

Potenzialanalyse der Fördermaßnahme CO₂-WIN

- Methodische Handreichung -



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

C E N T E R F O R
E N V I R O N M E N T A L
S Y S T E M S
R E S E A R C H

CO₂WIN

Nachhaltig Kohlenstoff nutzen

Impressum

Autoren

Simon Kaiser, Finn-Erik Digulla, Stefan Bringezu

Herausgeber

Center for Environmental Systems Research (CESR)
Universität Kassel
Wilhelmshöher Allee 47
34117 Kassel
www.cesr.de

Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Referat 726 – Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung
Fördermaßnahme: *CO₂ als nachhaltige Kohlenstoffquelle – Wege zur industriellen Nutzung (CO₂-WIN)*
Förderkennzeichen: 033RC016B

Betreuung

Dr. Ole Mallow, Dr. Julian Brüning
Projektträger Jülich
Projektträgerschaft Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, Geoforschung

Bildnachweise

Adobe Stock

Bezug

Dieses Dokument ist ebenfalls online verfügbar. DOI: 10.17170/kobra-202201205574

Nähere Infos finden Sie außerdem unter: www.cesr.de und www.co2-utilization.net

Stand

1. Auflage, Januar 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Zielsetzung und Motivation	2
2. Methodik	2
2.1 Untersuchungsrahmen	2
2.3 Ökologischer und ökonomischer Vergleich	3
2.4 TRL aktuell und zukünftig	4
2.5 Indikatoren	4
2.6 Datenbedarf und -quellen.....	7
3. Referenz-technologien und Märkte.....	8
4. Szenarioanalyse.....	10
4.1 Energie	10
4.2 CO ₂	11
4.3 Roh- und Abfallstoffe	12
4.4 Fläche Solarkollektoren	13
4.5 Wirtschaftliche Entwicklung.....	14
5. Nächste Schritte	15
Literaturverzeichnis	16
Anhang	19

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abstufung der Potenzialberechnung.	3
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bottom-up Potenzialberechnung.	4
Abbildung 3: Übersicht der verschiedenen Datenquellen.	7
Abbildung 4: Geplanter zeitlicher Ablauf des weiteren Vorgehens.	15

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bruttowertschöpfung auf unterschiedlichen Skalenebenen.	6
Tabelle 2: Übersicht über die in CO ₂ -Win erzeugten Produkte auf Basis der Projektbeschreibungen.	8
Tabelle 3: Betrachtete Referenzprozesse und aktuelle Marktgrößen.....	9
Tabelle 4: Korridor für die Verfügbarkeit von CO ₂ aus industriellen Punktquellen im Jahr 2050.....	12
Tabelle 5: Annahmen für das aktuelle und zukünftige Vorkommen relevanter Roh- und Abfallstoffe. ...	13
Tabelle 6: Entwicklungsraten für Produktionskapazitäten und Märkte.	14

1. Zielsetzung und Motivation

Die Nutzung von CO₂ als Rohstoff ist ein vielversprechender Weg, um fossilen Kohlenstoff in verschiedensten Anwendungen zu substituieren, emittiertes CO₂ produktiv einzusetzen und Kohlenstoff vermehrt im Kreislauf zu führen (Bringezu et al. 2020a). Im Rahmen der Fördermaßnahme CO₂-WIN wird deshalb in insgesamt 15 verschiedenen Forschungsprojekten untersucht, wie CO₂ als Rohstoff zur Produktion von werthaltigen Produkten eingesetzt werden kann.

Die in den Projekten entwickelten Prozesse weisen dabei ein breites Spektrum an Einsatzstoffen und produzierten Produkten auf. Beispielsweise werden Prozesse zur Herstellung von Basischemikalien und Energieträgern bis hin zu mineralischen Baumaterialien oder Rohstoffen für die Produktion von Lithiumionen Akkus erforscht. Potenziell kann der Einsatz von CO₂ auf zahlreichen Gebieten ökologische Auswirkungen von Industrieprozessen verändern und gleichzeitig zur Wertschöpfung beitragen. Um die möglichen Effekte der Fördermaßnahme in diesen Bereichen zu beziffern, wird im Rahmen der Begleitforschung eine Potenzialanalyse durchgeführt, die das aktuelle und zukünftige ökologische und ökonomische Potenzial sowohl der einzelnen Projekte bzw. ihrer Produkte als auch der gesamten Fördermaßnahme quantitativ abschätzt. Dies dient dazu, vielversprechende Routen der CO₂-Nutzung zu identifizieren sowie vorhandene Hürden und notwendige Maßnahmen zur Erschließung der Potenziale zu eruieren.

In diesem Dokument werden die geplante Herangehensweise zur Potenzialberechnung erläutert und zentrale Annahmen dargestellt. Anschließend wird der benötigte Datenbedarf abgeleitet. Im letzten Drittel der Laufzeit der Fördermaßnahme sollen die von den Projekten bereitgestellten Daten durch die Universität Kassel ausgewertet werden. Durch den Wissens- und Datenaustausch mit und zwischen den Projekten sollen die Einzelprojekte profitieren, die Wirkung der Begleitmaßnahme erhöht werden und die Fördermaßnahme insgesamt an Effektivität

gewinnen. Deshalb dient die Handreichung als Vorgehensbeschreibung und gleichzeitig auch als Diskussionsgrundlage. Gemeinsam mit den Projekten soll eine valide Herangehensweise entwickelt werden, mit deren Hilfe möglichst genaue Potenzialberechnungen vorgenommen werden können.

2. Methodik

2.1 Untersuchungsrahmen

Um das Potenzial der Fördermaßnahme bestimmen zu können, muss der entsprechende Untersuchungsrahmen zunächst sachlich, räumlich und zeitlich sinnvoll definiert und eingegrenzt werden.

Der sachliche Untersuchungsrahmen umfasst für jedes Forschungsprojekt die aktuell angewendete(n) und ggf. auch in Entwicklung befindlichen Referenztechnologie(n) zur Herstellung der jeweiligen Produkte inklusive der entsprechenden Referenzmärkte. Da sämtliche CO₂-WIN Forschungsprojekte in Deutschland angesiedelt sind, kann davon ausgegangen werden, dass die betrachteten Produkte in Deutschland hergestellt und auf den Markt gebracht werden. Aus diesem Grund wurde der deutsche Wirtschaftsraum als Bezugsraum gewählt, weshalb auch die Faktoren, welche das Einsatzpotenzial der neuen Technologien begrenzen können, z.B. die Verfügbarkeit von erneuerbarer Energie oder spezifischen Rohstoffen wie CO₂ oder bestimmter Abfallstoffe, auf nationaler Ebene betrachtet werden sollen. Bezüglich der Absatzmärkte wird davon ausgegangen, dass vor dem Erschließen von Exportmärkten zuerst inländische Märkte versorgt werden. Als zeitlicher Rahmen dient der Zeitraum von 2020 bis 2050, um den Status quo sowie zukünftige Entwicklungsschritte für die in der Fördermaßnahme entwickelten Technologien und der entsprechenden Rahmenparameter zu berücksichtigen. Dazu werden auf Basis von den Daten aus den Forschungsprojekten und aktuellen Studien passende Szenarien entwickelt.

2.2 Potenzialdefinition

Das Potenzial der Projekte sowie der Fördermaßnahme wird bestimmt, indem abgeschätzt wird, welche Veränderungen im

Vergleich zum Status quo mit Hilfe der entwickelten Technologien erreicht werden könnten. Das Potenzial wird dabei weiter unterteilt in *theoretisch*, *technisch*, *ökologisch* und *ökonomisch* (Abbildung 1) und anhand von verschiedenen Indikatoren bewertet.¹

Für das theoretische Potenzial wird davon ausgegangen, dass das gesamte aktuelle und zukünftige Marktvolumen der betrachteten Produkte erschlossen werden kann, ohne weitere Randbedingungen zu berücksichtigen. Für das technische Potenzial werden weitere Faktoren und Einschränkungen, wie z.B. die Verfügbarkeit von Energie und Rohstoffen, als Rahmenparameter berücksichtigt. Zur Berechnung des ökologischen Potenzials ist die Nettoerduktion von Umweltwirkungen eine notwendige Randbedingung. Bei der Berechnung des ökonomischen Potenzials werden nur diejenigen Prozesse berücksichtigt, die ökonomisch wettbewerbsfähig sind. Die unterschiedlichen Potenziale sollen für den Status quo sowie die Jahre 2030 und 2050 berechnet werden. Zusätzlich sollen durch verschiedene Szenarien der Einfluss von veränderten Rahmenparameter auf die Einsatzpotenziale und -grenzen dargestellt werden

2.3 Ökologischer und ökonomischer Vergleich

Die Berechnung der einzelnen Potenziale entspricht dabei einer Bottom-up Analyse, in der, ausgehend von den einzelnen Prozessen und Projekten, das Gesamtpotenzial der Fördermaßnahme unter

Berücksichtigung zusätzlicher Rahmenbedingungen berechnet wird (Abbildung 2). Für die in den Projekten neu entwickelten Prozesse werden die jeweiligen Potenziale bestimmt, indem die Ergebnisse der ökologischen und ökonomischen Analysen mit denen von geeigneten konventionellen und ggf. bereits weiter entwickelten, CO₂-basierten, Prozessen verglichen werden. Pro Produkt sollen so wenn möglich je eine konventionelle und eine weitere, CO₂-basierte, Referenz betrachtet werden. Aus diesen Vergleichen ergeben sich die unterschiedlichen Potenziale, sowohl auf Produkt- als auch auf volkswirtschaftlicher Ebene.

Als Datengrundlage für die Rahmenbedingungen und deren Entwicklung dienen Literaturdaten und eigene Modellierungen, beispielsweise für die Umweltauswirkung der aktuellen und zukünftigen Energiebereitstellung. Für den Prozessvergleich sollen zum einen LCA-Datenbanken und Marktdaten und zum anderen Primärdaten aus den Projekten verwendet werden. Erstere dienen zur Modellierung der Referenzprozesse, während letztere zur Abschätzung der Umweltwirkungen und Produktionskosten der in CO₂-WIN entwickelten Prozesse dienen. Falls von den Projekten keine hinreichend genauen Daten zur Verfügung gestellt werden können, sollen mit Hilfe von Annahmen, beispielsweise zum theoretischen Minimum des Energie- oder Materialbedarf, dennoch erste Abschätzungen getroffen werden. Weiterhin sollen möglichst technologiespezifische Lernkurven

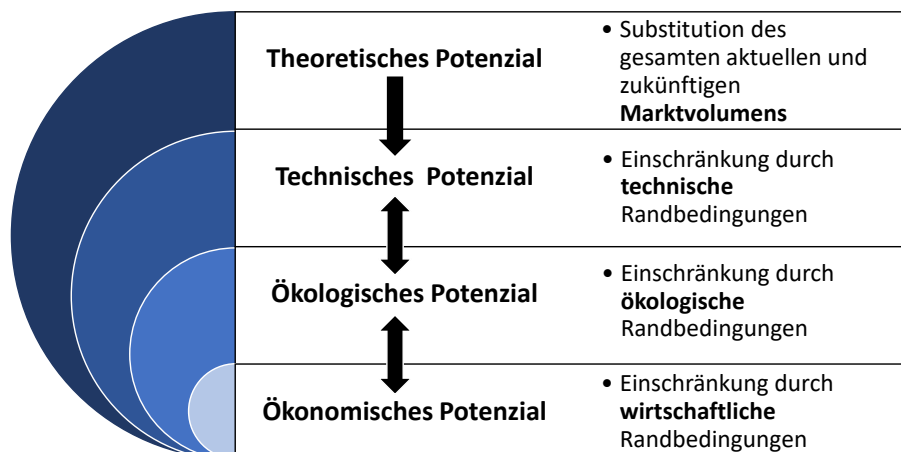


Abbildung 1: Abstufung der Potenzialberechnung.

¹ Eine genauere Erläuterung erfolgt im Abschnitt 2.5.

Methodik

herangezogen werden, um die Entwicklung des Energie- und Materialbedarfs, sowie der Produktionskosten darzustellen. Auf diese Weise können die verschiedenen Einzel- und Gesamtpotenziale für unterschiedliche Zeitpunkte berechnet und Break-even Punkte, beispielsweise für die Energiekosten und CO₂-Zertifikatspreise bestimmt werden.

2.4 TRL aktuell und zukünftig

Der Entwicklungsstand von Technologien hat einen großen Einfluss auf die Aussagekraft der Ergebnisse ökonomischer und ökologischer Analysen (Bergerson et al. 2020). Gleichzeitig kann die Modifikation von Prozessen zu diesem Entwicklungszeitpunkt einen großen Einfluss auf die späteren Umweltwirkungen im marktreifen Zustand haben, genauso wie für die späteren Produktionskosten und konkrete Absatzmärkte (Moni et al. 2020). Zur Einstufung des Entwicklungsstandes wird der Technological Readiness Level (TRL) verwendet.

Während für Technologien, die bereits etabliert sind oder sich näher an der Marktreife befinden (TRL > 6), in der Regel detaillierte Daten zu Prozessen und Anlagenaufbau zur Verfügung stehen oder erhoben werden können, stehen für Technologien in früheren Entwicklungsstadien häufig nur Prozessdaten aus Laborexperimenten zur Verfügung. Gleichzeitig können über das spätere Anlagendesign nur sehr begrenzt Aussagen

getroffen werden, da noch keine Hochskalierung und Prozessoptimierung durchgeführt worden sind.

Da die in der Fördermaßnahme entwickelten Technologien voraussichtlich einen TRL > 4 nicht erreichen werden, bestehen Herausforderungen in der Vergleichbarkeit der untersuchten Technologien mit bestehenden Technologien und dem Treffen von Annahmen für eine Hochskalierung. Um die reifegradbedingten Unsicherheiten möglichst zu reduzieren und eine Vergleichbarkeit mit bestehenden Technologien zu ermöglichen sollen zum einen theoretische Grenzwerte betrachtet sowie Relevanzanalysen durchgeführt werden um diejenigen Parameter zu identifizieren, welche potenziell die größten Umweltwirkungen und Kosten verursachen (Roh et al. 2020). Anschließend sollen unter Berücksichtigung von Lernkurven und in Absprache mit den Projekten mögliche Entwicklungspfade beschrieben werden, um so eine Vergleichbarkeit mit etablierten Technologien zu ermöglichen.

2.5 Indikatoren

Um die möglichen Beiträge der Fördermaßnahme bewerten zu können, sollen aussagekräftige und einschlägige Indikatoren verwendet werden, die auch bereits in anderen Bereichen zum Einsatz kommen. Wichtig für die Potenzialanalyse ist hierbei, dass die Indikatoren auf Basis der gleichen Annahmen und Berechnungsgrundlagen auf unterschiedlichen Skalenebenen berechnet werden können. Zur Berechnung und Bewertung der

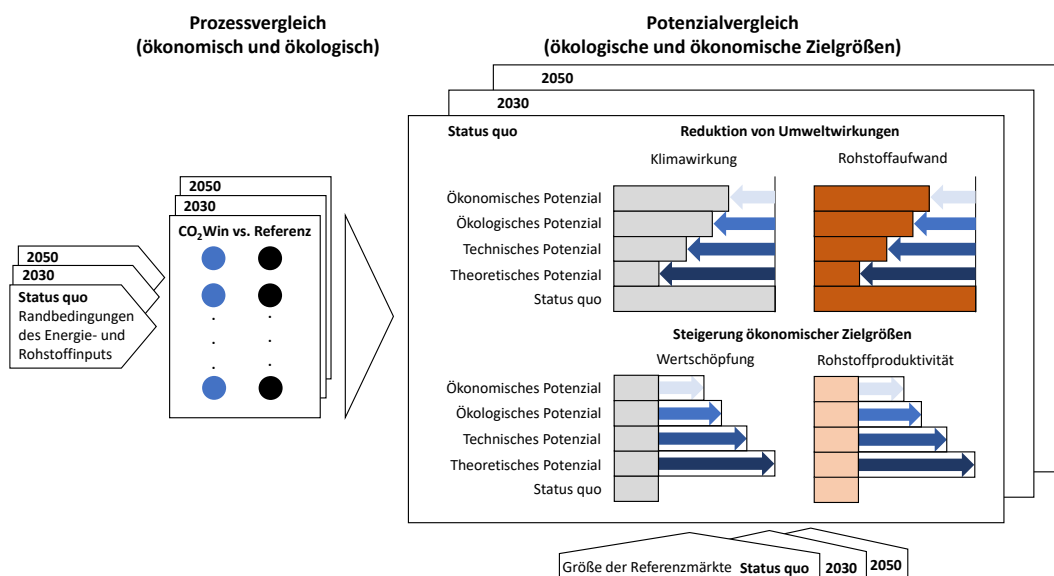


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Bottom-up Potenzialberechnung.

Methodik

Potenziale werden deshalb entsprechende ökologische und ökonomische sowie hybride Indikatoren aus der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2021) verwendet, die ebenfalls für die Lebenszyklusbewertung von Prozessen und Produkten zum Einsatz kommen. Auf diese Weise können die potenziellen Beiträge der Fördermaßnahme aufgezeigt und mit nationalen Kennzahlen und Zielwerten ins Verhältnis gesetzt werden.

Da die Nutzung von CO₂ sowohl klimatechnische als auch rohstoffliche Aspekte aufweist, wird bei der Wahl der Indikatoren ein Fokus auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen, der eingesetzten Menge an Primärrohstoffen sowie die Steigerung der Rohstoffproduktivität und der Bruttowertschöpfung gelegt. Im Folgenden werden die verwendeten Indikatoren und die entsprechenden politisch vorgegebenen Zielwerte näher erläutert.

2.5.1 Klimawirkung

Die Klimawirkung der Technologien wird mit Hilfe des Indikators des *Global Warming Impact (GWI)* gemessen. Der GWI kann auf unterschiedlichen Skalenebenen (Prozess, Produkt, sektoral, national, etc.) Auskunft über die Höhe der jeweiligen Klimawirkung, gemessen in kg CO₂-Äquivalenten (kg CO₂-eq), geben. Hierfür werden innerhalb des Untersuchungsrahmens sämtliche emittierten Treibhausgase bilanziert. Mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren wird anschließend die Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase auf die Klimawirkung von CO₂ bezogen und ein aggregierter Indikator berechnet (Stocker et al. 2014). Auf diese Weise können die Ergebnisse auf unterschiedlichen Skalen miteinander verglichen und ins Verhältnis gesetzt werden.

Bezogen auf die nationalen Emissionen von Treibhausgasen werden als aktueller Wert 810 Mt CO₂-eq (2020) und als politisch gesetzter Zielwert 437 Mt CO₂-eq (2030)² herangezogen. Für das Jahr 2050 wird davon ausgegangen, dass

² Entspricht einer Reduktion von 65 % im Vergleich zum Basisjahr 1990.

Klimaneutralität, also eine ausgeglichene Treibhausgasbilanz, erreicht wird.

2.5.2 Aufwand an Primärrohstoffen

Der Aufwand an biotischen und abiotischen Primärrohstoffen, welcher für Prozesse oder die Herstellung von Produkten benötigt wird, gibt Auskunft über die Höhe der Umweltbelastungen, welche mit der Prozesskette von deren Abbau über die Verarbeitung bis zur Entsorgung verbunden sind. Er wird im Rahmen der Potenzialanalyse mit Hilfe des Raw Material Inputs (RMI) bestimmt. Dabei werden sämtliche Rohstoffinputs bilanziert und mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren die gesamte Menge an der genutzten Materialextraktion berechnet. Da der Indikator sowohl in Lebenszyklusanalyse als auch in der Umweltökonomischen Gesamtrechnung eingesetzt wird, kann der Beitrag einzelner Prozesse zur Verbesserung der Gesamtsituation valide dargestellt werden, analog zur Klimawirkung. Für eine detaillierte Beschreibung des Indikators siehe (Bringezu et al. 2019) sowie (Mostert and Bringezu 2019). Die Verwendung des RMI auf volkswirtschaftlicher Ebene wird in (BMUB 2016) erläutert.

Im Status quo (2020) wird für den nationalen RMI ein Wert von 2,6 Gt Rohstoffäquivalente³ angenommen. Der Zielwert für das Jahr 2030 wird von dem gesetzten Ziel für die Entwicklung der *Gesamtrohstoffproduktivität (GRP)* abgeleitet. Hierfür hat die Bundesregierung im Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess II) im Jahr 2016 das Ziel gesetzt, dass sie weiterhin steigen soll. In den Jahren 2000 bis 2010 nahm die GRP bereits um durchschnittlich rund 1,6 % jährlich zu. Ein solch positiver Trend soll bis zum Jahr 2030 fortgesetzt werden (BMUB 2016; Bundesregierung 2021). Unter Annahme eines konstanten Wachstums des BIP von 1 % pro Jahr ergibt sich ein Zielwert von 2,5 Gt Rohstoffäquivalenten im Jahr 2030. Über das Jahr 2030 hinaus liegt noch keine politische Zielsetzung vor, weshalb im Rahmen der Potenzialanalyse angenommen wird, dass sich der

³ Der Wert für 2020 wurde auf Basis des von Lutter et al. (2018) bestimmten Wertes für 2014 unter Hinzunahme der Werte für die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität und des BIP nach Destatis (2021) berechnet.

für den Zeitraum zwischen 2020 und 2030 vorgegebene Trend bis zum Jahr 2050 fortsetzt was zu einem Wert von 2 Gt Rohstoffäquivalenten im Jahr 2050 führt.

2.5.3 Bruttowertschöpfung

Allgemein wird mit dem Begriff Bruttowertschöpfung der mit Hilfe von Verarbeitungs- und Veredelungsprozessen zusätzlich geschaffenen ökonomischen Wert für Produkte oder Dienstleistungen bezeichnet. Sie errechnet sich folglich aus dem Gesamtwert der im Produktionsprozess erzeugten Waren und Dienstleistungen (Produktionswert) zu Herstellungspreisen, abzüglich dem Wert sämtlicher Vorleistungen, also der im Produktionsprozess verbrauchten, verarbeiteten oder umgewandelten Waren und Dienstleistungen. Die erhaltenen Subventionen werden ebenfalls abgezogen (Destatis 2021).

Die Bruttowertschöpfung kann auf unterschiedlichen Skalenebenen berechnet werden, wobei die Abgrenzung zwischen Vorleistung und Produktionsprozess je nach Skalierungsebene variiert (Tabelle 1). Dadurch kann der Beitrag einzelner Prozesse auf volkswirtschaftlicher Ebene dargestellt werden. Auf Produktebene werden lediglich die Kosten für die im Produktionsprozess eingesetzten Materialien und Dienstleistungen von den Herstellkosten abgezogen. Auf nationaler Ebene entspricht dies dem Wert der produzierten Güter und Dienstleistungen einer Volkswirtschaft, vermindert um den Wert sämtlicher importierten Materialien, Zwischenprodukte und Dienstleistungen sowie Subventionen.

Als Ziel für die deutsche Volkswirtschaft wurde eine „stetige sowie umwelt- und sozialverträgliche

Steigerung der Wirtschaftsleistung“ formuliert, ohne die jährliche Steigerung zu quantifizieren (Bundesregierung 2021). Für die in CO₂-WIN entwickelten Technologien soll dementsprechend berechnet werden, ob und ggf. unter welchen Bedingungen eine Steigerung der produktbezogenen oder gesamtdeutschen Bruttowertschöpfung erreicht werden kann.

2.5.4 Gesamtrohstoffproduktivität

Die (Gesamt-)Rohstoffproduktivität ist ein hybrider Indikator, der ökonomische und ökologische Größen ins Verhältnis setzt, um Auskunft über die ökonomische Effizienz eines Rohstoffeinsatzes zu geben, also welche Menge an Rohstoffen zur Erwirtschaftung von einer zusätzlichen monetären Einheit benötigt werden.

Zur Berechnung der Rohstoffproduktivität werden das preisbereinigte Bruttoinlandsprodukt und der dafür benötigte direkte Einsatz von abiotischen Materialien ins Verhältnis gesetzt (BMUB 2016; Lutter et al. 2018). Darauf aufbauend stellt die GRP die Summe aus preisbereinigtem Bruttoinlandsprodukt (BIP) und dem monetären Wert der Importe (Rohstoffe und Vorprodukte) dem dazu benötigten Primärrohstoffaufwand gegenüber (Herausgeber: Umweltbundesamt Deutschland; BMUB 2016). Im Vergleich zur Rohstoffproduktivität werden ökonomischer Seite die Werte von Importen und auf ökologischer Seite sämtliche Rohstoffflüsse entlang des Wertschöpfungsprozesses zusätzlich berücksichtigt. Dadurch kann beurteilt werden, wie produktiv Rohstoffe über den gesamten Lebensweg eingesetzt werden.

Als Zielwert für den Indexwert der GRP der deutschen Volkswirtschaft wird vorgegeben, den Trend aus dem Zeitraum zwischen den Jahren 2000

Tabelle 1: Bruttowertschöpfung auf unterschiedlichen Skalenebenen.

Skalierungsebene	Berechnung
Produkt	Herstellkosten – Materialkosten
Unternehmen	Umsatz – Vorleistungen
Sektor	Summe der Bruttowertschöpfung aller Unternehmen eines Sektors
National	Summe der Bruttowertschöpfung aller Sektoren; Alternativ: Bruttoinlandsprodukt (BIP) – Gütersteuern + Gütersubventionen

Methodik

und 2010, eine mittlere jährliche Steigerung von 1,6 %, bis zum Jahr 2030 fortzusetzen. Als Basisjahr dient das Jahr 2000, wodurch sich für das Jahr 2030 ein Zielwert von 160 ergibt (BMUB 2016; Destatis 2021). Analog zum RMI existiert für die GRP kein konkreter Zielwert über das Jahr 2030 hinaus, weshalb eine Trendfortschreibung angenommen wird und sich für das Jahr 2050 ein Zielwert von 220 ergibt.

2.6 Datenbedarf und -quellen

Für die Umsetzung der beschriebenen Potenzialanalyse werden je nach Rechenschritt und Skalenebene unterschiedliche Datenquellen herangezogen (Abbildung 3). So werden die Referenzprozesse und -märkte mit Hilfe der Projektdatenblätter bestimmt. Anschließend

werden diese sowie die relevanten Hintergrundprozesse (z.B. das zugrundeliegende Energiesystem) unter Nutzung von LCA-Datenbanken und Literaturdaten modelliert. Für die Bestimmung der Marktgröße und -entwicklung werden offizielle Statistiken und sektorspezifische Studien herangezogen. Zur Modellierung des Status quo der in den Projekten entwickelten Prozesse und möglicher, weiterer Entwicklungsschritte sollen entsprechende Daten mit Hilfe von Onlinefragebögen abgefragt werden. In den folgenden Kapiteln werden nun die bisher identifizierten Referenzen, die Annahmen für die Hintergrundprozesse und Szenarien sowie ein beispielhafter Fragebogen für die Datenabfrage beschrieben.

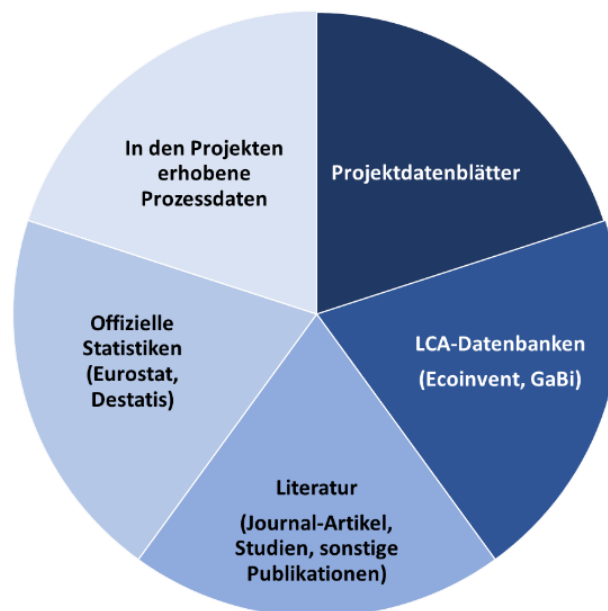


Abbildung 3: Übersicht der verschiedenen Datenquellen.

3. Referenz- technologien und Märkte

Die Identifikation von passenden Referenzprozessen und -märkten ist elementar für eine möglichst hohe Genauigkeit der Potenzialberechnung. Im ersten Schritt wurden entsprechenden Produkte ausgehend von den Projektbeschreibungen ausgewählt (Tabelle 2). Darauf aufbauend wurden die entsprechenden Referenzprozesse identifiziert (Tabelle 3). Für den Fall, dass es sich um ein neuartiges Produkt ohne exakte Referenz handelt, wurde ein Produkt als Referenz gewählt, welches möglichst die gleiche Funktion erfüllt.

Die Daten zur Modellierung der Referenzprozesse stammen entweder aus LCA-Datenbanken oder aus Fachliteratur. Werden die Einzelprodukte in einem Projekt nicht isoliert voneinander, sondern in Form einer Kuppelproduktion hergestellt, soll nach gängigen Regeln der Ökobilanzierung eine Subdivision der Prozesse unter Berücksichtigung der Aufbereitungsenergie vorgenommen werden. Ist dies nicht möglich mit einer

Systemraumerweiterung gearbeitet oder nach einem Referenzprozess gesucht werden, der einen vergleichbaren Kuppelprozess darstellt (DIN EN ISO 2021).

Um das absolute Potenzial der neuen Prozessrouten zu bestimmen, muss zusätzlich die nationale Nettoproduktionsmenge einbezogen werden. Zur Berechnung des theoretischen Potenzials wird dabei angenommen, dass die in CO₂-WIN entwickelten Prozesse den gesamten deutschen Inlandsverbrauch bedienen werden und die bisherigen Produktionsrouten vollständig ersetzen. Die im Status quo ersetzbare Menge ergibt sich demnach aus der aktuellen Bruttoproduktionsmenge in Deutschland, korrigiert um das Außenhandelsaldo. Die aktuelle Höhe des deutschen Inlandsverbrauchs für die in CO₂-WIN betrachteten Produkte ist ebenfalls in Tabelle 3 dargestellt. Um die zukünftige Entwicklung der Nachfrage zu beschreiben, sollen möglichst marktspezifische Trendfortschreibungen angenommen werden. Sollten einzelne Produkte das Potenzial haben, neben den genannten Primärmärkten auch Sekundärmärkte zu erschließen, also weitere am Markt etablierten Produkte in ihrer Funktion zu ersetzen, sollen diese ggf. als weitere Referenz mit eigenen Marktgrößen in die Potenzialanalyse aufgenommen werden. Ein Beispiel wäre die Verwendung von CO₂-basierter

Tabelle 2: Übersicht über die in CO₂-Win erzeugten Produkte auf Basis der Projektbeschreibungen.

Projekt	Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3
Bio-UGS	Methan (als Speichergas)		
C ² inCO ₂	Zementklinker	Beton	
CO ₂ -LiPriSek	Lithiumcarbonat	Geopolymere	
CO ₂ SimO	Methan	Wasserstoffperoxid	
CORA	CO ₂	Ggf. Kohlenwasserstoffe	
DEPECOR	Kohlenwasserstoffe	Sauerstoff	
GAMES	Methan	Polyhydroxybuttersäure	Isopropanol
HtCoEl	Synthesegas		
NuKoS	Zementfreie Fertigbauteile	Zementfreie, pelletierte Materialien	Calciumcarbonat
PhasKat	Ethylen	Ethanol	
PlasCO ₂	Kohlenstoffmonoxid		
PRODIGY	Kohlenwasserstoffe	Synthesegas	
ProMet	Methanol	Propylen	
Transformate	Polyhydroxybuttersäure	Ameisensäure	Crotonsäure

Referenztechnologien

Ameisensäure als neuartige Plattformchemikalie. Auf deren Basis hergestellte Polymere könnten beispielsweise anteilig klassische Kunststoffe ersetzen, welche bisher auf Basis von Naphtha hergestellt werden.

Tabelle 3: Betrachtete Referenzprozesse und aktuelle Marktgrößen für die in CO₂-WIN Projekten erzeugten Produkte (MTO = Methanol-to-Olefines; RWGS = Reverse Water Gas Shift)

Produkt	Referenzprozess (konventionell)	Referenzprozess (CO ₂ -basiert)	Inlandsverbrauch [Mt/a]
Ameisensäure	Synthese aus CH ₃ OH und CO	Direktsynthese aus CO ₂ und H ₂	0,36 (Destatis 2018; UNdata 2018d)
Calciumcarbonat	Fällung mit CO ₂	-	0,6 (WITS 2019c, 2018c)
Crotonsäure	Keine Prozessdaten vorliegend	Keine Prozessdaten vorliegend	unbekannt
Ethanol	Alkoholische Gärung (Weizen) und Aufkonzentrierung	Synthese durch Mikroorganismen aus CO ₂ und H ₂	1,7 (BDBe 2021; UNdata 2018b, 2018a; Destatis 2018)
Ethylen	Steamcracking von Naphtha	MTO-Synthese mit CO ₂ -basiertem Methanol	5,0 (VCI 2020)
Isopropanol	Hydrierung von Propylen	Keine Prozessdaten vorliegend	unbekannt
Kohlenstoffdioxid	Direct air capture, Aminwäsche	-	1,3 (WITS 2019a, 2019b; Destatis 2018)
Kohlenstoffmonoxid	Abscheidung aus Synthesegas	Keine Prozessdaten vorliegend	unbekannt
Lithiumcarbonat	Fällung aus Sole; Lösung mit Schwefelsäure aus Erzen	Keine Prozessdaten vorliegend	0,004 (DERA 2017; Junne et al. 2020)
Methan	Erdgasgewinnung	Direktsynthese aus CO ₂ und H ₂	59,2 (bp 2021)
Methanol	Synthese aus erdgasbasiertem Synthesegas	Direktsynthese aus CO ₂ und H ₂	2,6 (VCI 2020; WITS 2018a, 2018b)
Polyhydroxybuttersäure	Produktion basierend auf Glukosebasis	Keine Prozessdaten vorliegend	Unbekannt
Propylen	Steamcracking von Naphtha	MTO-Synthese mit CO ₂ -basiertem Methanol	4,5 (VCI 2020)
Sauerstoff	Luftabscheidung	-	8,2 (WITS 2019d; VCI 2020; UNdata 2018e)
Saisonale Energiespeicherung	Fossile Erdgasproduktion und unterirdische Speicherung	Direktsynthese von Methan aus CO ₂ und H ₂ und unterirdischer Speicherung	unbekannt
Synthese Gas	Dampfreformierung	RWGS unter Nutzung von	unbekannt

4. Szenarioanalyse

Bei den in der Fördermaßnahme entwickelten Technologien und Prozessen handelt es sich naturgemäß um solche, die sich noch auf einem relativ niedrigen Entwicklungsniveau befinden. Bis zu einer möglichen Marktreife sind weitere Entwicklungs- und Skalierungsschritte nötig, die voraussichtlich mehrere Jahre in Anspruch nehmen werden. Neben der eigentlichen Prozessentwicklung werden sich in diesem Zeitraum auch bereits existierende Technologien und Systeme sowie die dazugehörigen Märkte weiterentwickeln, die einen nennenswerten Einfluss auf die Bewertung der Prozesse haben können. Dazu gehört beispielsweise das zugrundeliegende Energiesystem in Deutschland. In diesem soll der Anteil an erneuerbaren Energien sukzessive ausgebaut werden, was wiederum einen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkung der Energienutzung haben wird. Zur Berechnung der beschriebenen Potenziale ist es somit notwendig, sowohl Annahmen für die weitere technologische Entwicklung der in den Projekten entwickelten Prozesse als auch für die technologischen und ökonomischen Randbedingungen zu treffen. Beides soll in Absprache mit den jeweiligen Projekten erfolgen. Im Folgenden werden die bisher herausgearbeiteten Annahmen und identifizierten Datenquellen für die wesentlichen technischen und ökonomischen Randbedingungen skizziert.

4.1 Energie

Sämtliche untersuchten Prozesse benötigen den Input von Energie, bzw. Energieträgern. Die Wandlung und Bereitstellung von Energie in der jeweils benötigten Form (z.B. elektrisch, thermisch oder chemisch) stellt deshalb einen wesentlichen Hintergrundprozess dar, der einen signifikanten Einfluss auf die resultierenden Umweltwirkungen und Produktionskosten haben kann. Daneben kann aufgrund der für das Jahr 2045 angestrebten Netto-

Treibhausgasneutralität (BMU 2021) davon ausgegangen werden, dass sich sowohl die Höhe als auch die Zusammensetzung des zukünftigen Energieangebotes und -nachfrage in Deutschland ändern werden. Dies wird zum einen durch den sukzessiven Ausbau von erneuerbaren Energien als Ersatz für fossile Energieträger auf der Angebotsseite und zum anderen durch Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und einer verstärkten Elektrifizierung von Anwendungen auf der Nachfrageseite verursacht.

Aus diesen Gründen wurden basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche für die Potenzialanalyse zwei Energieszenarien ausgewählt, die einen Korridor für die mögliche Entwicklung des Energiesystems in Deutschland abbilden sollen. Als Auswahlkriterien dienten dabei die Einhaltung der politischen Zielsetzungen (insb. einer 95%igen THG-Reduktion in 2050)⁴, eine umfassende und transparente Darstellung von Annahmen, Datenquellen und Modellen und die Berücksichtigung des nichtenergetischen Verbrauches von Energieträgern. Hier ist zu erwähnen, dass in den analysierten Studien die hierfür benötigte Energie maximal mit einem geringen Anteil in Deutschland bereitgestellt wurde und häufig von einem vollständigen Import ebendieser in Form von H₂ oder synthetischen Chemikalien ausgegangen wird. Nichtsdestotrotz soll in der Potenzialanalyse untersucht werden, mit welchen Umweltwirkungen und Kosten bei einer Anwendung der Prozesse in Deutschland gerechnet werden kann.

Die Ergebnisse des Szenarios **EL 95** aus der **DENA Leitstudie** (DENA 2018) dienen als konservatives Szenario, in dem Klimaneutralität in 2050 erreicht wird, allerdings unter dem Einsatz von CCS und bei gleichbleibendem Einsatz von Biomasse als Energieträger. Die sozioökonomischen Randbedingungen (z.B. Konsumgewohnheiten) ändern sich in diesem Szenario nicht und Potenziale

⁴ Eine 95%ige Reduktion der THG-Emissionen wurde in den bisherigen Studien und dem deutschen Klimaschutzplan mit dem Erreichen einer „weitestgehenden Treibhausgasneutralität“ gleichgesetzt. Die kürzlich erfolgte Änderung des Ziels auf Netto-Treibhausgasneutralität, also einer ausgeglichenen Bilanz zwischen Quellen und Senken sowie des Zieljahres auf 2045 wurde in den

existierenden Studien bisher nicht umfassend behandelt. Es wird erwartet, dass während der Laufzeit des CO₂-WIN Programms die bisherigen Studien überarbeitet werden oder neue Studien mit angepasstem Zieljahr verwendet veröffentlicht werden. Diese sollen ebenfalls in die Potenzialanalyse mit eingearbeitet werden.

zur Steigerung der Energie- und Materialeffizienz werden nicht vollständig ausgeschöpft. Im Vergleich dazu beschreibt das Szenario **GreenMe** der **Rescue-Studie** des Umweltbundesamtes (UBA 2019b) die Transformation der deutschen Wirtschaft hin zur Klimaneutralität, ohne dass hierfür der Einsatz von CCS notwendig wäre. Zusätzlich werden insbesondere die Potenziale zur Steigerung der Materialeffizienz stärker ausgenutzt bei einem stark rückläufigen Einsatz von Biomasse und einer Änderung des Konsumverhaltens.

4.2 CO₂

Auch wenn aktuell erheblich mehr CO₂ ausgestoßen als verwendet wird ist dieses nicht ohne weiteres verfügbar. In der Regel muss das CO₂ zunächst unter Energieaufwand aus einem CO₂-haltigen Medium (z.B. Abgase oder Umgebungsluft) abgeschieden werden. In Frage kommen dafür insbesondere solche industriellen Punktquellen, deren Emissionen aus technologischer Sicht nicht vermeidbar sind, weshalb sie langfristig als CO₂-Quelle erhalten bleiben. Beispiele hierfür sind die Prozessemissionen der Zementproduktion oder die energetische Verwertung von Abfällen. Dahingegen kommen industrielle Punktquellen, deren Emissionen prinzipiell vermeidbar sind (z.B. fossile Kraftwerke) aus ökologischer und ökonomischer Sicht nicht als CO₂-Quellen in Frage, wodurch die verfügbare CO₂-Menge stark eingeschränkt wird (Kaiser und Bringezu 2020). Zusätzlich ist die Berechnung der langfristigen Verfügbarkeit von CO₂ aus industriellen Punktquellen mit vielen Unsicherheiten bzgl. technologischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Entwicklungen verbunden.

Aus diesem Grund wurde, basierend auf den Annahmen der verwendeten Energieszenarien, ein Korridor für CO₂-Verfügbarkeit im Jahr 2050 berechnet. Dabei dienen die Angaben der Rescue Studie als untere und die der DENA-Leitstudie als obere Grenze. Als verfügbare Punktquellen wurden dabei mit synthetischem oder biogenem Methan befeuerte Gaskraftwerke, die Erzeugung von industrieller Prozesswärme, stoffliche bedingte Emissionen aus der Zement-, Stahl-, Chemie- und Glasindustrie, sowie die energetische Verwertung von Abfällen berücksichtigt (Tabelle 4). Im Unterschied zur Erstellung von Klimabilanzen müssen dabei auch CO₂-Emissionen biogenen

Ursprungs berücksichtigt werden. Diese können zwar als klimaneutral angesehen werden, weshalb sie in den Bilanzen nicht berücksichtigt werden, kommen für die CO₂-Nutzung aber trotzdem in Frage. Sowohl die Annahmen als auch die Datenverfügbarkeit unterscheiden sich dabei teilweise deutlich zwischen den Studien, wodurch sich ein **Verfügbarkeitskorridor** von **27 bis 144 Mt CO₂** pro Jahr im Jahr 2050 ergibt. Dies ist insbesondere bedingt durch unterschiedliche Annahmen bzgl. des Einsatzes von synthetischem und biogenem Methan zur Strom- und Wärmeproduktion, der Entwicklung von sektorspezifischen Produktionskapazitäten und dem Einsatz von CO₂-Vermeidungs- und Recyclingtechnologien.

Im Falle der Müllverbrennung mussten weitere Datenquellen hinzugezogen werden. Anhand der UBA-Studie konnten nur die entstehenden Emissionen aus der Restmüllverbrennung berechnet werden, da über die sonstigen Abfallflüsse (z.B. von Lebensmittelabfällen oder Verpackungen) keine oder nur qualitative und unzureichende Informationen verfügbar sind. In der Studie wird allerdings davon ausgegangen, dass die Abfallmenge generell deutlich abnimmt. Die berechnete Emissionsmenge wird deshalb als Näherung für die untere Grenze der verfügbaren Emissionen aus der Müllverbrennung betrachtet. In der DENA-Studie wurden zwar Angaben zur der Entwicklung der Produktion von bestimmten Basischemikalien in Deutschland, jedoch nicht zu der Entwicklung des entsprechenden Konsums und der Verwertung von Kunststoffen gemacht. Zur Berechnung der oberen Grenze wurde davon ausgegangen, dass sich die von (UBA 2018) berechnete Emissionsmenge von 36 Mt CO₂ pro Jahr nur insofern ändert, als dass sich der Trend der Steigerung des jährlichen Abfallaufkommens an Kunststoffen um 0,9 % fortsetzt (Conversio 2018), gleichzeitig aber bis 2050 davon 75 % als Sekundärkunststoff wiederverwendet werden. Zur Berechnung der Emissionen aus der Aufbereitung von Biogas wurde davon ausgegangen, dass diese Produktionsmenge von Biomethan bis 2050 entweder vollständig gestoppt wird oder stagniert.

Unter der Annahme, dass CCU-Technologien zukünftig in Deutschland in großem Maße eingesetzt werden, könnte es dazu kommen, dass

Szenarioanalyse

der CO₂-Bedarf nicht allein aus Punktquellen gedeckt werden kann. Dies wäre insbesondere dann der Fall, wenn die in den Energieszenarien benötigten Mengen an synthetischem Methan ebenfalls in Deutschland produziert werden. In diesem Fall könnte zusätzlich eine potenziell unbegrenzte Menge CO₂ aus der Luft abgeschieden werden. Aufgrund der deutlich geringeren CO₂-Konzentration in der Atmosphäre im Gegensatz zu Punktquellen ist der Energiebedarf für diese Art der Abscheidung allerdings deutlich höher, was sich auch in höheren Abscheidungskosten niederschlägt (Müller et al. 2020).

Die Abscheideprozesse unterscheiden sich hinsichtlich des Material- und Energiebedarfs, je nachdem welche CO₂-Quelle betrachtet wird. Dies führt zu Unterschieden sowohl bei der ökonomischen als auch bei der ökologischen Bewertung. Um eine vergleichbare Modellierung der CO₂-Abscheidung im Rahmen der Fördermaßnahme zu ermöglichen, werden im Anhang dieses Dokumentes die Prozessdaten und Materialinputs für den Stand der Technik von unterschiedlichen Abscheideverfahren dargestellt. Diese sollen als Basis für die Modellierungen in den einzelnen Projekten dienen.

4.3 Roh- und Abfallstoffe

Die betrachteten Mineralisierungsprozesse sind von der Verfügbarkeit der jeweils eingesetzten Ausgangsstoffe abhängig. Im Projekt NuKoS sind dies beispielsweise Schlacken aus der Stahl- und Metallproduktion, im Projekt C²inCO₂ Feinstoffe aus dem Betonrecycling und für CO₂-LiPriSek lithiumhaltige Erze und Industrieabfälle. Die für die Potenzialanalyse angenommenen verfügbaren Mengen sind in Tabelle 5 dargestellt. Es wird dabei vereinfacht angenommen, dass jeweils die gesamte in Deutschland anfallende Menge zur Verfügung steht und es nicht zu Nutzungskonkurrenzen mit anderen Prozessen (z.B. dem Straßenbau) kommt.

Für die Verfügbarkeit von Stahlschlacke wird aufgrund der Datenlage nur zwischen den beiden größten Fraktionen Oxygenstahlschlacke und Elektrostahlschlacke unterschieden. Es wird angenommen, dass sich das Verhältnis zwischen der erzeugten Schlacke- und Stahlmenge in Zukunft nicht verändert und sich die verfügbare Schlacke-Menge damit analog zur jeweiligen Stahlproduktion entwickelt (Tabelle 5). Beide betrachteten Energieszenarios gehen davon aus, dass im Jahre 2050 nur noch Elektrostahl erzeugt wird. Anders als in der DENA-Leitstudie finden sich in der Rescue-

Tabelle 4: Korridor für die Verfügbarkeit von CO₂ aus industriellen Punktquellen im Jahr 2050.

CO ₂ -Punktquelle	Untere Grenze 2050 [Mt CO ₂ /a]	Obere Grenze 2050 [Mt CO ₂ /a]	Anmerkung	Quellen
Anlagen zur Biogasaufbereitung	0	1,5	Aufbereitung von Rohbiogas für die Einspeisung ins Gasnetz.	DENA (2018); DBFZ (2017)
Gaskraftwerke und industrielle Wärmeproduktion	20	73	Verbrennung von biogenem oder synthetischem Methan	DENA (2018); UBA (2019b)
Müllverbrennung	2	26	Energetische Verwertung von stofflichen Abfällen	DENA (2018); UBA (2019b); Conversio (2018)
Sonstige industrielle Punktquellen	5	43	Zement-, Stahl-, Chemikalien-, Glas- und Keramikproduktion	DENA (2018); UBA (2019b)
Summe	27	144		

Szenarioanalyse

Studie auch Werte für die beiden Stahlfraktionen für die Jahre 2030 und 2040.

Aktuell fallen in Deutschland jährlich 24,6 Mt Betonabfälle und 27,3 Mt Gemische aus Beton Ziegeln, Fliesen und Keramik an (Statistisches Bundesamt 2019). Die jährliche Produktionsmenge von Transportbeton lag in den letzten 16 Jahren mit durchschnittlich 105 Mt (BTB 2020) deutlich höher und es wird bis auf weiteres von einem Anstieg des Aufkommens von Betonabfällen ausgegangen (Renforth 2019; UBA 2010). Aussagekräftige Hochrechnungen oder Abschätzungen darüber, wie hoch das Betonabfallaufkommen für die Jahre 2030 oder 2050 sein wird liegen allerdings nicht vor. In einer Studie vom Umweltbundesamt aus dem Jahr 2010 wurde die Menge an Betonabfall aus dem Hochbau für das Jahr 2050 mit 31,4 Mt beziffert (Umweltbundesamt 2010). Aufgrund des Fehlens von Daten aus dem Tiefbau und dem zunehmenden Interesse Bauabfälle besser in die enthaltenen Teilfraktionen zu trennen kann dies nur als unterer Grenzwert verstanden werden. Bei der Analyse wird, basierend auf (Pasquier et al. 2018), angenommen, dass 21,6 % des Gesamtbetonabfallaufkommens als Feinfraktion für die Mineralisierung verfügbar ist.

Zur Abschätzung des zukünftig anfallenden Lithiumabfalls wurden Studien über die künftige Entwicklung der globalen und nationalen Lithiumnachfrage herangezogen (DERA (2017); Junne et al. (2020)). Über die anfallende Menge an Lithiumabfällen liegen aktuell keine Daten vor,

weshalb als Vereinfachung angenommen wurde, dass die Entwicklung der Abfallmenge der Nachfrageentwicklung folgt und der globale Marktanteil Deutschlands bei der Lithiumnachfrage konstant bei 4 % bleibt.

4.4 Fläche Solarkollektoren

Wie für den Photovoltaikausbau könnte auch für die Anwendung der künstlichen Photosynthese die benötigte Fläche ein begrenzender Faktor sein. Die Werte für das Nutzungspotenzial von Dachfläche für PV-Module variieren dabei sehr stark, von einer Fläche die einem jährlichen Energieertrag von 140 TWh_{el} (BMVI 2015) bis zu 1000 TWh_{el} (Fraunhofer ISE 2021) entspricht. Bei einem gleichzeitig angenommenen Bedarf an Photovoltaik-Strom im Jahr 2050 in Höhe von mindestens 140 TWh_{el} (UBA 2019b) plus entsprechendem Flächenbedarf für Solarthermie könnte es folglich zu Nutzungskonkurrenz zwischen Photovoltaik, Solarthermie und künstlicher Photosynthese auf Dachflächen kommen.

In beiden betrachteten Energieszenarios sollen neben Dach- auch Freiflächen zunehmend für Photovoltaik genutzt werden. Allerdings gehen Freiflächenanlagen für PV i.d.R. zu Lasten der agrarischen Nutzung. Da Deutschland aktuell auf Grund seines Verbrauchs ein Netto-Importeur agrarischer Flächen ist (Bringezu et al. 2020b) und ein weiterer Verlust von Anbauflächen durch Überbauung vermieden werden sollte, um die Nahrungsmittelversorgung im Inland und über Exporte in anderen Ländern zu gewährleisten, wird

Tabelle 5: Annahmen für das aktuelle und zukünftige Vorkommen relevanter Roh- und Abfallstoffe. ¹ Aufgrund der unterschiedlichen Vorkommen und Verwendungsformen von Lithium ist eine Umrechnung in Äquivalente notwendig, basierend auf der Stöchiometrie der Ausgangsstoffe.

Stoff	Verfügbare Menge [Mt/a]			Quellen
	Status Quo	2030	2050	
Betonabfälle ¹	24,6	26,9	31,4	UBA (2010); Statistisches Bundesamt (2019)
Elektrostahlschlacke	1,7	2,2	4,9; 4,5	Merkel (2018); DENA (2018); UBA (2019b)
Lithiumäquivalente ¹	0,001	0,004 (2025)	0,04 – 0,5	DERA (2017); Junne et al. (2020)
Oxygenstahlschlacke	3,1	2,7	0; 0	Merkel (2018); DENA (2018); UBA (2019b)

Szenarioanalyse

ein zusätzlicher Ausbau von Freiflächen-Solarkollektoren hier nicht weiter betrachtet. Aufgrund des aufgezeigten Korridors für den potenziellen Energieertrag auf Dachflächen und bereits bestehender Freiflächenanlagen könnte der in den Szenarien angenommene zusätzliche Ertrag auf Freiflächen potenziell ebenfalls auf Dachflächen bereitgestellt werden. Zusätzlich kommen Fassadenflächen von Gebäuden, sowie andere spezielle Anwendungen, beispielsweise Überdachungen von Verkehrswegen, ebenfalls für Solarkollektoren in Frage, sodass sich eine größere verfügbare Fläche ergeben könnte. Aufgrund der Datenlage konnten diese bislang noch nicht berücksichtigt werden. Die Frage, wie viel Fläche für die künstliche Photosynthese zur Verfügung steht bedarf deshalb weiterer Recherche und kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschließend beantwortet werden.

4.5 Wirtschaftliche Entwicklung

Neben der Verfügbarkeit von Ressourcen hat die zukünftige Entwicklung der deutschen Volkswirtschaft als Ganzes, aber auch der spezifischen Produktionskapazitäten und Märkte einen entscheidenden Einfluss auf die Berechnung der unterschiedlichen Potenziale. Um diese Entwicklungen in den Szenarien möglichst differenziert abbilden zu können, werden wo möglich unterschiedliche Entwicklungsraten berücksichtigt (z.B. im Fall der Zementproduktion). Für den Fall, dass keine Daten in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen, sollen entweder sektorspezifische Raten oder die Wachstumsrate des BIP berücksichtigt werden (Tabelle 6). Für letzteres werden analog zu den gewählten Energieszenarien zwei verschiedene Entwicklungsszenarien betrachtet. Konkret soll zum einen mit einem konstanten Marktwachstum von durchschnittlich 1 % pro Jahr und zum anderen mit einem Nullwachstum gerechnet werden.

Tabelle 6: Entwicklungsraten für Produktionskapazitäten und Märkte.

Produkt/Sektor	Jährliche Wachstumsrate	Quellen	Projekte
Basischemikalien	0 %	VCI (2017), Geres et al. (2019)	PhasKat, ProMet, CO ₂ SimO, DEPECOR, PRODIGY, PlasCO ₂ , CORA, Bio-UGS, HtCoEI
Beton- und Zementherstellung	-0,1 %; -1,5 %	Dena (2018); UBA (2019b)	C ² inCO ₂
Bruttoinlandsprodukt (BIP)	0 % bzw. 1 %	DENA (2018); UBA (2019b)	Alle Projekte
Spezialchemikalien	2 %	Geres et al. (2019)	Transformate, Games
Stahlproduktion	-0,8 %; -0,5 % (bis 2030), -1 % (ab 2030)	DENA (2018); UBA (2019b)	NuKoS

5. Nächste Schritte

Im Anschluss an die Diskussion der skizzierten Vorgehensweise und Annahmen zur Potenzialanalyse sollen in der nächsten Phase die Referenz- und Hintergrundprozesse modelliert und eventuelle Datenlücken bei der Definition der Szenarien geschlossen werden (Abbildung 4). Im nächsten Schritt werden Fragebögen zur Abfrage der für die Potenzialanalyse benötigten Daten entworfen und diese per E-Mail bei den Projekten abgefragt. Mit Hilfe dieser Daten sollen erste ökonomische und ökologische Modellierungen für

die neuen Technologien von der Universität Kassel durchgeführt werden. Zusätzlich wird die Datenqualität sämtlicher Inputdaten sowie der Ergebnisse auf Konsistenz und Vollständigkeit geprüft. Sollten Datenlücken identifiziert werden oder relevante Daten aus den Projekten zum Zeitpunkt der ersten Datenabfrage noch nicht vorliegen, wird eine zweite Datenabfrage durchgeführt. Abschließend wird die Berechnung der Potenziale vorgenommen. Die Ergebnisse sollen den Projekten im Rahmen eines weiteren Workshops präsentiert sowie diskutiert werden, bevor sie in Form einer Studie ausformuliert werden.

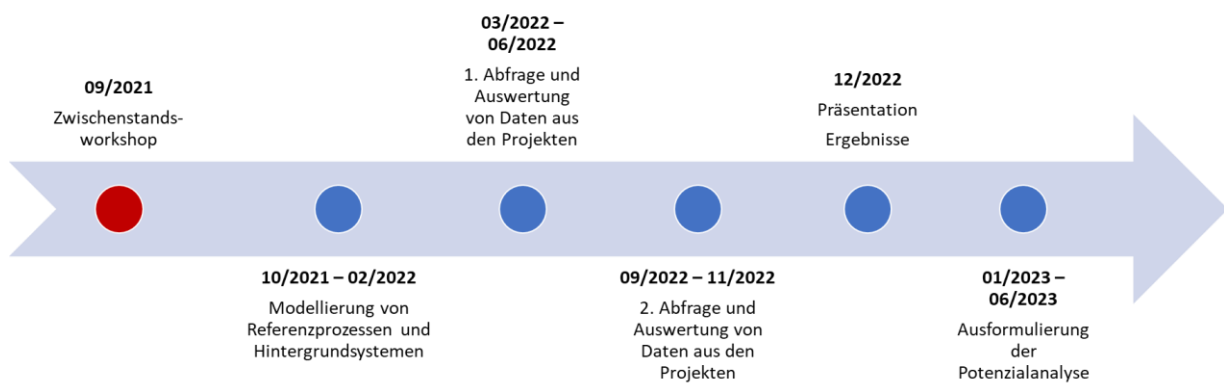


Abbildung 4: Geplanter zeitlicher Ablauf des weiteren Vorgehens.

Literaturverzeichnis

- Assen, Niklas von der; Müller, Leonard J.; Steingrube, Annette; Voll, Philip; Bardow, André (2016): Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. In *Environmental science & technology* 50 (3), pp. 1093–1101. DOI: 10.1021/acs.est.5b03474.
- BDE (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. Einblicke und Aussichten. Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. Berlin.
- Bergerson, Joule A.; Brandt, Adam; Cresko, Joe; Carbajales-Dale, Michael; MacLean, Heather L.; Matthews, H. Scott et al. (2020): Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. In *Journal of Industrial Ecology* 24 (1), pp. 11–25. DOI: 10.1111/jiec.12954.
- BMU (2021): Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin.
- BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienz-programm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen (Progress II). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin, checked on 12/3/2018.
- BMVI (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland.
- Bringezu, Stefan; Kaiser, Simon; Turnau, Sebastian (2020a): Zukünftige Nutzung von CO₂ als Rohstoffbasis der deutschen Chemie- und Kunststoffindustrie. With assistance of Universität Kassel, Center For Environmental Systems Research (CESR), checked on 4/8/2020.
- Bringezu, Stefan; Banse, Martin; Ahmann, Lara; Bezama, Alberto; Billig, Eric; Bischof, R. et al. (2020b): Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. With assistance of Universität Kassel, Center For Environmental Systems Research (CESR).
- Bringezu, Stefan; Kaiser, Simon; Turnau, Sebastian; Mostert, Clemens (2019): Bestimmung des Materialfußabdrucks mit ökobilanziellen Methoden und Softwarelösungen.
- Bundesregierung (2021): Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. Berlin.
- BTB (2020): Gutes Klima - Jahresbericht 2020. Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. Berlin.
- Chauvy, Remi; Verdonck, Damien; Dubois, Lionel; Thomas, Diane; Weireld, Guy de (2021): Techno-economic feasibility and sustainability of an integrated carbon capture and conversion process to synthetic natural gas. In *Journal of CO₂ Utilization* 47, p. 101488. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101488.
- Chen, Xiao Yuan; Vinh-Thang, Hoang; Ramirez, Antonio Avalos; Rodrigue, Denis; Kaliaguine, Serge (2015): Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. In *RSC Adv.* 5 (31), pp. 24399–24448. DOI: 10.1039/C5RA00666J.
- Conversio (2018): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2017. Frankfurt am Main
- DENA (2018): Integrierte Energiewende (Integrated Energiewende). Deutsche Energieagentur (DENA). Berlin.
- DERA (2017): DERA Rohstoffinformation Nr. 33: Rohstoffrisikobewertung Lithium. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin.
- Destatis (2021): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung. Bruttowertschöpfung. Statistisches Bundesamt (Destatis). Available online at

<https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Glossar/bruttowertschoepfung.html>.

Deutz, Sarah; Bardow, André (2021): Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. In *Nat Energy* 6 (2), pp. 203–213. DOI: 10.1038/s41560-020-00771-9.

DIN EN ISO (2021): 14044 Environmental Management - Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines. German Institute for Standardization. Berlin.

Fraunhofer ISE (2021): Integrierte Photovoltaik – Flächen für die Energiewende - Fraunhofer ISE. verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik.html>.

Fröhlich, Thomas; Blömer, Sebastian; Münter, Daniel; Brischke, Lars-Arvid (2019): CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland. Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit. IFEU Institut. Heidelberg

IEAGHG (2005): Building the cost curves for CO₂ storage: European sector. Report Number 2005/2. 2005. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

Junne, Tobias; Wulff, Niklas; Breyer, Christian; Naegler, Tobias (2020): Critical materials in global low-carbon energy scenarios: The case for neodymium, dysprosium, lithium, and cobalt. In *Energy* 211, p. 118532. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118532.

Kaiser, Simon; Bringezu, Stefan (2020): Use of carbon dioxide as raw material to close the carbon cycle for the German chemical and polymer industries. In *Journal of Cleaner Production* 271, p. 122775. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122775.

Karpf, Rudi H.; Bergins, Christian (2016): CO₂-Abscheidung bei der Abfallverbrennung (CO₂ Capture in Waste Incineration). In *Müll und Abfall* (5). DOI: 10.37307/j.1863-9763.2016.05.04.

Lutter, Stefan; Giljum, Stefan; Gözet, Burcu; Wieland, Hanspeter (2018): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Bericht für Deutschland 2018. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

Moni, Sheikh Moniruzzaman; Mahmud, Rokhsana; High, Karen; Carbajales-Dale, Michael (2020): Life cycle assessment of emerging technologies: A review. In *Journal of Industrial Ecology* 24 (1), pp. 52–63. DOI: 10.1111/jiec.12965.

Mostert, Clemens; Bringezu, Stefan (2019): Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors. In *Resources* 8 (2), p. 61. DOI: 10.3390/resources8020061.

Müller, Leonard Jan; Kätelhön, Arne; Bringezu, Stefan; McCoy, Sean; Suh, Sangwon; Edwards, Robert et al. (2020): The carbon footprint of the carbon feedstock CO₂. In *Energy Environ. Sci.* DOI: 10.1039/D0EE01530J.

Pasquier, Louis-César; Kemache, Nassima; Mocellin, Julien; Blais, Jean-François; Mercier, Guy (2018): Waste Concrete Valorization; Aggregates and Mineral Carbonation Feedstock Production. In *Geosciences* 8 (9), p. 342. DOI: 10.3390/geosciences8090342.

Renforth, Phil (2019): The negative emission potential of alkaline materials. In *Nature communications* 10 (1), p. 1401. DOI: 10.1038/s41467-019-09475-5.

Roh, Kosan; Bardow, André; Bongartz, Dominik; Burre, Jannik; Chung, Wonsuk; Deutz, Sarah et al. (2020): Early-stage evaluation of emerging CO₂ utilization technologies at low technology readiness levels. In *Green Chem.* 22 (12), pp. 3842–3859. DOI: 10.1039/C9GC04440J.

Statistisches Bundesamt (2019): Umwelt - Abfallentsorgung 2017. Wiesbaden.

Stocker, Thomas; Alexander, Lisa; Allen, Myles (2014): Climate change 2013. The physical science basis; Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

UBA (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

UBA (2018): Energieerzeugung aus Abfällen Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.

UBA (2019a): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

UBA (2019b): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. Rescue Studie. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau

WITS (2018a): Alcohols; saturated monohydric, methanol (methyl alcohol) exports by country in 2018. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2018/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/290511>. Zugriff am 13.08.2021.

WITS (2018b): Alcohols; saturated monohydric, methanol (methyl alcohol) imports by country in 2018. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2018/tradeflow/Imports/partner/WLD/product/290511>. Zugriff am 13.08.2021.

WITS (2018c): Carbonates; calcium carbonate imports by country in 2018. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2018/tradeflow/Imports/partner/WLD/product/283650>. Zugriff am 13.08.2021.

WITS (2019a): Carbon dioxide exports by country in 2019. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/281121>. Zugriff am 13.08.2021.

WITS (2019b): Carbon dioxide imports by country in 2019. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Imports/partner/WLD/product/281121>. Zugriff am 13.08.2021.

WITS (2019c): Carbonates; calcium carbonate exports by country in 2019. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/283650>. Zugriff am 13.08.2021.

WITS (2019d): Oxygen exports by country in 2019. Weltbank. online verfügbar unter:
<https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/ALL/year/2019/tradeflow/Exports/partner/WLD/product/280440>. Zugriff am 13.08.2021.

Anhang

Beispielfragebogen für die Datenabfrage

In diesem Abschnitt soll dargestellt werden, welche Art an Daten für die Potenzialanalyse voraussichtlich benötigt werden. Zur Berechnung der Potenziale werden vor allem Informationen über die hauptsächlichen Energie- und Materialflüsse der Technologien sowie der verwendeten Systemkomponenten und Prozessparameter benötigt. Auf diese Weise können Abschätzungen zu deren Umweltwirkungen und Kostensituationen vorgenommen werden, ohne dabei auf zu detaillierte Daten angewiesen zu sein. Tabelle 1 gibt eine beispielhafte Übersicht über die benötigten Daten. Weiterhin wird dargestellt, für welche Analyseschritte die Daten jeweils benötigt werden.

Tabelle 1: Beispielhafte Übersicht und Erläuterung der von den Projekten benötigten Daten.

Parameter/Information	Benötigt für	Erläuterung
CO₂-Menge (Brutto)	LCA, Opex	Gesamtmenge an CO ₂ , welche in den Prozessen eingesetzt wird [kg/kg Produkt].
CO₂-Menge (Netto)	LCA	Menge an CO ₂ , welche in Produkte umgewandelt wurde [kg/kg Produkt].
Energie, elektrisch	LCA, Opex	Benötigte Menge an elektrischer Energie [MJ/kg Produkt].
Energie, chemisch	LCA, Opex	Art und Menge der chemischen Energieträger, die in den Prozessen zur energetischen und nichtenergetischen Verwendung eingesetzt werden [kg/kg Produkt].
Energie, thermisch	LCA, Opex	Benötigte Menge an Wärmeenergie und Temperatur [MJ/kg Produkt] bzw. [°C].
Ausgangsmaterialien	LCA	Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe für die Mineralisierung.
Einsatzmengen	LCA, Opex	Spezifische Mengen der eingesetzten Materialien und Bruttomenge an sonstigen Chemikalien [kg/kg Produkt].
(Neben-)Produkte	LCA, Opex	Menge der produzierten Produkte und Nebenprodukte [kg/Jahr] bzw. [kg/kg Produkt].
In die Analyse integrierte Anlagen/Prozesse	LCA	Welche Prozessschritte wurden betrachtet und bilanziert, welche wurden nicht mit betrachtet?
Anlagenlebensdauer aktuell (bei Bedarf anteilig)	LCA, Capex	Lebensdauer, ausgedrückt in Jahren oder Volllaststunden, der entwickelten Prozesstechnik.
Technological Readiness Level (TRL)	LCA, Opex	TRL-Einstufung vonseiten des Projektes.
Anlagenlebensdauer potenziell	LCA, Capex	Mögliche, bzw. angestrebte Lebensdauer der Produktionsanlagen, ausgedrückt in Jahren oder Volllaststunden.
Entwicklung	LCA, Opex	Mögliche Steigerungen der Energie- und Materialeffizienz
a. Energieeffizienz		
b. Materialeffizienz		

Prozessdaten CO₂-Abscheidung

Die Prozesse der CO₂-Abscheidung unterscheiden sich bzgl. des Energie- und Materialbedarfs. Für die Abscheidung von CO₂ aus Punktquellen kann die entsprechende Prozesstechnik in bestehende Anlagen integriert werden, was teilweise bereits erfolgt ist (Tabelle 2). Der Materialbedarf hierfür kann vernachlässigt werden, mit Ausnahme der benötigten Menge an Absorbens. Für die Abscheidung aus der Umgebungsluft (Direct Air Capture) ist die Errichtung eigener Anlagen notwendig, was wiederum einen nennenswerten Materialbedarf mit sich bringt (Tabelle 3).

Weiterhin unterscheiden sich die Verfahren stark in Bezug auf den Energiebedarf, je nachdem welche CO₂-Konzentration im Input Gas vorliegt. Die hier dargestellten Prozessdaten orientieren sich an möglichst aktuellen Veröffentlichungen. Für die Punktquellen wurden solche Quellen ausgewählt, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mittel- bis langfristig noch in Deutschland vorhanden sein werden, da sie entweder auf stofflich bedingte Emissionen verursachen (z.B. Zementwerk) oder systemrelevant sind (Müllverbrennungsanlage) (Bringezu et al. 2020b).

Tabelle 2: Sachbilanz für die Abscheidung von 1 kg CO₂ aus unterschiedlichen Punktequellen.

CO ₂ -Quelle	Beschreibung	Menge [pro kg CO ₂]	Quelle
Biogasaufbereitung (Aminwäsche)	CO ₂ -Konzentration	40 %	Fröhlich et al. (2019); Chen et al. (2015)
	Abscheideeffizienz	97 %	
	$E_{\text{elektrisch}}$	0,08 - 0,2 kWh	
	$E_{\text{thermisch}}$	0,6 - 1 kWh	
	Absorbens	Keine Daten verfügbar	
Hochreine Quellen (z.B. Herstellung von Ammoniak)	CO ₂ -Konzentration	≈ 100 %	Von der Assen et al. (2016); IEAGHG (2005)
	Abscheideeffizienz	100 %	
	$E_{\text{elektrisch}}$	0,003 kWh	
	$E_{\text{thermisch}}$	0,01 kWh	
	Absorbens	0 (nicht benötigt)	
Müllverbrennungsanlage (Aminwäsche)	CO ₂ -Konzentration	9 %	Karpf und Bergins (2016)
	Abscheideeffizienz	90 %	
	$E_{\text{elektrisch}}$	0,1 - 0,4 kWh	
	$E_{\text{thermisch}}$	1,1 - 1,2 kWh	
	Absorbens	1,6 - 2 g	
Zementwerk (Aminwäsche)	CO ₂ -Konzentration	20 %	Chauvy et al. (2021)
	Abscheideeffizienz	90 %	
	$E_{\text{elektrisch}}$	0,1 kWh	
	$E_{\text{thermisch}}$	0,8 kWh	
	Absorbens	1,52 g	

Table 3: Sachbilanz für die Abscheidung von 1 kg CO₂ aus Umgebungsluft, inkl. der Materialien für den Anlagenbau. Die in Klammern angegebene Zahl bezeichnet die aktuell Rate für den Sekundärinput des entsprechende Materials in Deutschland. Die Werte beziehen sich auf eine hochskalierte Anlage mit einer Abscheidkapazität von 100 kt CO₂/a.

Inputfluss	Beschreibung	Menge [pro kg CO ₂]	Quellen
Energie	Elektrisch	0,5 kWh	
Energie	Thermisch	1,5 kWh	
Elastomer	Thermoplastisches Polyurethan	5,4E-07 kg	Deutz und Bardow (2021)
Adsorbens	Monoethanolamin	3 g	
Aluminium	Primärmaterial	1,4E-06 kg	Deutz und Bardow (2021); VDM (2021)
	Sekundärmaterial (66 %)	2,7E-06 kg	
Beton	Primärmaterial	7,3E-04 kg	Deutz und Bardow (2021)
Edelstahl	Primärmaterial	7,5E-06 kg	Deutz und Bardow (2021); UBA (2019a)
	Sekundärmaterial (47 %)	6,7E-06 kg	
Kupfer	Primärmaterial	3,4E-07 kg	Deutz and Bardow (2021); VDM (2021)
	Sekundärmaterial (45 %)	1,8E-07 kg	
Stahl	Primärmaterial	2,5E-05 kg	Deutz and Bardow (2021); BDE (2018)
	Sekundärmaterial (45 %)	2,1E-05 kg	

Literaturverzeichnis

Assen, Niklas von der; Müller, Leonard J.; Steingrube, Annette; Voll, Philip; Bardow, André (2016): Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. In *Environmental science & technology* 50 (3), pp. 1093–1101. DOI: 10.1021/acs.est.5b03474.

BDE (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. Einblicke und Aussichten. Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. Berlin.

Chauvy, Remi; Verdonck, Damien; Dubois, Lionel; Thomas, Diane; Weireld, Guy de (2021): Techno-economic feasibility and sustainability of an integrated carbon capture and conversion process to synthetic natural gas. In *Journal of CO₂ Utilization* 47, p. 101488. DOI: 10.1016/j.jcou.2021.101488.

Chen, Xiao Yuan; Vinh-Thang, Hoang; Ramirez, Antonio Avalos; Rodrigue, Denis; Kaliaguine, Serge (2015): Membrane gas separation technologies for biogas upgrading. In *RSC Adv.* 5 (31), pp. 24399–24448. DOI: 10.1039/C5RA00666J.

Deutz, Sarah; Bardow, André (2021): Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature–vacuum swing adsorption. In *Nat Energy* 6 (2), pp. 203–213. DOI: 10.1038/s41560-020-00771-9.

Fröhlich, Thomas; Blömer, Sebastian; Münter, Daniel; Brischke, Lars-Arvid (2019): CO₂-Quellen für die PtX-Herstellung in Deutschland. Technologien, Umweltwirkung, Verfügbarkeit.

IEAGHG (2005): Building the cost curves for CO₂ storage: European sector. Report Number 2005/2. 2005. IEA Greenhouse Gas R&D Programme.

VDM (2021): Metallrecycling. Verband Deutscher Metallhändler. Berlin

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

CO₂WIN
Nachhaltig Kohlenstoff nutzen



Projektpartner CO₂-WIN Connect:

