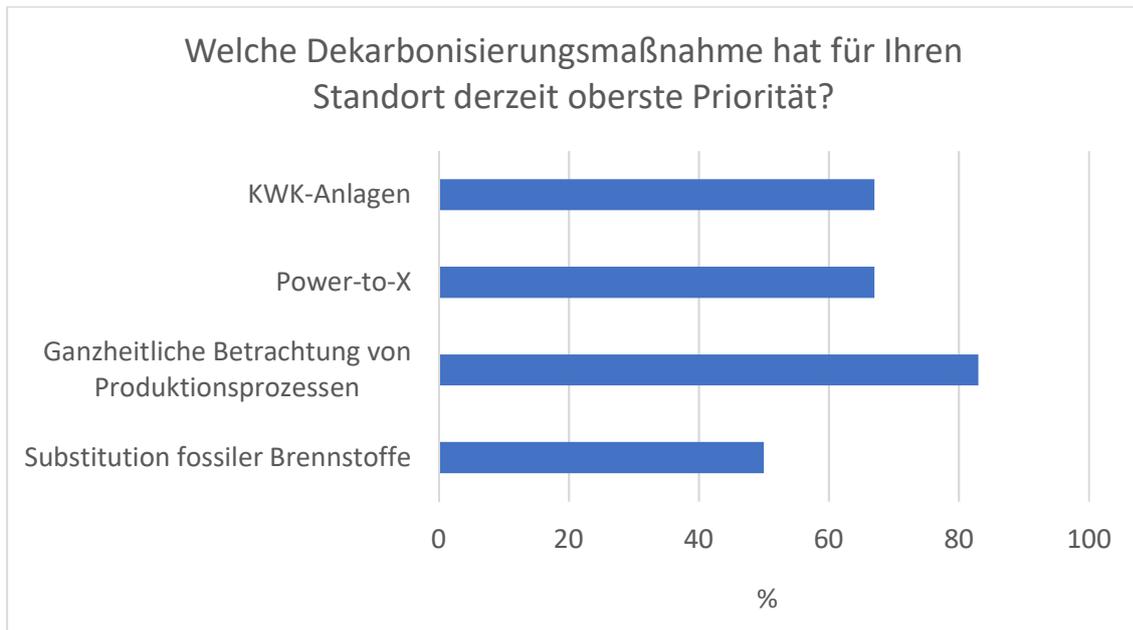


Abbildung 38: Antwort auf die Frage 26.

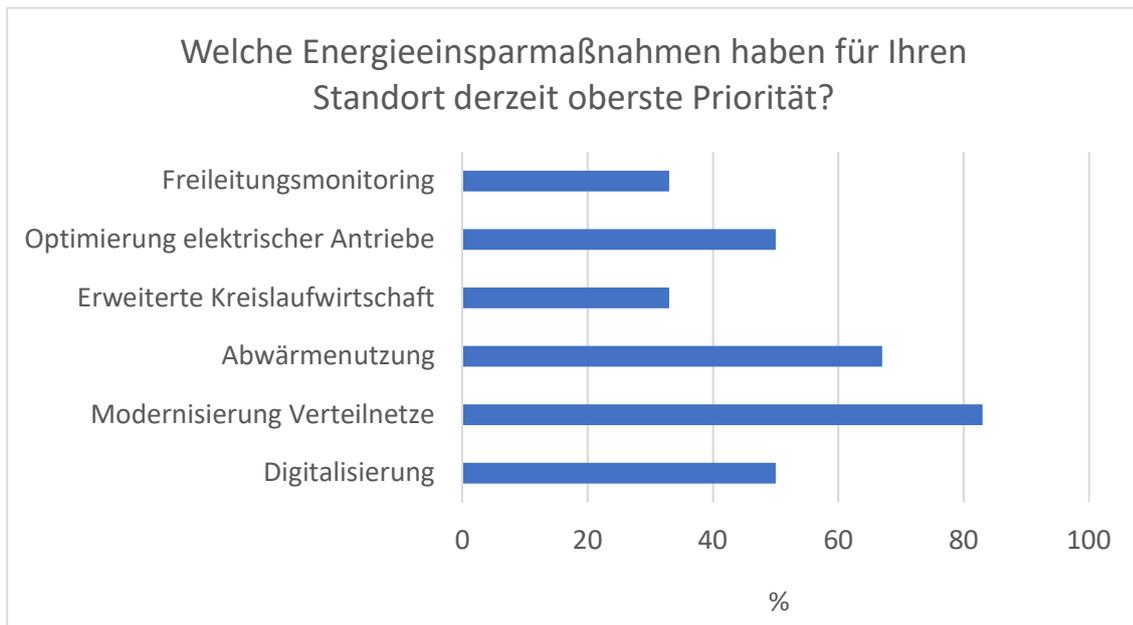


Abbildung 39: Antwort auf die Frage 27.

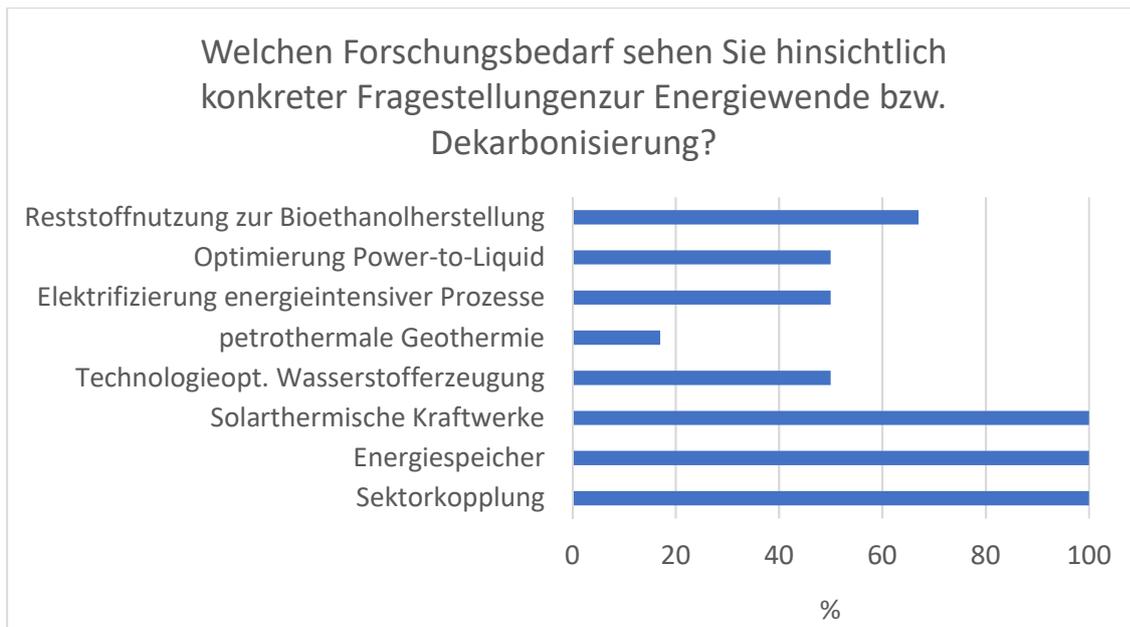


Abbildung 40: Antwort auf die Frage 28.

Getränke – und Lebensmittelindustrie

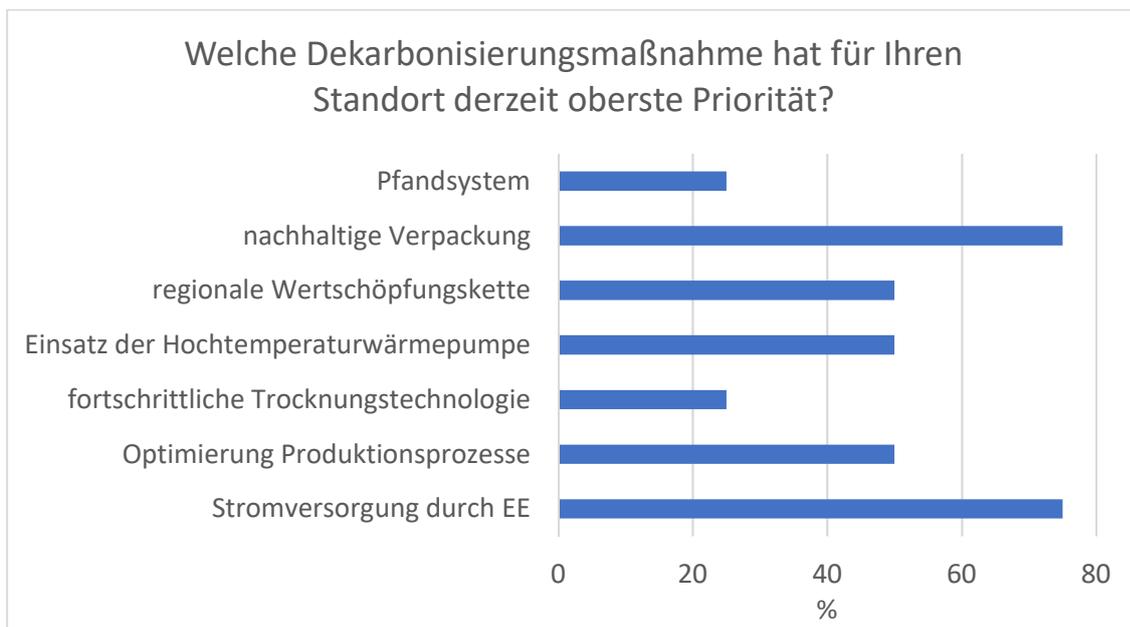


Abbildung 41: Antwort auf die Frage 36.

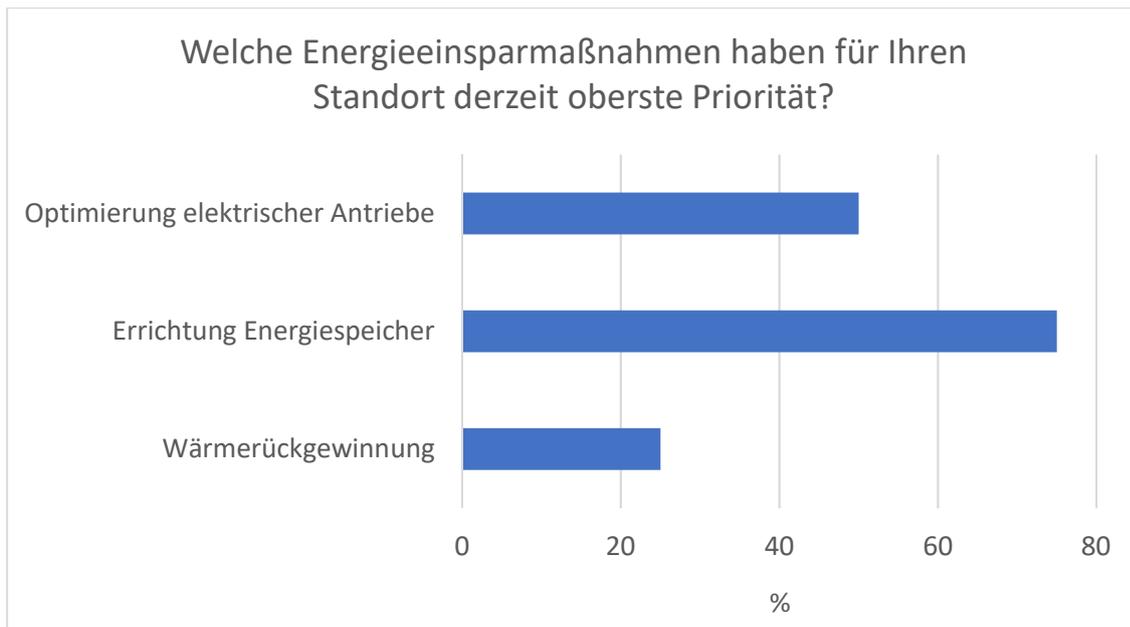


Abbildung 42: Antwort auf die Frage 37.

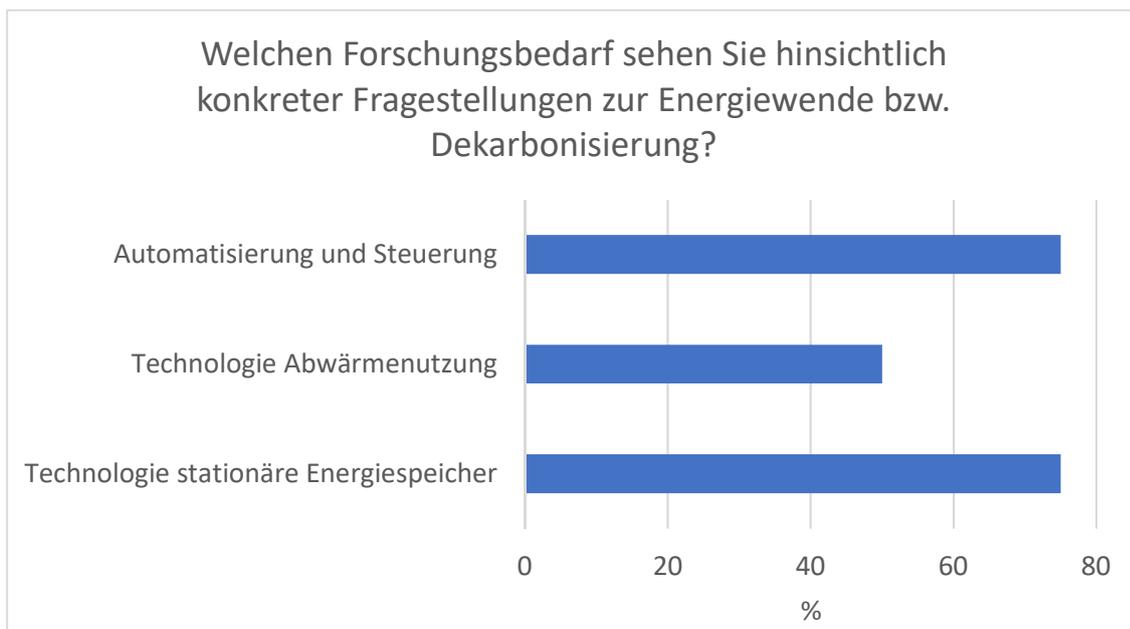


Abbildung 43: Antwort auf die Frage 38.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiestrategie des Landes Brandenburg (MWAE, 2023) [30].....	5
Abbildung 2: Übersicht der CO ₂ -intensiven Produktionsstandorte in Brandenburg, zur besseren Vergleichbarkeit in zwei separate Grafiken aufgeteilt und getrennt nach Emissionen abgebildet, eigene Darstellung.....	7
Abbildung 3: Zusammenfassung der CO ₂ -Emissionen für die ausgewählte Industriebranchen in Brandenburg, eigene Darstellung.	8
Abbildung 4: Übersicht zu den wichtigsten Prozessrouten der Stahlerzeugung [4], DRI - Direct Reduced Iron - meist Eisenschwamm, HBI - Hot Briquetted Iron – brikettierter poröser Eisenschwamm.....	9
Abbildung 5: Aufgliederung der CO ₂ -Emissionen auf die verschiedenen Teilprozesse entlang der Konverterstahlroute [5].	10
Abbildung 6: Fließbild zur Zementproduktion,eigene Darstellung nach [11].....	11
Abbildung 7: Fließbild zur Glasproduktion, eigene Darstellung nach [17]	12
Abbildung 8: Übersicht zur Papierindustrie und Produktionsmengen für 2015, eigene Darstellung.....	13
Abbildung 9: Destillation von Rohöl als Haupttrennprozess in der Erdölraffinerie eigene Darstellung nach [22].	15
Abbildung 10: Übersicht zu den Unternehmen der Metall-, Eisen- und Stahlindustrie in Ost-Brandenburg, (Gießereien und Stahlumformung ist nicht in DEHSt gelistet, Deutsche Emissionshandelsstelle [1]), eigene Darstellung.	20
Abbildung 11: Übersicht zu den Unternehmen der Zement- und Baustoffindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	22
Abbildung 12: Übersicht zu den Unternehmen der Glasindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.....	23
Abbildung 13: Übersicht zu den Unternehmen der Papier- und holzverarbeitenden Industrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	24
Abbildung 14: Übersicht zu den Unternehmen der chemischen Industrie in Ost-Brandenburg, (Oberflächenbeschichtung und Kunststoffherstellung teilweise nicht in DEHSt [1] gelistet) eigene Darstellung.....	26
Abbildung 15: Übersicht zu Unternehmen der Getränke- und Lebensmittelindustrie in Brandenburg, (Getränke- und Lebensmittelindustrie ist nicht in DEHSt gelistet), eigene Darstellung.	27
Abbildung 16: Übersicht zu Unternehmen des Energiesektors in Brandenburg, eigene Darstellung.	28
Abbildung 17: Dekarbonisierungsoptionen der Stahlindustrie.	32
Abbildung 18: Dekarbonisierungsoptionen der Zementindustrie.....	34
Abbildung 19: Dekarbonisierungsoptionen der Glasindustrie.	36
Abbildung 20: Dekarbonisierungsoptionen der Papierindustrie.....	39
Abbildung 21: Dekarbonisierungsoptionen der Chemischen Industrie.	40
Abbildung 22: Dekarbonisierungsoptionen der Getränke- und Lebensmittelindustrie	43
Abbildung 23: Antwort auf die Frage 5.	45
Abbildung 24: Antwort auf die Frage 6.	46
Abbildung 25: Antwort auf die Frage 7.	47
Abbildung 26: Antwort auf die Frage 9.	47
Abbildung 27: Antwort auf die Frage 8.	48
Abbildung 28: Antwort auf die Frage 13.	48
Abbildung 29: Antwort auf die Frage 14.	49
Abbildung 30: Maßnahmen und die daraus resultierenden CO ₂ -Emissionen des Gesamtwerks. WP ARA: Wärmepumpe mit Abwärme aus der Abwasserreinigungsanlage. CC:	

Kohlenstoffdioxidabscheidung. NG: Erdgas. Mix: Strombezug nach derzeitigem Netzmix. reg.: Bezug regenerativen Stroms.	63
Abbildung 31: Darstellung der Unternehmensgröße der Unternehmen mit Rückmeldung.	83
Abbildung 32: Antwort auf die Frage 13.	83
Abbildung 33: Antwort auf die Frage 15.	84
Abbildung 34: Antwort auf die Frage 22.	84
Abbildung 35: Antwort auf die Frage 23.	85
Abbildung 36: Antwort auf die Frage 24.	85
Abbildung 37: Antwort auf die Frage 26.	86
Abbildung 38: Antwort auf die Frage 27.	86
Abbildung 39: Antwort auf die Frage 28.	87
Abbildung 40: Antwort auf die Frage 36.	87
Abbildung 41: Antwort auf die Frage 37.	88
Abbildung 42: Antwort auf die Frage 38.	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Kohlekraftwerken nach Dampfeigenschaften, eigene Darstellung nach [23].	17
Tabelle 2: Übersicht über die spezifischen Kohlenstoffdioxid Emissionsfaktoren der unterschiedlichen Kraftwerkstechnologien, eigene Darstellung nach [25].	17
Tabelle 3: Unternehmen der Metall-, Eisen- und Stahlindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	19
Tabelle 4: Unternehmen der Zementindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	21
Tabelle 5: Unternehmen der Glasindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	22
Tabelle 6: Unternehmen der Papierindustrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	23
Tabelle 7: Unternehmen der chemischen Industrie in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	24
Tabelle 8: Unternehmen der Getränke- und Lebensmittelindustrie in Brandenburg, eigene Darstellung.	27
Tabelle 9: Unternehmen des Energiesektors in Ost-Brandenburg, eigene Darstellung.	28

Glossar

ARA	Abwasserreinigungsanlagen
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftreinigung, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
CC	CO ₂ Abtrennung (Carbon Capture)
CCF	CO ₂ -Fußabdruck (Corporate Carbon Footprint)
CCS	CO ₂ -Abscheidung und Speicherung (Carbon Capture and Storage)
CCU	CO ₂ -Abscheidung und Nutzung (Carbon Capture and Utilization)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CEPI	Confederation of European Paper Industries
COP	(Coefficient of Performance)
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DI - SVD	Abteilung Simulation und virtuelles Design des DLR-Institutes für CO ₂ -arme Industrieprozesse
DIP	Druckfarbenentfernung (Deinking-Process)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V.
DRI	Direktreduktion (Direct Reduced Iron)
DZW	Dampfzustandswandler
EAF	Elektrolichtbogenofen (Electric Arc Furnance)
EBS	Ersatzbrennstoff
EE	Erneuerbare Energien
E-Filter	Elektrofilter
ENRTL-RK	Nichtzufälliges Elektrolyt-Zwei-Flüssigkeits-Modell mit Redlich-Kwong-Gleichung (Electrolyte Non-Random-Two-Liquid model with Redlich Kwong equation)
el.	Elektrische
F&E	Forschung und Entwicklung
FRST	Faserreststoff
FSK	Feststoffkessel
GHG	Treibhausgase (Greenhouse Gas)
GU	Großunternehmen
GuD	Gas- & Dampfkraftwerke

GWK	Großraumwasserkessel
H ₂	Wasserstoff
HBI	Brikettierter poröser Eisenschwamm (Hot Briquetted Iron)
HDK	Hochdruckkessel
HDU	Hochdruckdampfumformer (spezifischer DZW)
HEL	Leichtes Heizöl
HEX	Wärmeübertrager (heat exchanger)
HIK	Hilfsstoffkessel
HKW	Heizkraftwerk
HTWP	Hochtemperatur-Wärmepumpe
JTF	Just Transition Fund)
KMU	Kleine und Mittelständische Unternehmen
kV	Kilovolt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LAL	unbeladenes Lösungsmittel (Lean Amine Loading)
LNG	Liquefied Natural Gas
MA	Mitarbeiter
MEA	Monoethanolamin (Lösungsmittel für CC)
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
MVR	Brüdenverdichtung (Mechanical Vapor Recompression)
MWAE	Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie (Land Brandenburg)
NDU	Niederdruckdampfumformer (spezifischer DZW)
NTP	Nachtrockenpartie (Komponente der PM)
OCC	Stoffaufbereitungsanlage (Old Corrugated Container)
ORC	Organic Rankine Cycle
PCC	Gefällte Calciumcarbonate (Precipitated Calcium Carbonate)
PEM	Proton-Exchange-Membrane
PM	Papiermaschine
ppm	parts per million

ppmv	parts per million volume
Q2	Medianwert
Q3	75. Perzentil oder Oberes Quartil
RAL	Beladenes Lösungsmittel (Rich Amine Loading)
RC	Recycling
STAB	Stoffaufbereitung
T	Turbine
THG	Treibhausgase
TOE	Zehe (siehe 10 Zehenmodell)
TRL	Technologiereifegrad (Technology readiness level)
UPM	Firmenname, ehemaliger Betreiber der PM11
VTP	Vortrockenpartie (Komponente der PM)
WP	Wärmepumpe
WSK	Wirbelschichtkessel
WÜ	Wärmeübertrager