

Auswirkungen von industriellen CO₂- Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien

Tobias HÜBNER^(1,2), Konstantin METZGER⁽¹⁾, Frank VEITENGRUBER⁽¹⁾,
Serafin VON ROON⁽¹⁾

⁽¹⁾ Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München,
089/158 121 36, thuebner@ffe.de, www.ffegmbh.de

⁽²⁾ Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München

Kurzfassung: Mit der Verschärfung des Klimaschutzgesetzes in 2021 geht auch die zunehmende Defossilisierung des Industriesektors einher. Basierend auf einem ambitionierten Klimaschutzszenario (CP-Szenario) des Sektormodells Industrie (Smlnd-), leiten die Autoren mittels der Erweiterung des Modells um ein Flexibilitätsmodul veränderte Flexibilitätspotenziale von Prozessen und Technologien ab. Das CP-Szenario zeichnet sich durch eine starke Elektrifizierung aus und vermindert die industriellen CO₂-Emissionen um 88 % in 2050 ggü. 1990. Via Literaturrecherche und Metaanalyse erhobene sowie mittels sieben Experteninterviews validierte Eingangsdaten bilden die Grundlage der Modellsimulationen. Anhand einer eigens entwickelten Methode bestimmen die Autoren elf disruptive CO₂-Verminderungsmaßnahmen, welche die Flexibilität industrieller Prozesse und Technologien beeinflussen. Die Maßnahmen umfassen transformative Technologien der Stahl-, Papier, Ethylen und Glasproduktion sowie der Wärmeerzeugung. In Summe senken die Maßnahmen die CO₂-Emissionen um knapp 40 % ggü. 2020 (178 Mio.t CO₂e).

Das Flexibilitätsmodul bestimmt Differenzpotenziale mit Abrufdauer und Abrufhäufigkeit im Fünfjahresturnus bis 2050 ggü. 2018. Es ergibt sich ein zusätzliches positives bzw. negatives Flexibilitätspotenzial von 7,7 GW bzw. 6,3 GW in 2050 ggü. 2018. Etwa 85 % (90 %) des Anstiegs positiver (negativer) Flexibilitätspotenziale in 2050 ist auf den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln zurückzuführen. In 2050 steigt das positive bzw. negative Flexibilitätspotenzial durch die betrachteten Prozesse und Technologien um etwa 150 bzw. 175 % ggü. der SynErgie Potenzialerhebung der zweiten Förderphase an.

Neben den Differenzpotenzialen erhebt das Flexibilitätsmodul Differenzenergien. Das Modell weist eine zusätzliche Flexibilitätsenergie von 10,8 TWh in 2050 ggü. 2018 aus. Selbst bei gleichbleibend hohen Strompreisspreads ist ein deutlicher Hochlauf der verfügbaren Flexibilitätsenergie ggü. 2018 zu beobachten. Die Schlussfolgerung liegt nahe, dass die industrielle Transformation einen wesentlich stärkeren Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien leisten kann, als bisher.

Keywords: Dekarbonisierung, Defossilisierung, Industrie, CO₂-Verminderung, Flexibilität

¹ Jungautor

1 Einleitung

Mit der Verschärfung des Klimaschutzgesetzes im Juni 2021 hat sich die Bundesregierung zum Ziel gesetzt, die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf 65 % ggü. 1990 zu senken und bis 2045 treibhausgasneutral zu werden /BMWi-12 21/. Für die Umsetzung der Ziele kommt der Industrie eine zentrale Rolle zu, auch da sie etwa in 2018 für 23 % der deutschen Treibhausgasemissionen verantwortlich war /AGORA-07 20/.

Um die industriellen Treibhausgase zu senken, ist die Transformation konventioneller Technologien hin zu einer treibhausgasarmen Produktion notwendig /AGORA-07 19/. Um den erneuerbar erzeugten Strom von Windenergie- und Photovoltaikanlagen effizient in der derzeit hauptsächlich brennstoffbasierten Industrieproduktion zu nutzen, bietet sich die direkte Elektrifizierung von Prozessen und Technologien an.

Jedoch geht das zukünftig wachsende volatile Stromangebot aus erneuerbaren Energiequellen mit neuen Herausforderungen hinsichtlich des Ausgleichs von Stromangebot und -nachfrage einher /FFE05 17/. Der Modus Operandi, bei dem das Stromangebot an die Nachfrage angepasst wird, ist so nicht aufrechtzuerhalten. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit die Industrie als maßgeblicher zukünftiger Stromverbraucher /BMBF01 17/ dazu beitragen kann, den Stromverbrauch mit dem flexiblen Stromangebot zu synchronisieren. Gerade bei der bisher vergleichsweise unflexiblen Industrieproduktion ist mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien am Stromangebot und wachsendem industriellen Stromverbrauch eine überproportionale Steigerung der Industrieflexibilität geboten. Die Frage der zu erwartenden Auswirkungen einer tiefgreifenden industriellen Transformation auf die Industrieflexibilität bleibt indes bisher unbeantwortet.

2 Untersuchungsgegenstand

Die Analyse zum Forschungsstand behandelt relevante wissenschaftliche Arbeiten zu CO₂-Verminderungsmaßnahmen sowie Lastflexibilität in der deutschen Industrie. Auf der Analyse fußend werden Forschungslücken identifiziert, welche die Forschungsfragen und Ziele der weiteren Analyse vorgeben.

CO₂-Verminderungsmaßnahmen

/ISI-12 13/ untersucht die sieben Industriebranchen² mit der höchsten Energieintensität hinsichtlich ihrer CO₂-Einsparpotenziale in Deutschland. Dabei wird der Schwerpunkt auf Effizienzmaßnahmen ohne eine *"radikale Veränderung des Produktionsverfahrens"* /ISI-12 13/ gelegt. Maßnahmen und Technologien mit niedriger technologischer Reife und aus heutiger Sicht nicht absehbarer Wirtschaftlichkeit, exkludiert /ISI-12 13/. Die Studie dient als Grundlage für die Erhebung von Daten industrieller Prozesse, Technologien und Maßnahmen.

/AGORA-07 19/ konstatiert, dass die Erneuerung von Bestands- durch effizientere Anlagen mit konventionellen Technologien für die Klimaneutralität der Industrie nicht ausreichen. Die Studie zeigt Schlüsseltechnologien für die Stahl-, Chemie- und Zementindustrie auf, welche die CO₂-Emissionen stark bis vollständig reduzieren. Dabei reicht der Betrachtungshorizont bis 2050. Ein Ziel der Studie ist es, die physikalischen und ökonomischen Parameter sowohl

² Grundstoffchemie, Eisen- und Stahlindustrie, Nichteisenmetall-Industrie, Papiergewerbe, Verarbeitung von Steinen und Erden, Glas und Keramik und Ernährungsgewerbe

bereits verfügbarer als auch zukünftiger Technologien zu quantifizieren. Die Studie schafft ein gutes Verständnis für die anstehenden Herausforderungen in der Transformation industrieller Prozesse und Technologien.

/AGORA-11 20/ beinhaltet die zugrundeliegenden Annahmen, Daten und Quellen von /AGORA-07 19/ und wird dementsprechend zur Erhebung industrieller Eingangsdaten genutzt. Dabei beschränken sich /AGORA-07 19/ und /AGORA-11 20/ auf die Industrie, wohingegen die darauf aufbauende Studie /AGORA-07 20/ gesamtsystemische Strategien und Maßnahmen zur Klimaneutralität Deutschlands bis 2050 aufzeigt. Die betrachteten Szenarien umfassen die Sektoren Industrie, Energie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft. Die Analyse des Industriesektors in /AGORA-07 20/ umfasst die energieintensiven Branchen Stahl, Grundstoffchemie, Zement, Kalk, NE-Metalle, Glas, Gießereien sowie Zellstoff, Papier und Pappe.

Neben den vorgestellten Studien bestehen zahlreiche branchen- oder prozessspezifische Veröffentlichungen von Forschungseinrichtungen, Verbänden oder Beratungsunternehmen³, welche techno-ökonomische Parameter zu Prozessen, Technologien und CO₂-Verminderungsmaßnahmen ausweisen. Darüber hinaus greifen die weiteren Analysen auf bereits vorhandene Daten aus FfE-Projekten wie Dynamis /FFE-144 19/ und Energiewende in der Industrie zurück /BMW-01 19/. Einige Studien beinhalten teilweise industrielle Flexibilität /AGORA-07 20/, das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf einer treibhausgasneutralen Industrie /AGORA-07 19/. Andere Studien zu CO₂-Verminderungstechnologien lassen die industrielle Lastflexibilität vollständig außen vor /ISI-12 13/.

Lastflexibilität in der Industrie

Die Metastudienanalyse in /VDI-01 13/ arbeitet zum einen die Inhomogenität des Gebrauchs relevanter Begrifflichkeiten, methodischer Ansätze und Annahmen bei der Erhebung von prozessspezifischen Flexibilitätspotenzialen heraus. Zum anderen zeigt sie, wie unterschiedlich und folglich schwer vergleichbar die Ergebnisse der Untersuchungen im Forschungsbereich sind. Wesentliche Erkenntnisse aus /VDI-01 13/ fließen in die theoretischen Grundlagen mit ein.

Um dem entgegenzuwirken identifiziert /FFE-05 17/ acht relevante Problemfelder⁴ bei der Erhebung von Flexibilitätspotenzialen. Für die Problemfelder entwickelt die Studie Lösungen, um sowohl eine Vergleichbarkeit als auch die Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen unterschiedlicher Forschungsarbeiten zu ermöglichen. /FFE-05 17/ ermöglicht es damit, Daten zur industriellen Lastflexibilisierung einheitlich zu erfassen und zu quantifizieren /IPA-01 19/. Allerdings steht zu diesem Zeitpunkt primär die energieintensive Industrie im Fokus /IPA-01 19/, /FFE-12 18/, während das Flexibilitätspotenzial von Querschnittstechnologien

³ /BCG-01 13/, /FFE-104 19/, /VDZ-01 20/, /VDZ-03 16/, /VDZ-02 21/, /EAA-03 18/, /DECHEMA-01 17/, /ICCC-01 12/, /ARCE-01 10/, /REN-02 06/, /UTU-02 09/, /OTTO-01 17/, /VTT-02 14/, /BRUNK-01 16/, /AURU-01 19/

⁴ Potenzialbegriffe, Erhobene Parameter, Art der Laständerung, Betrachtungszeitraum, Art und Bilanzraum der Datenerhebung, Bilanzraum ausgewiesener potenziale, Berechnungsmethode und technoökonomische, zeitliche- und örtliche Differenzierung

keine Beachtung findet. Prospektive Flexibilitätspotenziale infolge der industriellen Transformationen werden nicht behandelt.

Das Projekt SynErgie weist in der ersten Projektphase in einer bottom-up Analyse ein negatives Flexibilitätspotenzial von 1,09 GW und ein positives Flexibilitätspotenzial von 2,45 GW für einen Zeitraum von 15 Minuten aus /IPA-01 19/. Prospektive Flexibilitätspotenziale infolge der industriellen Transformationen werden ebenfalls nicht behandelt.

In der derzeitigen zweiten Projektphase von SynErgie werden einerseits zusätzliche Prozesse und Technologien in die Potenzialerhebung aufgenommen, andererseits erstmals die Wirkung von industriellen Entwicklungen und tiefgreifender CO₂-Verminderung auf die Flexibilität untersucht /BMBF-01 20/.

Der aktuelle Forschungsstand zeigt also zum einen, dass zwar bereits eine Reihe von hochwertigen Studien industriellen Flexibilität bestehen. Zum anderen unterstreicht die Analyse jedoch auch, dass die Auswirkungen tiefgreifender CO₂-Verminderung auf die Flexibilität im Industriesektor noch weitestgehend unerforscht sind. An diesem Punkt setzen die weiteren Analysen im Rahmen der zweiten Projektphase von SynErgie an /BMBF-01 20/.

Zielsetzung

Bisher sind den Autoren keine Studien bekannt, welche die tiefgreifende CO₂-Verminderung sowie Flexibilität im Industriesektor gemeinsam betrachten. Ziel ist es deshalb, die beiden Themenkomplexe miteinander zu verbinden und die Auswirkungen von disruptiver CO₂-Verminderung auf die Flexibilität im Industriesektor zu quantifizieren. Unter *disruptiv* werden dabei Maßnahmen verstanden, die ein vergleichsweise hohes CO₂-Verminderungspotenzial aufweisen oder einen tiefgreifenden Eingriff in den herkömmlichen Produktionsprozess erfordern. Folgende Ziele verfolgen die weiteren Analysen.

- Ziel der Untersuchung ist es eine Methode zu konstruieren, mit welcher die Entwicklung von Flexibilitätspotenzialen und weiteren flexibilitätsrelevanten Parameter von Prozessen und Technologien in einem Industriemodell abgeleitet werden können.
- Zudem versuchen die weiteren Arbeiten zu erfassen, welche disruptiven CO₂-Verminderungsmaßnahmen sich auf die Flexibilitätspotenziale im Industriesektor auswirken.
- Darüber hinaus zielen die weiteren Arbeiten darauf ab herauszuarbeiten, inwiefern sich die Umsetzung der identifizierten und ausgewählten CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf das Flexibilitätspotenzial und die weiteren flexibilitätsrelevanten Parameter von Prozessen und Technologien in der Industrie auswirken.

3 Theoretische Grundlagen

Die theoretischen Grundlagen subsumieren die Erklärung grundlegender Begriffe, das Zusammenspiel von Flexibilität und Effizienz sowie eine rudimentäre Beschreibung des Sektormodells Industrie (Smlnd).

Grundlegende Begriffe

Die Energieflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und prozesseffizient an Änderungen des Energiemarktes anzupassen. Die Produktqualität muss dabei unverändert bleiben /US-03 19/. Hinsichtlich der Analyse relevant ist die industrielle Lastflexibilität, welche die Veränderung der Last bzw. des Potenzials eines Verbrauchers als Reaktion auf ein externes Signal (z.B. dem Strompreis) beschreibt /GRUB-01 17/.

Das Lastprofil eines elektrischen Verbrauchers gibt den zeitlichen Verlauf der bezogenen Leistung wieder. Die Analyse verwendet Jahresprofile, welche jahreszeitliche Schwankungen beinhalten. Andere (gleichbedeutende) Bezeichnungen sind u.a. „Lastgang“ /US-03 19/.

Die Literatur unterscheidet fünf Potenzialbegriffe⁵, welche sich als Schnitt- bzw. Teilmengen voneinander abgrenzen /US-03 19/. Die nachfolgend beschriebenen Methoden und Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf technische Flexibilitätspotenziale, welche die Möglichkeit beschreiben, den Leistungsbedarf im Rahmen der technologischen Rahmenbedingungen zu variieren, ohne Lieferverpflichtungen zu verletzen⁶ /US-03 19/. Lieferverpflichtungen umfassen Beziehungen gegenüber dem Kunden oder nachfolgenden Produktionsprozessen. Die Lieferverpflichtungen werden durch den originären Lastgang des Produktionsprozesses oder der Technologie widergespiegelt und als zu erfüllende Randbedingung definiert. Der technologische Rahmen umfasst anlagenspezifische Bedingungen, die insbesondere Einfluss auf die Leistungsaufnahme und die einzelnen Zeitintervalle haben /US-03 19/.

Der Begriff „Laständerung“ beschreibt die Änderung der Last durch eine Flexibilitätsmaßnahme gegenüber der Last im Referenzbetrieb /US-03 19/. Flexibilitätsmaßnahmen beschreiben dabei Tätigkeiten zur Änderung des originären Betriebszustands und werden in dieser Arbeit synonym mit dem Begriff „Flexibilitätsabrufe“ verwendet.

Dabei ist die Regelbarkeit der Last Grundvoraussetzung. Regelbare Lasten sind nach /US-03 19/ Stromverbraucher (Lasten), die zur Anpassung ihres Verbrauchs gesteuert werden können. Innerhalb der regelbaren Last beschreibt die Teillastfähigkeit die Möglichkeit einer Anlage, im Betrieb Zustände mit reduzierter Leistung einzunehmen /FFE-12 18/.

Die Lastverschiebung beschreibt die temporäre erhöhte oder verringerte Leistungsaufnahme mit jeweiligem Lastnachholbedarf /US-03 19/. Lastverschiebungen finden im Rahmen der weiteren Analyse innerhalb eines Jahres statt und gleichen sich innerhalb selbigen Jahres aus. Die weitere Analyse unterstellt die uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung /FFE-05 17/. Daraus folgt, dass die Anpassungen von Lastgängen bei unverändertem Gesamtnutzen erfolgt /WI-05 08/. Dementsprechend bleiben sowohl die Jahressummen der Produktionsmengen als auch der Energieverbräuche bei Änderungen des Lastgangs unverändert /HÜB-01 17/.

Bei Lastverschiebungen werden eine verringerte Leistungsaufnahme als positives Flexibilitätspotenzial und eine erhöhte Leistungsaufnahme als negatives Flexibilitätspotenzial bezeichnet /FFE-05 17/. Die variierte Leistungsaufnahme erfolgt mit einem Lastnachholbedarf,

⁵ Theoretisches Potenzial, technisches Potenzial, wirtschaftliches Potenzial, praktisches Potenzial und realisierbares Potenzial

⁶ bzw. Ausbringungsmenge und Qualität konstant gehalten werden

welcher im Rahmen dieser Arbeit einem vollständigen Ausgleich der positiven oder negativen Energie während der Lastverschiebung entspricht /US-03 19/.

Die flexibilisierbare Energie (Flexibilitätsenergie) entspricht dem Produkt aus Laständerung und Abrufdauer /US-03 19/.

Die Abrufdauer wiederum setzt sich aus der minimalen und maximalen Zeitspanne von der vollständig ausgebildeten Laständerung bis zum Beginn der Deaktivierung des Flexibilitätsabrufs zusammen /US-03 19/. Andere temporale Komponenten technischer Flexibilitätsabrufe wie Aktivierungsdauer, Anstiegsdauer, Deaktivierungsdauer und Regenerationsdauer /US-03 19/ vernachlässigt die weitere Analyse. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt die Abrufdauer folglich die Zeitdauer eines Flexibilitätsabrufs /FFE-05 17/.

Die Abrufhäufigkeit umfasst die Anzahl der durchgeführten Flexibilitätsabrufe in einem vorgegebenen Zeitraum /FFE 26 16/.

Die Sperrzeit beinhaltet „die Zeit, in der zwischen Flexibilitätsabrufen keine Lastflexibilisierung durchgeführt werden kann“ /FFE-26 16/.

Abbildung 3-1 visualisiert abschließend relevante Begriffe der Lastflexibilität.

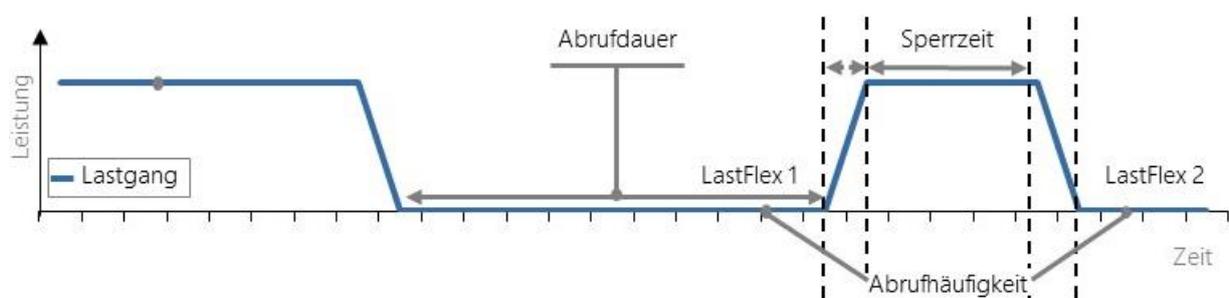


Abbildung 3-1: Begriffe der Lastflexibilität

Flexibilität und Effizienz

Die Theorie unterscheidet zwischen positiver, negativer und indifferenter Wirkung verbesserter Effizienz auf das Flexibilitätspotenzial /HÜB-01 17/, /AGORA-05 16/. Wirkt die Effizienzmaßnahme positiv auf die Flexibilität hat eine Steigerung der Energieeffizienz eine Steigerung des Flexibilitätspotenzials zur Folge /HÜB-01 17/. Beispielsweise führt die Elektrifizierung einer nichtelektrifizierten Anlage zu einer Erhöhung des Flexibilitätspotenzials /HÜB-01 17/, /FFE-26 16/, /FFE-16 15/. Reduziert die Effizienzmaßnahme die Leistung einer Produktionsanlage wirkt die verbesserte Effizienz negativ auf das Flexibilitätspotenzial /HÜB-01 17/, /DENA-01 16/, /IWU-03 15/. Bei gleicher Produktionsmenge könnte beispielsweise durch die Steigerung der Effizienz eine leistungsstärkere, durch eine leistungsschwächere Anlage ersetzt werden /HÜB-01 17/, /FFE-26 16/, /AGORA-05 16/. Beeinflusst die Effizienzmaßnahme das Flexibilitätspotenzial nicht, spricht die Theorie von Indifferenz.

In der vereinfachten Modellabbildung senken klassische Energieeffizienzmaßnahmen den Energieverbrauch und damit auch die für die Flexibilität zur Verfügung stehende Leistung. Damit sinkt das Flexibilitätspotenzial mit dem zunehmenden Einsatz von Effizienzmaßnahmen. Die Ausnahme bilden Elektrifizierungstechnologien, welche mit einem erhöhten Stromverbrauch und damit einer Leistungserhöhung einhergehen.

Im Gegensatz zur differierenden Wirkung von Effizienzmaßnahmen auf die Flexibilität reduziert erhöhte Flexibilität die Prozesseffizienz meist /HÜB-01 17/, /EANRW-01 16/, /FFE-26 16/, /AGORA-05 16/. Vermehrte An- und Abfahrvorgänge, der Betrieb der Anlage in suboptimalen Arbeitspunkten, Speicherverluste und erhöhte Stand-by Zeiten sind in dieser Hinsicht als Hauptfaktoren zu nennen, welche die Effizienz negativ beeinflussen /HÜB-01 17/, /FFE-26 16/, /AGORA-05 16/, /UBA-05 15/. Die nachfolgende Analyse vernachlässigt die Verringerung der Prozesseffizienz durch zusätzliche Flexibilität.

Das Sektormodell Industrie (Smlnd)

Die Modellierungsarbeiten zur Ableitung der Auswirkungen von CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität erweitern das bestehende Sektormodell Industrie (Smlnd) um ein Flexibilitätsmodul.

Smlnd führt bisher diskrete energie- und emissionsdynamische Berechnungen mit variablen Zeithorizont durch, um die industrielle Entwicklung abzubilden /FFE-39 20/, /FFE-09 20/. Das Sektormodell verfügt über mehrere Substrukturen, welche die gesamte deutsche Industrie top-down in 14 Wirtschaftszweige (Branchen) nach /ISI-07 19/ unterteilt /FFE-39 20/. Matrizen kombinieren die Verbräuche der Wirtschaftszweige energieträger- und anwendungsscharf /FFE-39 20/. Insgesamt unterscheidet das Modell elf Energieträger⁷ sowie 14 Strom⁸- und acht Brennstoffanwendungen⁹ /FFE-39 20/, /BMW-06 18/, /ISI-07 19/, /LEE-01 02/. Der Energieverbrauch auf Wirtschaftszweigebene untergliedert sich in prozessspezifische- und prozessunspezifische Verbräuche /FFE-39 20/. Die Prozessverbräuche umfassen 42 ausgewählte energie- und emissionsintensive industrielle Produktionsverfahren¹⁰, welche über Aktivitätsgrößen abgebildet werden. Jährliche Produktionsmengen /FFE-39 20/, /BRD-04 19/, /ISI-07 17/ und spezifische Strom- sowie Brennstoffverbräuche bilden die Grundlage zur energetischen Modellierung der industriellen Produktionsverfahren /FFE-39 20/. Eingehende und ausgehende Materialien je Prozess ermöglichen weiterhin die Konstruktion von Massenbilanzen /FFE-39 20/ und damit die Verknüpfung von industriellen Wertschöpfungsketten. Die prozessunspezifischen Verbräuche umfassen den Restverbrauch der Wirtschaftszweige abzüglich der Energieverbräuche bottom-up modellierter industrieller Produktionsverfahren /FFE-39 20/.

Referenzszenarien bilden die Grundlage der modellgestützten Analysen in Smlnd. Hauptsächlich basierend auf prospektiven ökonomischen Kenngrößen (€) und Energieintensitäten (€/MWh) der deutschen Industrie umfasst das Referenzszenario die Energie- und Emissionsentwicklung der historischen Basisjahre (2015 - 2018) bis 2050 /FFE-39 20/.

Die im Technologiemitmixmodul berechneten Szenarien fußen auf dem Referenzmodul. Dabei wird die Referenzveränderung im Technologiemitmixmodul integriert. Darüber hinaus kombiniert das Technologiemitmixmodul zusätzliche individuelle THG-Verminderungsmaßnahmen und -technologien, um im Vergleich zur Referenz Transformationspfade mit höherem

⁷ Fossiles Öl, Fossile Gase, Sonstige fossile Gase, Fossile Kohlen, Biomasse, Sonstige Brennstoffe, Strom, Wasserstoff, synthetische gasförmige Kohlenwasserstoffe (synth. Gase), synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe (synth. Öl), synthetische feste Kohlenwasserstoffe (synth. Kohlen)

⁸ Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme kleiner 100 °C, Prozesswärme zwischen 100 °C und 200 °C, Prozesswärme zwischen 200 °C und 500 °C, Prozesswärme zwischen 500 °C und 1000 °C, Prozesswärme über 1000 °C, Prozesskälte, Klimakälte, Druckluft, Pumpen, Informations- und Kommunikationstechnologie, sonstige mechanische Energie, Beleuchtung

⁹ Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme kleiner 100 °C, Prozesswärme zwischen 100 °C und 200 °C, Prozesswärme zwischen 200 °C und 500 °C, Prozesswärme zwischen 500 °C und 1000 °C, Prozesswärme über 1000 °C, mechanische Energie

¹⁰ Produktionsprozesse: z.B. Ammoniak, Kalk, Klinker, Methanol, Polyethylen, Primäraluminium, Primärstahl, Zement

Klimaschutzambitionsniveau abzuleiten. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, prospektive energiewirtschaftliche Parameter der deutschen Industrie bei hohem Klimaschutzambitionsniveau abzuleiten und technologiespezifische Analysen durchzuführen. Dabei finden Interdependenzen der individuellen Maßnahmen und der energiewirtschaftlichen Parameter im gesamten Industriesystem bei der Umsetzung im Technologiemitmixmodul Berücksichtigung /FFE-39 20/. Die grundlegende Technologiemodellierung und weitere Funktionalitäten des Modells sind /FFE-39 20/ und /FFE-09 20/ zu entnehmen. Das Simulationsmodell Smlnd ist weitestgehend in Matlab umgesetzt und nutzt eine postgres-sql basierte Datenbank zum Abruf der Eingangsdaten. Optimierungen führt das Modell mit CPLEX und der Matlab Optimization Toolbox aus.

4 Methoden

Abbildung 4-1 visualisiert die Vorgehensweise zur Untersuchung der Auswirkungen von CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität, welche im Wesentlichen vier Kernelemente umfasst.

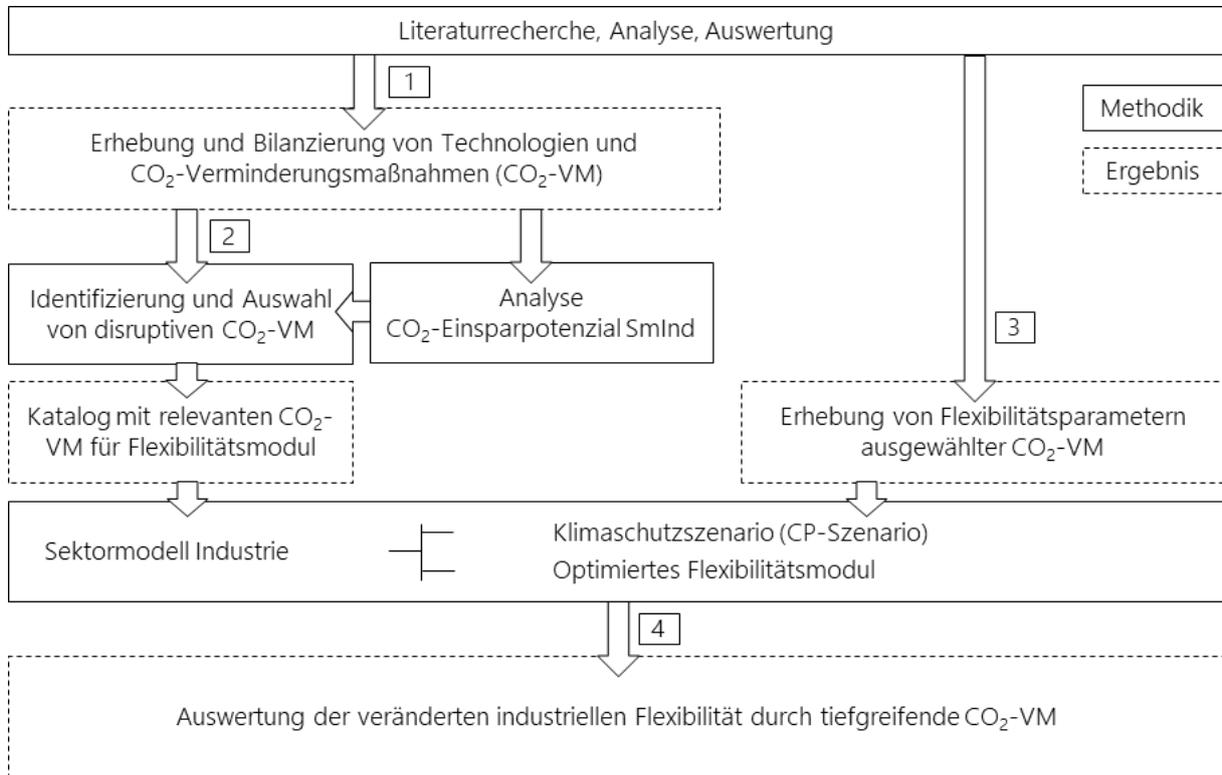


Abbildung 4-1: Methodenübersicht

Das erste Kernelement beinhaltet die Erhebung und Bilanzierung von Prozessen, Technologien und CO₂-Verminderungsmaßnahmen (1). Kernelement zwei umfasst die Methodenentwicklung und -anwendung zur Identifizierung und Auswahl disruptiver CO₂-Verminderungsmaßnahmen (2). Das dritte Kernelement enthält die Erhebung von Flexibilitätsparametern ausgewählter emissionsarmer Prozesse und Technologien der Industrie (3). Abschließend umfasst Kernelement vier die Methodenentwicklung und -anwendung des Flexibilitätsmoduls in Smlnd sowie die darauf basierende Szenarienanalyse und Auswertung der Ergebnisse (4).

4.1 Datenerhebung: Prozesse, Technologien und Maßnahmen

Anhand einer Metastudienanalyse werden Daten zu 42 Prozessen und 273 CO₂-Verminderungsmaßnahmen und -technologien teilweise neu erhoben oder bereits vorhandene Daten validiert und plausibilisiert. Auf dieser Datenbasis berechnet Smlnd die maßnahmenspezifische CO₂-Verminderung.

Zu den Maßnahmen und Technologien werden neben allgemeinen Informationen auch technische Daten und Kosten bottom-up ermittelt. Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die erhobenen und validierten Parameter.

Tabelle 4-1: Erhobene und validierte Parameter der Prozesse, Maßnahmen und Technologien

Kategorie	Parameter
Kosten	Spezifische Investitionen (€/t)
	Spezifische Fixe Betriebskosten (€/t)
Energieverbrauch	Spezifischer Stromverbrauch (MWh/t)
	Spezifischer Brennstoffverbrauch (MWh/t)
	Brennstoffverteilung nach Energieträger (dl)
Sonstige	Prozessemissionsfaktor (tCO ₂ /t)
	Nutzungsdauer (a)
	Jahr der technischen Verfügbarkeit (Jahr)
	Anwendungspotenzial (dl)

Die Datenerhebung nutzt Forschungsberichte sowie Fachveröffentlichungen. Die Literatur stammt meist von Verbänden, Forschungsinstituten, Beratungsunternehmen und Universitäten. Überwiegend zur Datenvalidierung und -plausibilisierung werden sieben Interviews mit Industrieexperten durchgeführt. Ein Fragenkatalog, vorab per E-Mail verschickt, bildet die Grundlage für den persönlichen Austausch mittels Video- oder Telefonkonferenz. Die Auswahl der Experten erfolgt anhand des Netzwerks der FfE.

4.2 Auswahl disruptiver CO₂-Verminderungsmaßnahmen

Die in Abbildung 4-2 dargestellte Methode beschreibt die Auswahl relevanter CO₂-Verminderungsmaßnahmen unter Berücksichtigung flexibilitätsrelevanter Parameter anhand der zuvor erhobenen Technologien und Maßnahmen.

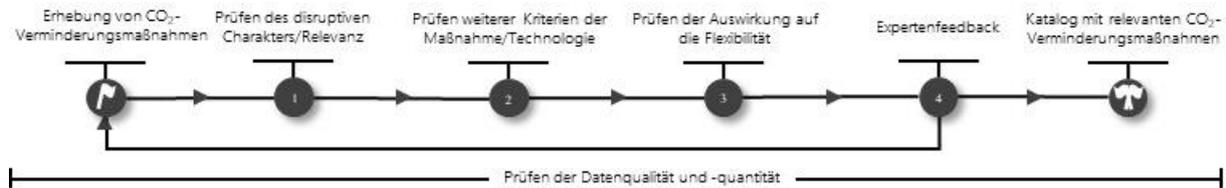


Abbildung 4-2: Methodik zur Identifizierung und Auswahl von disruptiven CO₂-Verminderungsmaßnahmen

CO₂-Verminderungsmaßnahmen werden nur dann berücksichtigt, falls die individuelle Maßnahme alle Kriterien der vordefinierten Prüfschritte erfüllt. Die Aufnahme erfordert in allen Prüfschritten eine hohe Datenqualität und -quantität. Die vollumfängliche Methode zeigt Abbildung 9-1 im Anhang.

Im ersten Schritt (1) prüft die Methode den disruptiven Charakter der CO₂-Verminderungsmaßnahmen, welcher ein hohes CO₂-Verminderungspotenzial oder eine tiefgreifende Änderung des Produktionsprozesses voraussetzt. Hohe CO₂-Verminderungspotenziale beziehen sich dabei nicht nur auf Einzelmaßnahmen, sondern können auch aus einer sinnvollen Clusterung hervorgehen. Die initiale CO₂-Verminderung je Maßnahme berechnet Smlnd. Anhand der CO₂-Verminderung werden die Maßnahmen priorisiert und absteigend angeordnet. Basierend auf der entstehenden Rangfolge und weiteren Kriterien¹¹ wählen die Autoren relevante Maßnahmen für die weitere Flexibilitätsbetrachtung aus.

Im zweiten Schritt (2) prüft die Methode drei weitere notwendige Kriterien, um die Maßnahme für die Flexibilitätsbetrachtung zu qualifizieren:

- Technologien der Maßnahme bis 2050 technisch verfügbar
- Maßnahme klar dem Industriesektor zuzuordnen
- Wirtschaftsleistung bleibt durch Maßnahme unverändert, kein Carbon Leakage

Anhand zweier Kriterien prüft die Methode zudem im dritten Schritt (3), ob sich die Umsetzung der Maßnahmen prospektiv auf die Flexibilität auswirkt:

- Änderung des elektrischen Verbrauchs durch die Maßnahme (gleichbedeutend der Änderung der elektrischen Leistung)
- Veränderung von Flexibilitätsparametern durch die Umsetzung einer Maßnahme

Ist mindestens eines der beiden Kriterien erfüllt, gilt der Prüfabschnitt als erfüllt.

Im letzten Schritt (4) validieren und plausibilisieren interne FfE-Industrieexperten die Maßnahmenauswahl. Dabei wird u.a. sichergestellt, dass tiefgreifende Maßnahmen nicht irrtümlich in einem früheren Prüfschritt verworfen wurden. Etwaige Maßnahmen werden zusätzlich in den Katalog der relevanten CO₂-Verminderungsmaßnahmen aufgenommen.

¹¹ z.B. tiefgreifende Veränderung des Produktionsprozesses und Erfahrungen von Industrieexperten

4.3 Erhebung von Flexibilitätsparametern

Für die ausgewählten CO₂-Verminderungsmaßnahmen und die zugrunde liegenden Prozesse und Technologien sind Flexibilitätsparameter zu erheben.

Einige Prozesse und Technologien, wie bspw. die Sekundärstahlproduktion, sind hinsichtlich ihrer Flexibilitätsparameter bereits umfangreich bilanziert in SynErgie /IPA-01 19/. Andernfalls nutzen die Autoren ein hybrides Verfahren bestehend aus bottom-up und top-down Ansätzen zur Datenerhebung. Sofern die Datenverfügbarkeit es erlaubt, werden die notwendigen Parameter bottom-up berechnet. Im Falle geringer Datenverfügbarkeit nutzt das hybride Verfahren top-down verfügbare Daten und trifft stellenweise notwendige plausible Annahmen.

Exogene Flexibilitätsparameter, welche in das SmInd-Flexibilitätsmodul einfließen, fasst Tabelle 4-2 zusammen.

Tabelle 4-2: Flexibilitätsparameter des Flexibilitätsmoduls

Flexibilitätsparameter	Einheit
Betriebsstunden pro Jahr	h/a
Volllaststunden pro Jahr	h/a
Spezifische elektrische Leistung	MW/t bzw. kW/kWh
Spezifischer Physischer Speicher	kWh/kW
Speicherbare Teilmenge je Stunde	dl
Sperrzeit nach Flexibilitätsabruf	h
Maximale Abrufhäufigkeit in Folge	h
Maximale Abrufhäufigkeit pro Jahr	h/a bzw. Abrufe/a
Teillastfähigkeit	Ja oder Nein

Neben den bereits bekannten, grundlegenden Begriffen werden die neuen und wenig verbreiteten Begriffe nachfolgend beschrieben und ggf. kurz definiert.

Zunächst sind die Betriebsstunden, die Volllaststunden sowie der spezifische Stromverbrauch zu erheben. Die Volllaststunden ergeben sich aus der Jahressumme der tatsächlichen geteilt durch die maximal mögliche Last je Zeitschritt. Sie dienen der Erstellung von Lastgängen und bilden die Ausgangsbasis für weitere Berechnungen.

Da die Lastgänge stundenaufgelöst vorliegen, wird die Abrufdauer pro Stunde definiert, welche sich zwischen 0 und 1 bewegt. Ein Abruf mit einer maximalen Dauer von 30 Minuten pro Stunde würde eine maximale Abrufdauer von 0,5 bedeuten.

Zudem ist die Anzahl aufeinanderfolgender Abrufe begrenzt. Die maximale Abrufhäufigkeit in Folge (Stunden) reflektiert technische Restriktionen. Bspw. kann die Aluminiumelektrolyse maximal vier Stunden in Folge abgeschaltet werden, bevor sie irreparabel zerstört werden würde /WIE-01 15/, /DOW-01 13/, /ARNO-01 12/. Die maximale Abrufhäufigkeit pro Jahr je Prozess und Technologie reflektiert Restriktionen, welcher typischerweise bei Prozessen aus der unternehmerischen Aufgabe der Wertschöpfung entspringen.

Die spezifische elektrische Leistung berechnet sich aus der Division des spezifischen elektrischen Energieverbrauchs und der Volllaststunden eines Prozesses oder Technologie.

Physische Speicher (z.B. Silos, Läger, Wasserspeicher) werden in Energiemengen umgerechnet, um diese direkt im Flexibilitätsmodul nutzen zu können. Die berechnete Energiemenge wird zudem auf die hinterlegte Leistung bezogen, um anhand des in den Szenarien berechneten Hochlaufs der Prozesse und Technologien eine absolute speicherbare Energiemenge ableiten zu können.

Da der Lastgang stundenaufgelöst vorliegt, wird für Prozesse und Technologien mit einer maximalen Abrufdauer kleiner einer Stunde die speicherbare Teilmenge je Stunde berechnet. Kann ein Prozess wie die Sekundärstahlherstellung bspw. nur 2,5 Minuten Flexibilität abrufen, ergibt sich eine speicherbare Teilmenge von 0,042 min/h.

4.4 Grundlagen des Flexibilitätsmoduls

Die Erweiterung des Sektormodells Industrie um ein Flexibilitätsmodul dient zur Ableitung von Flexibilitätspotenzialen industrieller Prozesse und Technologien. Das Flexibilitätsmodul bildet die programmatische Grundlage zur Analyse der Auswirkungen von CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität.

Das Flexibilitätsmodul kann in drei grundlegende Operationen unterteilt werden:

- Datengrundlage
- Optimierungsproblem und gemischt-ganzzahlige Optimierung
- Modulspezifische Datenaufbereitung

4.4.1 Datengrundlage

Zur Ableitung von Flexibilitätspotenzialen nutzt das Flexibilitätsmodul Stromlastgänge von Prozessen und Technologien. Aufgrund der mangelnden Verfügbarkeit von realen Datensätzen werden die Lastgänge basierend auf vorhandenen synthetischen Lastgängen konstruiert.

Die in normierter Form vorliegenden Lastgänge je Wirtschaftszweig fußen auf realen Daten industrieller Unternehmen, welche anhand von Produktionsindices und Typtagen synthetisiert werden. Die normierten Lastgänge der Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel stützen sich auf unternehmensscharfe Raumwärme- und Warmwasserlastgänge und werden anhand von Wärmeprofilen und Typtagen synthetisiert. Die genaue Vorgehensweise zur Konstruktion der synthetischen Lastgänge beschreiben Ganz et al. in /FFE-02 21/.

Zur Konstruktion der Lastgänge des Flexibilitätsmoduls nutzt das Modell neben den normierten Lastprofilen exogene prozess- und technologiespezifische Parameter wie beispielsweise die Volllaststunden. Weiterhin fließen modellendogene Ergebnisse anderer Smlnd-Module, darunter der Stromverbrauch je Prozess, Technologie und Maßnahme, in die Gestaltung mit ein. Die zugrundeliegenden Modellierungsmethoden der Technologiediffusion entstammen /FFE-39 20/ und /FFE-09 20/.

Abbildung 4-3 zeigt schematisch die Adaption der Lastgänge von Wirtschaftszweig- auf Prozess- und Technologieebene anhand der Volllaststunden.

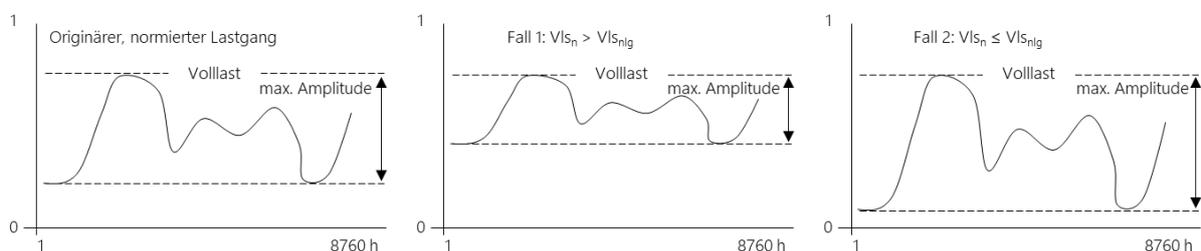


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Anpassung des normierten Lastgangs in Abhängigkeit der exogenen Volllaststunden

Links enthält Abbildung 4-3 einen fiktiven Wirtschaftszweiglastgang, bei dem die maximale Amplitude sowie der Volllastzustand gekennzeichnet sind. Das mittlere Element der Abbildung erklärt die Anpassung des normierten Lastgangs, falls die exogenen Volllaststunden (Vls_n) höher als die Volllaststunden des originären Lastgang (Vls_{nlg}) sind. Dabei nähern sich die normierten Werte auf der Ordinate an die Volllast bei gleichzeitig sinkender maximaler

Amplitude an. Reziprok zeigt Abbildung 4-3 rechts die Anpassung des normierten Lastgang bei niedrigeren exogenen Volllaststunden im Vergleich zum originäre Lastgang. Der Effekt kehrt sich um. Der angepasste normierte Lastgang je Prozess-; Technologie und Maßnahme wird abschließend mit dem Stromverbrauch des Szenarios skaliert.

Die dahinterstehenden mathematischen Operationen der Konstruktion des skalierten Lastgangs beschreiben die Formeln (4-1), (4-2), (4-3), (4-4), (4-5), (4-6) und (4-7).

Zunächst sind die Volllaststunden des originären, normierten Lastgangs zu berechnen. Anschließend wird das Delta zwischen den exogen vorgegebenen Volllaststunden und der Volllaststunden des normierten Lastgangs berechnet. Die Parameter ergeben sich nach den Formeln in (4-1),

$$m = \max \overrightarrow{nlg}$$

$$Vls_{nlg} = \sum_{t=1}^{8760} \left[\frac{nlg}{m} \right]_t \quad (4-1)$$

$$\Delta Vls = Vls_n - Vls_{nlg}$$

m	(dl)	Maximum des normierten Lastgangs	\overrightarrow{nlg}	(dl)	Vektor mit normierten Stundenwerten des Jahreslastgangs
Vls_{nlg}	(h/a)	Volllaststunden des normierten Jahreslastgangs	ΔVls	(h/a)	Differenz der Volllaststunden des normierten Jahreslastgangs und der exogenen Vorgabe
Vls_n	(h/a)	Neue Volllaststunden pro Jahr, exogene Vorgabe je Prozess, Technologie, Maßnahme			

Ziel dabei ist es, das Delta der Volllaststunden so auf die Zeitreihe zu verteilen, dass der angepasste Lastgang die exogen vorgegebenen Volllaststunden aufweist. Mit Ausnahme von Nullwerten und den Maxima werden hierzu alle Zeitschritte angepasst. Die Nullwerte verbleiben unverändert, da die Auslastung von industriellen Prozessen meist sehr hoch ist und die verbleibenden Stillstandszeiten häufig für Revision und Anlagenersatz genutzt werden. Stillstandszeiten, gekennzeichnet durch Zeitschritte mit Nullenergieverbrauch, werden deshalb als starr angenommen und annahmegemäß nicht flexibilisiert.

Die maximalen Volllaststunden pro Jahr sind dementsprechend nach oben durch die Jahresstunden und die vorhanden Stillstandszeiten gedeckelt. Das Modell prüft zunächst, ob die exogen vorgegebenen Volllaststunden bei originärem Lastgang anwendbar sind. Dafür ist die Ungleichung in (4-2) aufrechtzuerhalten:

$$x_t = \begin{cases} 1, & \text{wenn } nlgt \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } nlgt = 0 \end{cases} \text{ für } \forall t \in \{1 \dots 8760\}$$

$$Vls_n \leq \sum_{t=1}^{8760} x_t \quad (4-2)$$

$nlgt$	(MW/h)	Normierter Lastgang zum Zeitpunkt t	x_t	(bin)	Indikatorvariable zum Zeitpunkt t zur Ableitung der maximalen Volllaststunden
--------	--------	-------------------------------------	-------	-------	---

Anschließend können die veränderten Volllaststunden auf die Zeitreihe verteilt werden. Die Ausgangsbasis bildet der zeitaufgelöste, stündliche Auslastungsgrad, berechnet anhand Formel (4-3).

$$\vec{a}_{nlg} = \frac{n\vec{lg}}{m} \quad (4-3)$$

\vec{a} (dl) Zeitreihe mit dem Auslastungsgrad des originären, normierten Lastgangs

Bei der Verteilung der veränderten Volllaststunden auf die Zeitreihe sind anhand des Vorzeichens der Delta-Volllaststunden zwei Fälle zu unterscheiden (vgl. Abbildung 4-3):

- (1) Ist eine Erhöhung der Volllaststunden ($Vls_n > Vls_{nlg}$) und damit eine Verminderung der Amplitude¹² des normierten Lastgangs notwendig, werden nach Formel (4-4) die Zeitschritte ermittelt, bei welchen eine Erhöhung der Auslastung in Relation zum Maximum möglich ist. Wird die Technologie bereits in Volllast betrieben, ist keine weitere Erhöhung mehr möglich. Ist die Technologie im jeweiligen Zeitschritt nicht im Einsatz, ist nach Formel (4-5) eine Erhöhung ebenfalls nicht möglich ($y_t = 0$).
- (2) Ist eine Verringerung der Volllaststunden ($Vls_n \leq Vls_{nlg}$) und damit eine Erhöhung der Amplitude des normierten Lastgangs notwendig, werden nach Formel (4-4) die Zeitschritte ermittelt, bei welchen eine Verringerung der Auslastung in Relation zum Minimum möglich ist (vgl. Formel (4-4)). Eine Verringerung der bereits vorhandenen Maxima je Zeitschritt verhindert Formel (4-5).

Ziel der Heuristik ist es, den normierten Lastgang jeweils in den Zeitschritten zu erhöhen (1) bzw. zu verringern (2), welche sich zwischen Minimum und Maximum bewegen.

$$\vec{y} = \begin{cases} \frac{m - n\vec{lg}}{m}, & \text{wenn } \Delta Vls \geq 0 \\ \frac{n\vec{lg}}{m}, & \text{wenn } \Delta Vls < 0 \end{cases} \quad (4-4)$$

$$y_t = \begin{cases} 0, & \text{wenn } y_t = 1 \\ y_t, & \text{wenn } 0 \leq y_t \leq 1 \end{cases} \quad (4-5)$$

\vec{y} (dl) Hilfsvektor, Relation zum Maximum in Abhängigkeit des Vorzeichens von ΔVls | y_t (dl) Wert des Hilfsvektors in Zeitschritt t

Das Modul zur Datenaufbereitung berechnet daraufhin die Verteilung der Zeitreihe \vec{y} und multipliziert sie mit den Delta-Volllaststunden ΔVls . Das Ergebnis addiert das Modul zur ursprünglich berechneten Zeitreihe des Auslastungsgrads. Die Formeln in (4-6) beschreiben den Vorgang.

$$\vec{pct}_y = \frac{\vec{y}}{\sum_{t=1}^{8760} y_t} \quad (4-6)$$

$$\vec{a}_n = \vec{a}_{nlg} + \vec{pct}_y \cdot \Delta Vls$$

\vec{pct}_y (dl) Verteilung des Hilfsvektors | \vec{a}_n (dl) Neue Verteilung des Auslastungsgrads

Dabei stellt das Vorgehen sicher, dass

- (1) bei einer exogenen Erhöhung der Volllaststunden ($\Delta Vls \geq 0$) die Zeitschritte mit der größten Differenz zum Maximum am stärksten erhöht werden.
- (2) bei einer exogenen Verringerung der Volllaststunden ($\Delta Vls < 0$) die Zeitschritte mit der größten Differenz zum Minimum am stärksten abgesenkt werden.

¹² mit Ausnahme der Stillstandszeiten

Zuletzt renormiert das Modul die berechnete Zeitreihe des Auslastungsgrads und skaliert den Lastgang anhand der jahresspezifischen Energieverbräuche je Technologie, Prozess und Maßnahme nach den Formeln in (4-7).

$$\vec{nlg}_n = \frac{\vec{a}_n}{\sum_{t=1}^{8760} a_t} \tag{4-7}$$

$$\vec{l}g_{st} = \vec{nlg}_n \cdot E$$

\vec{nlg}_n	(dl)	Zeitreihe mit angepassten, normierten Lastgang und Volllaststunden Vl_{s_n}	a_t	(dl)	Auslastungsgrad in Zeitschritt t
$\vec{l}g_{st}$	(MWh)	Zeitreihe mit jahresspezifischen, stündlichen Stromlastgang	E	(MWh)	Jahresspezifischer Energieverbrauch des Prozesses, Technologie, Maßnahme

Zur Skalierung normierter Prozesslastgänge kann direkt der Energieverbrauch des Prozesses je Szenario genutzt werden. Um den normierten Stromlastgang industrieller Technologien skalieren zu können, wird der im Szenario berechnete, zusätzliche elektrische Energieverbrauch infolge der Umrüstung konventioneller Wärmeerzeuger auf Wärmepumpen und Elektrodenkessel in einem Temperaturband zwischen 0 °C und 200 °C herangezogen. Der Stromlastgang der CO₂-Abscheidung wird anhand des normierten Prozesslastgang und des im Szenario entstehenden, zusätzlichen Stromverbrauchs der CO₂-Abscheidung konstruiert. Diese Methode geht davon aus, dass die CO₂-Abscheidung kontinuierlich in Abhängigkeit des Prozessabgasstroms betrieben wird.

Zusätzlich zu den Lastgängen implementiert das Modul weitere relevante und meist begrenzend wirkende, exogenen Flexibilitätsparameter je Prozess, Technologie und Maßnahme. Darunter fallen die minimale und maximale Speicherkapazität, die maximale Abrufhäufigkeit pro Jahr und die maximale Abrufdauer in Stunden.

Als Flexibilitätssignal (Kosten) nutzt das Modul Strompreise. Für vergangene Jahre verwendet das Modell die realen Day-Ahead Strompreise. Prospektiv greift es auf Strompreisprojektionen des FfE-eigenen Fundamentalmodells „ISAaR“ zurück /FFE-70 19/. Da in der ISAaR das Angebot stets die Nachfrage in der Optimierung decken muss und zudem perfekte Voraussicht herrscht, entstehen keine negativen Strompreise im Modell. Um die Strompreise und damit das Optimierungsergebnis des Flexibilitätsmoduls vergleichbar zu machen, passt das Datenmodul die realen Strompreise der historischen Basisjahre an, indem es die negativen Strompreise gleich Null setzt.

4.4.2 Optimierungsproblem und gemischt-ganzzahlige Optimierung

Das Optimierungsproblem und die gemischt-ganzzahlige Optimierung bilden das Kernelement des Flexibilitätsmoduls. Einleitend beschreibt Abbildung 4-4 konzeptionell die Funktionsweise, mit welcher die Flexibilität von Prozessen, Technologien und Maßnahmen abgeleitet wird. Dabei beschreibt (1) die Ableitung von Flexibilität bei Prozessen und der CO₂-Abscheidung, wohingegen (2) die Flexibilität bei Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln charakterisiert.

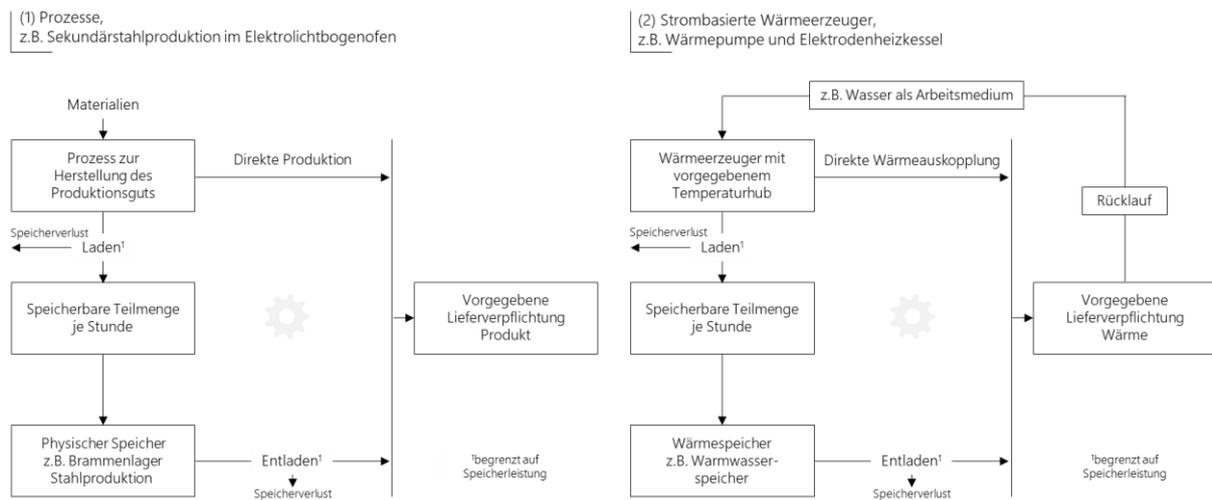


Abbildung 4-4: Konzeptionelle Darstellung der Funktionalität des Flexibilitätsmoduls für Prozesse (1) und strombasierte Wärmeerzeuger (2)

Abbildung 4-4 verdeutlicht, dass Prozesse und Wärmeerzeuger die Flexibilität durch physische Material- und Wärmespeicher generieren. Dabei entstehen sowohl bei der Be- als auch Entladung Verluste. Speichergradienten begrenzen das Be- und Entladen. Da die Lastgänge in stündlicher Auflösung vorliegen, werden Flexibilitätsabrufe ebenfalls in stündlicher Auflösung induziert. Viele Prozesse können aufgrund ihrer technischen Voraussetzungen oder Betriebsweise keine volle Stunde Flexibilität abrufen. Deshalb wird ein Zwischenparameter eingeführt, welcher die speicherbare Teilmenge je Stunde abbildet. Kann ein Prozess wie die Sekundärstahlherstellung bspw. nur 2,5 Minuten Flexibilität abrufen, ergibt sich eine speicherbare Teilmenge von 0,042 min/h. Prozesse und Wärmeerzeuger entscheiden in Abhängigkeit der Kosten und des aktuellen Speicherfüllstands, inwieweit der originäre Lastgang aus der direkten Produktion oder dem Speicher gedeckt wird. Der originäre Lastgang stellt dabei ggü. dem optimierten Lastgang Anforderung auf Erfüllung. Im gesamten Optimierungsproblem werden die verwendeten Parameter in funktionale Einheiten umgerechnet. So errechnet das Modul bspw. für den physischen Materialspeicher in Abhängigkeit des Energieverbrauchs je Tonne Produkt und der Lagerkapazität eine minimale und maximale speicherbare Energiemenge.

Die zugrundeliegenden mathematischen Operationen des Optimierungsproblems und der gemischt-ganzzahligen Optimierung beschreiben die Formeln (4-8)

Die Zielfunktion der gemischt-ganzzahligen Optimierung besteht aus drei Komponenten:

- (1) Stromkosten in Abhängigkeit des Stromverbrauchs und des Strompreises je Jahresstunde

- (2) Verluste in Abhängigkeit der Be- und Entladung des Speichers, ausgedrückt durch Stromkosten und Effizienz. Bei Be- und Entladung des Speichers wird jeweils eine Effizienz von 95 % angenommen.
- (3) Variable Kosten für den Flexibilitätseinsatz, ausgeführt als Indikatorvariable mit marginalem Wert

Formel (4-8) beschreibt die Zielfunktion des Flexibilitätsmoduls.

$$\min C = E_t \cdot c_t + s_t \cdot c_t \cdot \eta_s + iv_t \cdot c_f \tag{4-8}$$

C	(€)	Absolute Strom- und Speicherkosten des Prozesses/Technologie	c_t	(€/MWh)	Spezifische Stromkosten in Zeitschritt t
E_t	(MWh)	Energieverbrauch des Prozesses/Technologie in Zeitschritt t	c_f	(€)	Weitere variable und fixe Kosten des Flexibilitätsabrufs, marginal, konstant
iv_t	(bin)	Flexibilitätsindikator in Zeitschritt t	s_t	(MWh)	Eingespeicherte Energiemenge
η_s	(dl)	Effizienz bei Be- und Entladen des Speichers, konstant			

Das Modell nimmt an, dass die Jahressumme der Produktionsänderungen und damit der Energiemengen Null ergibt. Alle Flexibilitätsabrufe innerhalb eines Jahres sind somit auszugleichen. Das Flexibilitätsmodul ist folglich an Gleichung (4-9) gebunden:

$$\sum_{t=1}^{8760} E_{opt,t} = \sum_{t=1}^{8760} E_{v,t} \tag{4-9}$$

$E_{opt,t}$	(MWh)	Energieverbrauch in Zeitschritt t, optimiert	$E_{v,t}$	(MWh)	Energieverbrauch in Zeitschritt t, vorher
-------------	-------	--	-----------	-------	---

Aufbauend auf Gleichung (4-9) enthalten die Kontinuitätsgleichungen in (4-10), (4-11) und (4-12) die grundlegende Funktionalität der Optimierung, welche konzeptionell in Abbildung 4-4 beschrieben wird. Die anhand Leistungen beschriebenen Kontinuitätsgleichungen sind durch die Begrenzung auf Stundenlastgänge im Modell anhand der Multiplikation mit 1 h auch als Energiemengen zu verstehen.

Prozesse und Technologien können sowohl direkt die vorgegebenen Lieferverpflichtungen decken als auch den Speicher beladen. Die Kontinuität beschreibt Gleichung (4-10).

$$P_{p,t} = P_{dp,t} + P_{s_{in},t} \tag{4-10}$$

$P_{s_{in},t}$	(MW)	Leistung der Beladung des Speichers in Zeitschritt t	$P_{dp,t}$	(MW)	Leistung der direkten Produktion in Zeitschritt t
$P_{p,t}$	(MW)	Leistung des Prozesses in Zeitschritt t			

Prozesse und Technologien wohnt nach Gleichung (4-11) die Möglichkeit inne, die vorgegebenen Lieferverpflichtungen sowohl aus der direkten Produktion als auch dem Speicher decken zu können.

$$P_{lv,t} = P_{dp,t} + P_{s_{out},t} \tag{4-11}$$

$P_{lv,t}$	(MW)	Vorgegebene Leistung der Lieferverpflichtung	$P_{s_{out},t}$	(MW)	Leistung der Entladung des Speichers in Zeitschritt t
------------	------	--	-----------------	------	---

Die Kontinuitätsgleichung des Bilanzraums über Produktion und Speicherung ergibt sich nach Gleichung (4-12).

$$P_{p,t} = P_{lv,t} + P_{s_{in},t} - P_{s_{out},t} \quad (4-12)$$

Die konzeptionelle Darstellung in Abbildung 4-4 verdeutlicht darüber hinaus, dass sich die direkte Produktion nur aus dem Prozess speist. Somit muss die Leistung der direkten Produktion stets kleiner als die Leistung des Prozesses sein. Ungleichung (4-13) operationalisiert diese Erkenntnis.

$$P_{p,t} \leq P_{dp,t} \quad (4-13)$$

Die Kontinuitätsgleichungen des Speichers in (4-14) ergänzen die bilanzielle Beschreibung des Optimierungsproblems.

$$\begin{aligned} E_{s,b,t=1} &= E_{s,start} \\ E_{s,e,t=8760} &= E_{s,b,t=1} \\ E_{s,b,t+1} &= E_{s,e,t} \\ E_{s,e,t} &= E_{s,b,t} + E_{s,in,t} - E_{s,out,t} \end{aligned} \quad (4-14)$$

$E_{s,b,t=1}$ (MWh)	Speicherfüllstand zum Beginn einer Stunde	$E_{s,start}$ (MWh)	Exogene Vorgabe des Speicherfüllstands zum Jahresstart
$E_{s,e,t}$ (MWh)	Speicherfüllstand am Ende einer Stunde	$E_{s,in,t}$ (MWh)	Beladen des Speichers
$E_{s,out,t}$ (MWh)	Entladen des Speichers		

Weiterhin stellt das Flexibilitätsmodul mit Formel (4-15) sicher, dass sich der Speicher weniger stark entlädt, als es der Speicherfüllstand und das Speicherminimum zulassen. Darüber hinaus gibt Ungleichung (4-16) vor, dass sich der Speicher nicht stärker belädt, als es der Speicherfüllstand und das Speichermaximum zulassen.

$$E_{s,out,t} \leq E_{s,b,t} - E_{s,min} \quad (4-15)$$

$$E_{s,in,t} \leq E_{s,max} - E_{s,b,t} \quad (4-16)$$

$E_{s,min}$ (MWh)	Minimaler Speicherfüllstand, exogen	$E_{s,max}$ (MWh)	Maximaler Speicherfüllstand, exogen
-------------------	-------------------------------------	-------------------	-------------------------------------

Die Optimierung nutzt immer dann die Flexibilität des Systems, wenn die vorgegebene Lieferverpflichtung nicht ausschließlich aus der direkten Produktion gedeckt wird. Daraus folgt, dass Flexibilität immer dann bereitgestellt wird, wenn die Be- und Entladung des Speichers positiv ist. Um Flexibilität anzuzeigen, nutzt die Optimierung die ganzzahlige Indikatorvariable iv_f in der Indikatorrestriktion (4-17). Bei Be- und Entladung des Speichers wird die Indikatorvariable gezwungen den Wert 1 anzunehmen. Da die Indikatorvariable zudem marginal in der Zielfunktion enthalten ist und Kosten verursacht, versucht das Modell bei der Variablen den Wert 0 zu erzeugen. Zudem beschränkt die Restriktion die Lade- und Entladeleistung auf den minimalen und maximalen Gradienten.

$$P_{s_{in},t} + P_{s_{out},t} \leq grad(P_{max}) \cdot iv_{f,t}$$

$$P_{s_{in},t} + P_{s_{out},t} \geq grad(P_{min}) \cdot iv_{f,t} \quad (4-17)$$

$grad(P_{max})$ (MW)	Maximaler Gradient der Lade- und Entladeleistung, konstant	$grad(P_{min})$ (MW)	Minimaler Gradient der Lade- und Entladeleistung, konstant
$iv_{f,t}$ (bin)	Indikatorvariable Flexibilität in Zeitschritt t		

Die nachfolgenden Restriktionen des Optimierungsproblems grenzen den Raum der Zielfunktion weiter ein.

Aufgrund der stündlichen Auflösung des Lastgangs sind theoretisch maximal 8760 Flexibilitätsabrufe pro Jahr möglich. Diese werden jedoch durch die notwendige Nachholzeit und Speicherrestriktionen weiter eingeschränkt. Ebenso beinhaltet das Modell eine exogene, maximale Abrufhäufigkeit pro Jahr, welche die Anzahl der Flexibilitätsabrufe nach Formel (4-18) weiter begrenzt.

$$\sum_{t=1}^{8760} iv_{f,t} \leq n_{eA} \quad (4-18)$$

$iv_{f,t}$ (bin)	Indikatorvariable für Flexibilitätsabrufe in Zeitschritt t	n_{eA} (Stk.)	Anzahl der exogen maximalen Flexibilitätsabrufe pro Jahr, konstant
------------------	--	-----------------	--

Direkt nach Flexibilitätsabrufen begrenzt die Sperrzeit die Abrufhäufigkeit. Um beispielsweise das Auskühlen der Mahlsysteme bei der Zementherstellung zu verhindern und damit die Produktqualität nicht zu beeinflussen, ist eine Sperrzeit von mindestens zwei Stunden anzunehmen ($n_s = 2$) /HÜB-01 17/. Je Prozess, Technologie und Maßnahme ist weiterhin modellseitig vorgegeben, wie hoch die Anzahl an stündlichen Flexibilitätsabrufen in Folge maximal sein darf. Beispielsweise verhindert das sehr kleine thermische Arbeitsfenster konventioneller Aluminiumelektrolysezellen eine längere Abrufdauer als vier Stunden, da die Anlage andernfalls irreparabel beschädigt würde ($n_{Af} = 4$) /WIE-01 15/, /DOW-01 13/, /ARNO-01 12/. Ungleichung (4-19) beschreibt, dass die Anzahl der Flexibilitätsabrufe innerhalb der Zeitdauer bestehend aus der Summe n_s und n_{Af} maximal den Wert n_{Af} betragen darf.

$$\sum_{t=j}^{j+n_{Af}+n_s-1} iv_{f,t} \leq n_{Af}, \text{ für } \forall j \in \{1 \dots 8760 - n_{Af} - n_s - 1\} \quad (4-19)$$

j (dl)	Laufvariable für die Stunden eines Jahres	n_{Af} (h)	Maximale Stundenabrufe in Folge, konstant
n_s (h)	Sperrzeit nach den Flexibilitätsabrufen, konstant	t (dl)	Laufvariable zur Summenbildung der Indikatorvariable

Um das Auslaufen eines Flexibilitätsabrufs zu erkennen und im Anschluss die exogen vorgegebene Sperrzeit berücksichtigen zu können, verwendet das Flexibilitätsmodul die binäre Indikatorvariable iv_a . Dabei „zwingt“ Ungleichung (4-20) die Indikatorvariable iv_a den Wert 1 anzunehmen, sobald die andere Indikatorvariable iv_f in Zeitschritt t den Wert 1 und in Zeitschritt t+1 den Wert 0 aufweist, um die Ungleichung zu erfüllen.

$$iv_{f,t} - iv_{f,t+1} - iv_{a,t} \leq 0 \text{ für } \forall t \in \{1 \dots 8760\} \quad (4-20)$$

iv_a (bin)	Indikatorvariable des Zustandswechsel von „Flexabruf“ zu „kein Flexabruf“
--------------	---

Da die Indikatorvariable iv_a nicht in der Zielfunktion enthalten ist und dementsprechend keine Kosten verursacht, verhindert Ungleichung (4-21), dass die Variable den Wert 1 annimmt, solange kein Zustandswechsel stattfindet.

$$iv_{a,t} - iv_{f,t} \leq 0 \quad (4-21)$$

Die exogen vorgegebene Sperrzeit greift immer dann, wenn der Zustandswechsel der binären Indikatorvariable iv_a den Wert 1 aufweist. Ist dies der Fall, müssen die Lade- und Entladeleistung ab diesem Zeitpunkt für die Zeitschritte der Länge n_s den Wert 0 annehmen. Folgende Bedingung (4-22) ist vom Flexibilitätsmodul aufrechtzuerhalten:

$$\sum_{h=j}^{j+n_s-1} P_{s_{in},h} + P_{s_{out},h} \leq -P_{tm} \cdot (iv_{a,t} - 1) \cdot n_s, \text{ für } \forall j \in \{1 \dots 8760 - n_s\} \quad (4-22)$$

P_{tm}	(MW)	Teilmenge der Speicherleistung, maximale Speicherleistung pro Stunde
----------	------	--

Formel (4-23) des Flexibilitätsmoduls stellt außerdem sicher, dass die Stillstandszeiten nicht optimiert werden. Stillstandszeiten dienen häufig nicht flexibilisierbaren Revisionsintervallen und dem Anlagenersatz. Außerhalb der Stillstandszeiten sind nach Formel (4-24) Prozesse und Technologien zudem mit der Mindestleistung zu betreiben. Beispielsweise ist die konventionelle Aluminiumelektrolyse nicht stufenlos regelbar und darf lediglich im Arbeitsfenster von 98 – 102 % der Nennleistung betrieben werden /FFE-53 17/. Bei der Flex-Aluminiumelektrolyse erhöht sich durch einen zusätzlichen Wärmetauscher und der magnetischen Kompensation das thermische Arbeitsfenster auf etwa 75 – 125 % der Nennleistung /BÖK-01 17/, /TRI-01 16/, /TRI-02 13/.

$$E_{opt,t} = E_{v,t}, \text{ für } \forall t \text{ bei denen gilt: } E_{v,t} = 0 \quad (4-23)$$

$$E_{opt,t} \geq P_{min,b} \cdot iv_{m,t} \cdot 1h, \text{ für } \forall t \text{ bei denen gilt: } E_{v,t} \geq 0 \quad (4-24)$$

$$E_{opt,t} \leq P_{max} \cdot iv_{m,t} \cdot 1h, \text{ für } \forall t \text{ bei denen gilt: } E_{v,t} \geq 0 \quad (4-25)$$

$E_{opt,t}$	(MWh)	Energieverbrauch des optimierten Lastgangs in Stunde t	$E_{v,t}$	(MWh)	Energieverbrauch des vorgegebenen Lastgangs in Stunde t
P_{max}	(MW)	Maximalleistung	$P_{min,b}$	(MW)	Mindestleistung bei Betrieb
$iv_{m,t}$	(bin)	Indikatorvariable minimale und maximale Leistung, Definition des Betriebsfensters			

Die Indikatorvariable $iv_{m,t}$ stellt sicher, dass bei Betrieb das vorgegebene Betriebsfenster zwischen Minimal- und Maximalleistung eingehalten wird. Ist die Anlage außer Betrieb, weist sie den Wert Null auf. Wird die Anlage betrieben, sorgt sie dafür, dass die Last größer als die Minimal- und kleiner als die Maximallast ist.

Abschließend übernimmt der verwendete CPLEX-Solver das gemischt-ganzzahlige Kostenminimierungsproblem bestehend aus Zielfunktion und Restriktionen und löst es mittels des Programms „cplexmilp“.

4.4.3 Modulspezifische Datenaufbereitung

Die modulspezifische Datenaufbereitung greift auf die Lösung des Optimierungsproblems zurück.

Zunächst berechnet das Modul den Differenzlastgang. Dieser ergibt sich aus der Differenz des Prozesslastgangs vor- und nach der Optimierung. Bei Leistungsverminderung (positives Potential) entsteht damit ein negativer, bei Leistungserhöhung (negatives Potential) reziprok ein positiver Wert.

Weiterhin entspricht die Jahressumme der Indikatorvariable iv_f der jährlichen Abrufhäufigkeit.

Das über die Stunde gemittelte positive und negative Flexibilitätspotential ergibt sich infolge der Division von Entladeleistung durch die maximale stündliche Abrufdauer. Neben der bloßen Berechnung nimmt die modulspezifische Datenaufbereitung eine Klassierung der Daten vor. Das Modul teilt das stündliche Flexibilitätspotential in fünf Klassen mit gleicher Klassengröße auf. Ebenfalls dient die Berechnung als Grundlage zur Ableitung der Abrufhäufigkeit je positivem und negativem Flexibilitätspotential.

Die negative bzw. positive Flexibilitätsenergie berechnet sich aus der stündlichen Abrufhäufigkeit multipliziert mit der Be- bzw. Entladeleistung des Speichers. Aufgrund der Nebenbedingung uneingeschränkter Wertschöpfung im Optimierungsproblem ergibt die Differenz der Jahressummen aus positiver und negativer Flexibilitätsenergie stets Null.

Ebenso wertet die Datenaufbereitung die Anzahl an stündlichen Flexibilitätsabrufen in Folge aus. Dabei werden, in Abhängigkeit der Intervallgrößen, Klassen erstellt, welche die Anzahl der jeweiligen Abrufe je Klasse enthalten.

Weiterhin erfasst das Modul die veränderten Kosten. Diese ergeben sich aus der Differenz zwischen den Stromkosten des Lastgangs vor und nach der Optimierung. Die Kosten des flexibilisierten Lastgangs setzen sich aus den Stromkosten des Prozesses und den Speicherverlusten zusammen. Fixkosten wie notwendige Investitionen für den flexiblen Betrieb oder veränderte Materialverbräuche berücksichtigt das Modul nicht.

4.5 Weitere Auswertungsmethoden

Über die Modellberechnung hinausgehenden Auswertungen greifen auf die modulspezifische Datenaufbereitung zurück. Dabei nutzen sie 2018 als historisches Basisjahr. Die Auswertungen visualisieren die Ergebnisse beginnend in 2025 im fünfjährigen Turnus. Das Jahr 2020 klammert die Auswertung aufgrund der Coronaverzerrungen explizit aus.

Um die Veränderung durch die Umsetzung von CO₂-Verminderungsmaßnahmen ggü. dem historischen Basisjahr auszuweisen, werden ab 2025 jahresspezifische Differenzflexibilitätspotenziale und -energien ggü. 2018 abgeleitet. Das Vorgehen subtrahiert die im Modell berechneten Flexibilitätspotenziale und -energien in 2018 von selbigen Ergebnissen ab 2025 im Fünfjahresturnus. Steigt das Flexibilitätspotential bzw. die -energie ggü. 2018 an, ergibt sich ein positiver, umgekehrt reziprok ein negativer Wert.

5 Szenarien

Das Referenzszenario beschreibt das Narrativ einer Zukunft ohne besondere Klimaschutzambition und damit verbundene Anstrengungen. Es ist von ökonomischen Interessen getrieben und misst Nachhaltigkeit keine besondere Bedeutung bei (vgl. Hübner et al. in /FfE-39 20/).

Das Klimaschutzszenario (CP-Szenario) setzt über das Referenzszenario hinausgehend individuelle CO₂-Verminderungsmaßnahmen- und technologien um. Das CP-Szenario strebt nach einem vorgegebenen Klimaschutzambitionsniveau, indem ein CO₂-Verminderungsziel vorgegeben wird. Das Narrativ des CP-Szenarios beschreibt eine industrielle Entwicklung, in der ökonomische Interessen und Nachhaltigkeit als gleichberechtigte Ziele fungieren. Relevante Charakteristika des Szenarios enthält Tabelle 5-1 (vgl. Hübner et al. in /FfE-39 20/).

Tabelle 5-1: Relevante Charakteristika des industriellen Klimaschutzszenarios (CP-Szenario)

Szenarienperspektive	Makroökonomisch
Betrachtungszeitraum	2015 - 2050
Turnus	Stündliche Energieträgerkosten, Emissionsfaktoren und Lastprofile, Modellrechnungen jährlich
Brennstoffbedingte Emissionsverminderung ggü. 2015	Direkte energiebedingte Emissionen: 2030: 50 % 2040: 80 % 2050: 95 % Restemissionen: explorativer Ansatz über natürliche Austauschraten Basiert auf Referenzmodul
Szenarientwicklung	Individuelle Umsetzung von zusätzlichen THG-Verminderungsmaßnahmen zwischen 2021 und 2050 Optimierung und Priorisierung der Maßnahmen nach THG-Verminderungskosten Natürliche Diffusion der Technologien: Austausch am (bilanziellen) Ende der Nutzungsdauer
Volkswirtschaftlicher Zins	3.5 %
Volkswirtschaftliche CO ₂ -Kosten	2015: 7.61 €/tCO ₂ (realer Durchschnittswert EU-ETS) 2030: 34.70 €/tCO ₂ 2050: 100 €/tCO ₂
CO ₂ -Abscheidung	Ja
Biomasse	Deutlicher Anstieg in der Industrie
Produktionsmengen	Endogene Berechnung auf Basis des Referenzentwicklung

Das Szenario ist durch eine Kombination aus starker Elektrifizierung, dem Einsatz von Biomasse und der Substitution fossiler durch synthetische Brennstoffe gekennzeichnet.

Durch die Implementierung von individuellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen und -technologien vermindert das Modell die energiebedingten Emissionen bis 2050 vollständig (Scope 1). Die prozessbedingten Emissionen sinken um etwa 65 % in 2050 ggü. 1990.

Abbildung 5-1 visualisiert den industriellen Endenergieverbrauch nach Energieträgern und die industriellen Emissionen im Szenario „Climate Protection (CP)“.

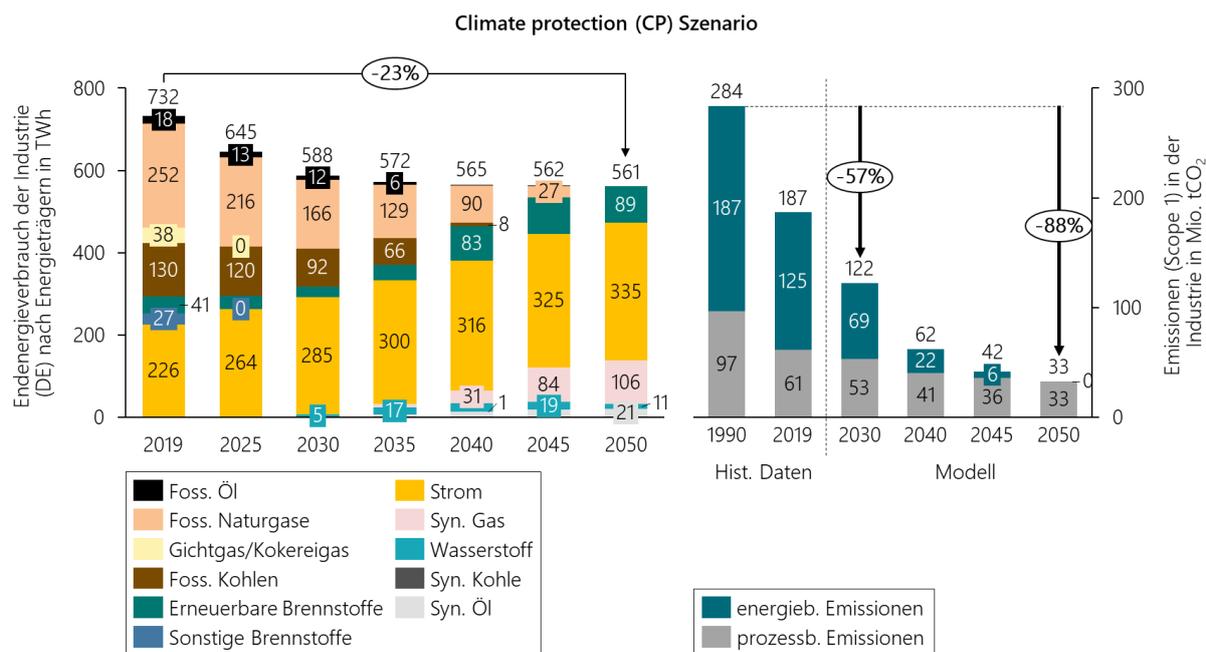


Abbildung 5-1: Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Emissionen der Industrie im Szenario „Climate Protection (CP)“ im Zeitverlauf

Trotz moderatem Wirtschaftswachstum (vgl. FFE-39 20) im Zeitraum senken zunehmende Effizienzgewinne infolge der Umsetzung von Effizienzmaßnahmen und der starken Elektrifizierung den Endenergieverbrauch um etwa 23 % in 2050 ggü. 2019. Abbildung 5-1 weist einen steigenden Stromverbrauch von etwa 226 TWh in 2019 auf 335 TWh in 2050 aus. Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie, die elektroasierte Flach- und Hohlglasherstellung sowie die Elektrifizierung der Niedertemperaturwärme sorgen für einen deutlichen Anstieg. Aufgrund der hohen Emissionsfaktoren und der Verfügbarkeit von biogenen Alternativen ersetzt das Modell Gichtgas und Kokereigas sowie sonstige Brennstoffe bereits bis 2025 vollständig. Mit steigendem Klimaschutzambitionsniveau finden ab 2030 zunehmend auch synthetische Brennstoffe Verwendung. In 2050 weisen synthetische Brennstoffe einen Anteil von etwa 25 % am industriellen Endenergieverbrauch auf. Da die Industrie bisher kaum über Wasserstoffbrenner verfügt und das Modell nur wenige zubaut, ist der Wasserstoffeinsatz fast ausschließlich auf die Primärstahlherstellung in der H₂-Route beschränkt. Dementsprechend hoch fällt auch der Einsatz meist wasserstoffbasierter, synthetischer Kohlenwasserstoffe zur Verminderung der verbleibenden energiebedingten Emissionen zwischen 2040 und 2050 aus. Ab 2035 ist mit der Primärstahlherstellung im Hlsarna Verfahren zudem eine effiziente Primärstahlroute verfügbar, welche zunehmend Biomasse einsetzt und die früher verfügbare H₂-Stahlherstellung teilweise wieder verdrängt. Stoffliche Verbräuche der Chemieindustrie zur Herstellung von Ammoniak und Methanol klammert das Szenario aus.

Rechts visualisiert Abbildung 5-1 die sinkenden energie- und prozessbedingten Emissionen der Industrie im Zeitverlauf. Stromemissionen vernachlässigend, sinken die industriellen Gesamtemissionen zwischen 1990 und 2050 um etwa 88 %. Das Szenario setzt dabei auf eine Kombination von Effizienz, Elektrifizierung sowie dem Einsatz von CO₂-Abscheidung und erneuerbaren Brennstoffen. Im Vergleich zu anderen Szenarien der Industrie wird eine CO₂-Verminderung am unteren Rand erreicht /FFE-39 20/. Das ist vor allem auf die nur schwer

zu verminderten prozessbedingten Emissionen und auf den Verzicht generischer Maßnahmen wie der CO₂-Luftabscheidung zurückzuführen.

Mit Blick auf die Wirkung von CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität ist insbesondere die Entwicklung der Produktionsmengen und des Stromverbrauchs der Prozesse relevant. Tabelle 5-2 beinhaltet die Produktionsmengen und den spezifischen Stromverbrauch relevanter industrieller Produktionsprozesse im CP-Szenario.

Tabelle 5-2: Produktionsmenge (1) und spezifischer Stromverbrauch (2) relevanter industrieller Prozesse im CP-Szenario

Prozess		2019	2025	2030	2040	2045	2050
Papierherstellung	1	22 399	22 281	21 955	23 117	23 411	23 706
	2	0,433	0,567	0,689	0,691	0,691	0,691
Ethylen, konventionell	1	5 039	5 035	4 521	3 495	2 981	2 468
	2	0,201	0,202	0,206	0,217	0,216	0,215
Ethylen, elektrische Dampferzeugung	1	0	0	0	0	0	210
	2	-	-	-	-	-	9,81
Ethylen, MTO-Verfahren	1	0	133	700	1 809	2 295	2 570
	2	-	2,595	2,514	2,447	2,427	2,414
Hohlglas	1	5 078	5 066	4 564	418	0	0
	2	0,319	0,304	0,295	0,283	-	-
Flachglas	1	2 439	2 433	2 240	609	0	0
	2	0,751	0,704	0,67	0,628	-	-
Elektrohohlglas	1	0	0	418	4 575	5 163	5 334
	2	-	-	0,788	0,763	0,757	0,753
Elektroflachglas	1	0	0	152	1 788	2 479	2 561
	2	-	-	1,974	1,908	1,892	1,884
Primärstahl Hochofen	1	29 325	24 134	19 125	9 107	4 098	0
	2	0,033	0,027	0,028	0,038	0,048	-
Sekundärstahl	1	12 527	16 929	19 427	20 981	21 750	22 488
	2	0,518	0,433	0,344	0,291	0,291	0,291
Primärstahl H ₂	1	0	0	2 932	7 822	7 822	4 889
	2	-	-	0,621	0,566	0,553	0,543
Primärstahl Hlsarna	1	0	0	0	3 028	6 701	12 424
	2	-	-	-	0,215	0,255	0,294
Primäraluminium	1	566	444	397	350	328	305
	2	15,517	14,251	13,277	12,534	12,311	12,155
Sekundäraluminium	1	681	806	827	941	989	1 038
	2	0,273	0,263	0,258	0,264	0,26	0,258

Tabelle 5-2 unterstreicht den im Gesamtszenario enthaltenen Trend zum Einsatz von Elektrifizierungstechnologien. So steigt der elektrische Stromverbrauch der Papierherstellung bspw. um etwa 40 %. Das ist vor allem auf die zunehmende Elektrifizierung der Papiermaschinentrocknung zurückzuführen. Neben der direkten Elektrifizierung von Prozessen erhöhen alternative Verfahrensrouten den Stromverbrauch z.B. in der Ethylen-, Glas- und Stahlproduktion. Gegenteilige Effekte zeigen sich durch die zunehmende Verschiebung von Primär- auf Sekundäraluminium. Die veränderten spezifischen Stromverbräuche sind überwiegend auf die Umsetzung von Effizienz- und Elektrifizierungsmaßnahmen zurückzuführen.

Tabelle 5-3 enthält relevante Charakteristika des Strompreises im Szenario, den das Flexibilitätsmodul als Signal zur Flexibilitätsableitung nutzt.

Tabelle 5-3: Charakteristika des Flexibilitätssignals: Auswertungen zum Strompreis im Zeitverlauf

Strompreis in €/MWh	2018 ³	2025 ⁴	2030	2040	2045	2050
Ø Gesamt	44,5	58,2	61,2	63,8	77,7	80,4
Ø Sommer ¹	44,8	53,4	56,8	54,1	56,6	55,4
Ø Winter ²	44,1	63,1	65,5	73,6	98,9	105,5
Minimum	0	0	0	0	0	0
Maximum ⁵	128,3	471,8	506,0	523,2	697,8	233,1

¹Apr., Mai, Jun., Jul., Aug, Sep.; ²Jan., Feb., Mrz., Okt., Nov., Dez.;

³Realdaten, Day-Ahead EPEX, aus Gründen der Konsistenz zu den Preisprojektionen sind die negativen Strompreise gleich Null gesetzt

⁴Ab hier Preisprojektionen aus FfE-Modell, ISAaR, /FFE-70 19/

⁵Oftmals nur sehr wenige Stunden im Jahr mit Strompreisspitzen

Tabelle 5-3 zeigt einen deutlich ansteigenden Strompreis zwischen 2018 und 2050, der durch ein stärkeres Sommer- und Wintergefälle geprägt ist. Haupttreiber ist die Elektrifizierung in den Endenergiesektoren sowie die zunehmende und fast vollständige Deckung des Stromverbrauchs durch fluktuierende erneuerbare Energien.

Abbildung 5-2 vergleicht die Strompreiszeitreihen der Jahre 2018 und 2050. Die Visualisierung unterstreicht die vorherig getroffenen Aussagen. Die Abbildung verdeutlicht darüber hinaus die zunehmenden Preisspreads in 2050 im Vergleich zu 2018. Höhere Preisspreads des Flexibilitätssignals reizen in der Optimierung zunehmende und stärkere Flexibilitätsabrufe an.

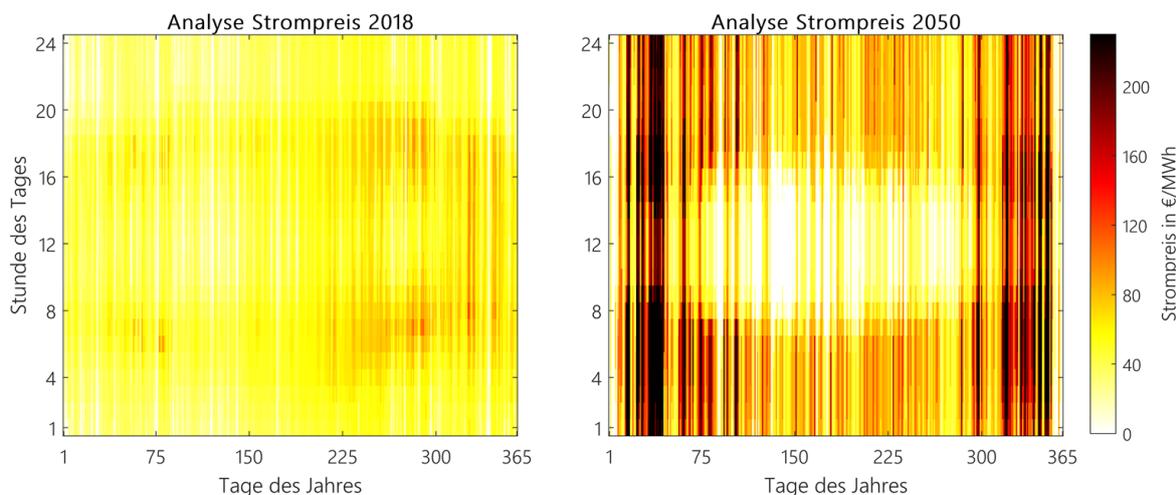


Abbildung 5-2: Analyse des Strompreises in Abhängigkeit des Jahrestages und der Jahresstunde in 2018 (links) und 2050 (rechts)

6 Ergebnisse und Diskussion

Das Ergebniskapitel beschreibt zunächst die hinsichtlich der CO₂-Verminderung gebildete Rangfolge der CO₂-Verminderungsmaßnahmen sowie der damit verbundenen Änderung des Strom- und Brennstoffverbrauchs. Die relevanten Maßnahmen werden ausgewählt und die dahinterstehenden Technologien kurz hinsichtlich ihrer Flexibilität beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse des Flexibilitätsmoduls ausgewiesen und diskutiert.

6.1 Relevante CO₂-Verminderungsmaßnahmen

Abbildung 6-1 zeigt die Rangfolge der Maßnahmen hinsichtlich der CO₂-Verminderung. Die Modellrechnungen und weiteren Auswahlmethoden bestimmen eine Liste von elf Maßnahmen, welche in Summe einer CO₂-Verminderung von knapp 40 % (~63,3 Mio.t CO₂e) ggü. 2020 (178 Mio.t CO₂e) bewirken.

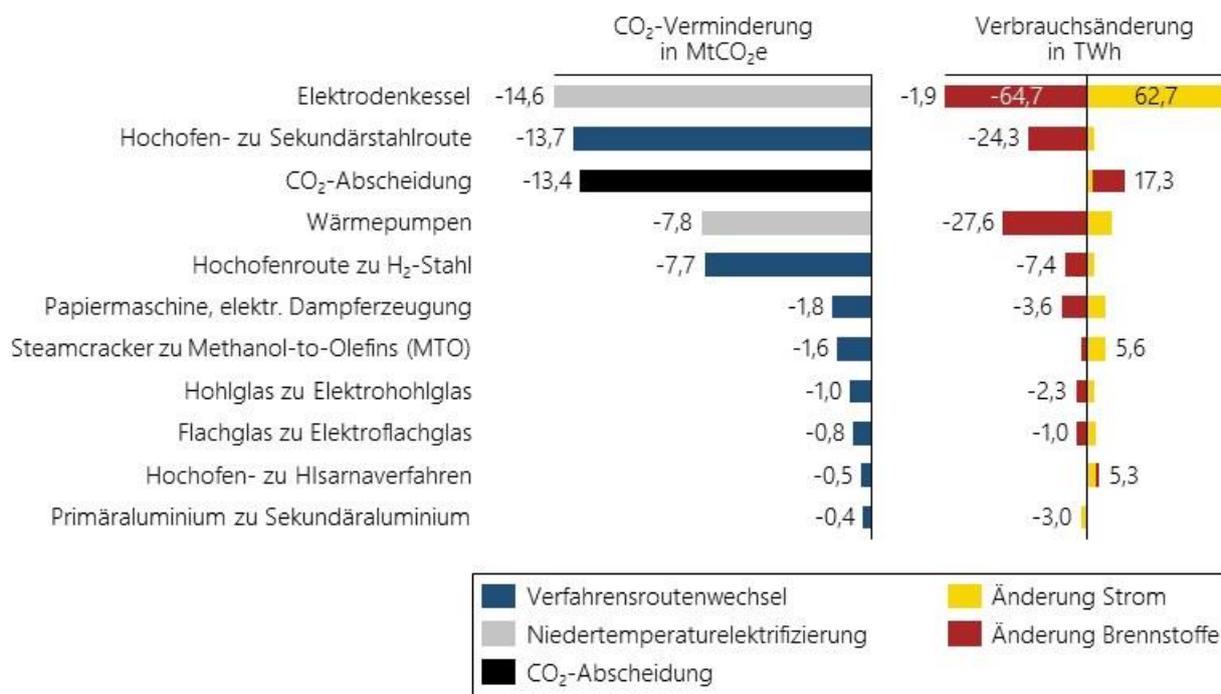


Abbildung 6-1 CO₂-Verminderung und Energieverbrauchsänderung der relevanten Maßnahmen

Abbildung 6-1 zeigt Maßnahmen der Kategorien Verfahrensroutenwechsel, Niedertemperaturelektrifizierung und CO₂-Abscheidung. Die Verfahrensroutenwechsel subsumieren die Transition hin zu CO₂-armen Produktionstechnologien in der Stahl-, Papier, Ethylen und Glasproduktion. Die Niedertemperaturelektrifizierung umfasst den Einsatz von Elektrodenkesseln und Wärmepumpen. Elektrodenkessel und Wärmepumpen setzt das Modell in einem Temperaturspektrum bis ~200°C ein. Damit beschränkt sich ihr Einsatzgebiet auf die Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Niedertemperaturprozesswärme. Die Kategorie „CO₂-Abscheidung“ clustert die CO₂-Verminderung durch die Abscheidungsverfahren in Klinker-, Kalk, Hochofenstahl- und Hlsarna-Stahlproduktion.

Maßnahmen der Niedertemperaturelektrifizierung vermeiden in Summe etwa 22,4 MtCO₂e pro Jahr in 2050 und erreichen dadurch eine ähnliche CO₂-Verminderung wie die Verfahrensroutenwechsel in der Stahlindustrie (21,9 MtCO₂e). Die hohe CO₂-Verminderung in

der Niedertemperaturwärme ist auf die heute übliche Erzeugung mit fossilen Brennstoffen zurückzuführen. Bis auf wenige Ausnahmen wie die CO₂-Abscheidung, bei welcher die Dampferzeugung zur chemischen Abspaltung des CO₂ noch überwiegend brennstoffbasiert ist, führt die Umsetzung der Maßnahmen zu einer starken Elektrifizierung der Industrie.

Anhand der literarisch vorgenommenen, prozess- und technologiespezifischen Flexibilitätsanalyse zeigt Tabelle 6-1 auf, welche Prozesse und Technologien über nennenswerte, Stromflexibilitätspotenziale verfügen.

Tabelle 6-1: Flexibilitätsbetrachtung: Verfügbarkeit technischer Flexibilitätspotenziale

Industrie	Prozess/Technologie	Flexibilitätspotenzial
Stahl	Hochfeneroute	✗
	Sekundärstahleroute (Elektrolightbogenofen)	✓
	Direktreduktion und Elektrolightbogenofen (DRI & EAF)	✓
	Hlsarna-Verfahren	✗
Papier	Papiermaschine	✗
	Papiermaschine, elektrische Dampferzeugung	✓
Chemie	Ethylenherstellung, Fossiler Steamcracker	✗
	Ethylenherstellung, Methanol-to-Olefins	✓
Glas	Flachglasherstellung	✓
	Hohlglasherstellung	✓
	Elektroflachglasherstellung	✗
	Elektrohohlglasherstellung	✗
Sonstige Technologien	Wärmepumpe	✓
	Elektrodenkessel	✓
CO ₂ -Abscheidung	CO ₂ -Abscheidung Hochfener	✗
	CO ₂ -Abscheidung Klinker	✗
	CO ₂ -Abscheidung Kalk	✗
	CO ₂ -Abscheidung Hlsarna	✓
Aluminium	Primäraluminium	✓
	Flex-Primäraluminium	✓
	Sekundäraluminiumroute	✗

✓: verfügbar ✗: nicht verfügbar

Stahlindustrie

Aufgrund des geringen elektrischen Energieverbrauchs bieten die konventionelle Hochfeneroute und das innovative Hlsarna-Verfahren kaum Möglichkeiten zur Bereitstellung von Stromflexibilität.

Die Elektrolichtbogenöfen der Sekundärstahl- sowie der H₂-Stahlrouten hingegen offerieren nennenswerte Stromflexibilität. Die Sekundärstahlrouten nutzen den Elektrolichtbogenofen um Schrott, die H₂-Stahlrouten um direkt reduziertes Eisen (DRI) aufzuschmelzen /BCG-01 13/. Der Stromverbrauch verläuft diskontinuierlich, wobei bspw. das erneute Chargieren oder der Abstich den Prozess unterbrechen. Diese Unterbrechungen erlauben jedoch zunächst keine zeitliche Verschiebung und können daher nicht flexibilisiert werden /FFE-12 18/. Der Elektrolichtbogen generiert Stromflexibilität durch Überkapazitäten ggü. der nachfolgenden Stranggussanlage /FFE-12 18/. Etwa 20 Minuten je achtstündiger Schicht können für Flexibilitätsabrufe genutzt werden /FFE-12 18/.

Papierindustrie

Die Papierherstellung umfasst drei grundlegende Prozessabschnitte. Die Stoffherstellung bestehend aus Zellstoff-, Holzstoff-, und Altpapierstoffherstellung, die Papierproduktion mittels Papiermaschine und die Veredelung. Insbesondere die Holzstoffherstellung weist bereits heute nennenswerte Flexibilitätspotenziale auf /IPA-01 19/, unterliegt im CP-Szenario jedoch keiner tiefgreifenden technologischen Veränderung und wird dementsprechend vernachlässigt. Trotz teils hoher Stromverbräuche bietet die Papiermaschine aufgrund der hohen Auslastung und des trägen Schaltverhaltens gegenwärtig kaum Flexibilitätspotenziale /STEU-01 17/. Die Maßnahme zur Elektrifizierung der Dampferzeugung im CP-Szenario hingegen offeriert die prospektive Flexibilisierung nennenswerte Stromverbräuche der Papiermaschine. Das CP-Szenario elektrifiziert die Dampferzeugung mittels industrieller Hochtemperaturwärmepumpe. Ein Warmwasserspeicher sorgt für die zeitliche Entkoppelung von Wärmenachfrage und Stromangebot /WOLF-02 16/.

Chemieindustrie

Bestehende elektrische Flexibilitätspotenziale der Chemieindustrie finden sich bei der Chlorproduktion und der Luftzerlegung. Im CP-Szenario unterliegen beide Prozesse jedoch keiner disruptiven Veränderung, weshalb die Betrachtung sie ausklammert.

Tiefgreifende technologische Veränderungen ergeben sich potenziell durch die Substitution der Olefinproduktion (hpts. Ethylen) durch das Methanol-to-Olefins (MTO) Verfahren, welches im Gegensatz zum konventionellen Steamcracker /DECH-02 19/, /REN-02 06/ Stromflexibilität offeriert. Insbesondere die Tieftemperaturabscheidung mittels kryogener Zerlegung bietet aufgrund hoher Stromverbräuche /IER-01 20/, /TAMU-01 15/ und gewisser Flexibilität relevante Potenziale. Da die Literatur bisher keine Flexibilitätsparameter für das MTO-Verfahren bereitstellt, werden Analogien zu bestehenden flexibilitätsrelevanten Prozessen genutzt. Die kryogene Zerlegung im MTO-Verfahren ähnelt der kryogenen Luftzerlegung. Das Modell nutzt deshalb die maximale Abrufdauer, Sperrzeit, und maximale Jahresabrufhäufigkeit der Luftzerlegung /STEU-01 17/, /VTT-02 14/, /FFE-41 21/, um die Flexibilität des MTO-Verfahrens zu bestimmen. Für die Größe des nachgelagerten Ethylenspeichers wird eine Produktion von sieben Tagen¹³ angenommen /FFE-41 21/.

Ebenfalls offeriert der Einsatz des elektrischen Steamcrackers Flexibilitätspotenziale, welcher sich fast ausschließlich durch die elektrische im Gegensatz zur brennstoffbasierten Dampferzeugung des konventionellen Crackers unterscheidet. Aufgrund der höheren Gesamtkosten setzt das CP-Szenario jedoch das MTO-Verfahren statt dem elektrischen

¹³ Die Expertenbefragung hat ergeben, dass ein Speicher von sieben Tagesproduktionen in der Industrie üblich ist

Steamcrackers zur Defossilisierung der Olefinproduktion ein, weshalb keine nennenswerten Flexibilitätspotenziale entstehen.

Glasindustrie

Der grundsätzliche Prozessverlauf der Glasherstellung unterteilt sich in Gemengebereitung, Schmelze, Formgebung und Entspannung sowie Veredelung /IPA-01 19/. Der Schmelzprozess bietet Optionen zum Abruf von Stromflexibilität /FFE-12 18/. Beim Schmelzprozess kommen zum Teil bivalent betriebene Schmelzwannen zum Einsatz. Die Schmelzwannen werden zu über 90 % brennstoffbasiert (überwiegend Erdgas) betrieben, verfügen aber über eine elektrische Zusatzheizung (EZH) /FFE-154 17/, /FFE-26 21/. Die installierte elektrische Leistung der EZH kann in gewissen Grenzen flexibel betrieben werden, solange ein geregelter Erdgasverbrauch den Energieeintrag in die Schmelze ausgleicht /FFE-12 18/. Das vollständige Ausnutzen des Leistungsspektrums der EZH ist in der Regel nicht möglich, da sich Temperaturschwankungen in der Schmelze maximal in einem Bereich von ± 5 K bewegen dürfen, damit die Produktqualität weiterhin besteht /FFE-12 18/. Etwa 33 % der Leistung der EZH können flexibilisiert werden /IPA-01 19/. Die Abrufdauer beträgt dabei nur wenige Minuten (durchschnittlich 8 Minuten), bevor die volle Leistung wieder zugeschaltet werden muss /STEU-01 17/. Über die Abrufdauer und die flexibilisierbare Leistung lässt sich der virtuelle Speicher der EZH bestimmen.

Ein wesentlicher Bestandteil zur Defossilisierung der Glasindustrie im CP-Szenario ist die Elektrifizierung der Hohl- und Flachglasherstellung mittels den Verfahrensrouten „Elektrohohl- und -flachglas“. Statt Brennstoffen nutzen die vollelektrische Schmelzwannen (VES) Strom zum Schmelzen des Rohstoffgemenges /ISI-11 19/. Das elektrische Schmelzen verläuft kontinuierlich mit hoher Auslastung, wobei fehlende Energie- und Massenspeicher eine Lastverschiebung verhindern /FFE-12 18/. Eine Lastabschaltung der elektrischen Schmelze würde nach Erkenntnissen in /IPA-01 19/ außerdem nach ca. 30 Minuten zu einer Erstarrung der Schmelze und somit zu irreparablen Schäden an der Anlage führen. Auch Flexibilitätsabrufe von wenigen Minuten sind nicht möglich, da bereits geringe Temperaturschwankungen von mehr als ± 5 K in der Schmelze die Produktqualität beeinträchtigen /IPA-01 19/.

Strombasierte Wärmeerzeuger in der industriellen Niedertemperatur

Strombasierte Wärmeerzeuger substituieren im CP-Szenario das brennstoffbasierte Pendant der industriellen Niedertemperatur. Der Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln offeriert nennenswerte elektrische Flexibilitätspotenziale.

Anhand einer Kompressionswärmepumpe mit integriertem Speicher beschreibt /IPA-01 19/ bereits umfangreich den flexiblen Betrieb strombasierter Wärmeerzeuger in der Industrie.

Ein Warmwasserspeicher sorgt für eine zeitliche Entkoppelung von Wärmenachfrage und Stromangebot /WOLF-02 16/. Positive Flexibilitätsabrufe (Lastsenkung) entleeren, negative Flexibilitätsabrufe (Lasterhöhung) füllen den Speicher über die originäre Betriebsweise hinaus. Nach /FFE-72 17/ weist die Referenzwärmepumpe des Modells einen Coefficient of Performance (COP) von drei und nach /IPA-01 19/ einen Warmwasserspeicher von 200m³ auf.

Die Kennwerte des Elektrodenkessels fußen weitestgehend auf den Flexibilitätsparametern der Wärmepumpe (vgl. Tabelle 4-7). Im Gegensatz zur Wärmepumpe nutzt der Elektrodenheizkessel (COP \approx 1) jedoch keine zusätzlichen Energiequellen wie Umwelt- oder

Prozesswärme, offeriert dementsprechend aber auch ceteris paribus ein um etwa Faktor 3 höheres Flexibilitätspotenzial.

CO₂-Abscheidung

Die Hochofenstahl- und Hlsarna-Stahlroute sowie die Klinker- und Kalkherstellung nutzen die CO₂-Abscheidung zur Verminderung energie- und prozessbedingter Emissionen im CP-Szenario. Im Gegensatz zur Hlsarna-Stahlroute, welche aufgrund der hohen CO₂-Konzentration im Abgas eine kryogenen Trennung nutzt /WI-02 17/, /ARCE-01 10/, setzen die anderen Produktionsprozesse die nachgelagerte chemische Absorption zur CO₂-Abscheidung ein /KFA-01 16/. Konträr zur kryogenen Trennung nutzt die chemische Absorption zur Erzeugung des bei der CO₂-Abspaltung erforderlichen Dampfs überwiegend Brennstoffe /ISI-07 17/, deren Flexibilität nicht betrachtet wird. Die kryogene Trennung zur CO₂-Abspaltung erfolgt hingegen ausschließlich strombasiert /ARCE-01 10/ und ist nach /BYU-01 09/ mit einer Luftzerlegungsanlage vergleichbar.

Parallelen zeigen sich insbesondere hinsichtlich des Einsatzes stromintensiver Kompressoren. Aufgrund fehlender, vollständiger Datensätze zu den Flexibilitätsparametern der CO₂-Abscheidung mittels kryogener Trennung, werden Eingangsdaten anhand der Parameter von Luftzerlegungsanlagen ergänzt /STEU-01 17/, /IPA-01 19/. Zur Entkoppelung der der CO₂-Abscheidung von der Hlsarna-Stahlproduktion ist eine Speicherung des Abgases erforderlich. Erkenntnisse des Interviews mit einem Experten für Gasspeicher ergab /FFE-42 21/, dass die Industrie typischerweise Kugelgasspeichern mit einem Speichervolumen von 100 000 m³ Erdgas bei 10 bar nutzt. Beim Einsatz von zwei Kugelgasspeichern ergibt sich bei durchschnittlichem Abgasstrom der Hlsarna-Stahlproduktion eine Speicherdauer von etwa drei Tagen, welche laut Experten plausibel erscheint /FFE-42 21/. Die Speicherauslegung berücksichtigt die Dichteunterschiede von Erdgas und Abgas.

Aluminiumindustrie

Aluminium kann in der Primär- und Sekundärroute erzeugt werden /ÖKO-01 16/, /OST-02 14/. Derzeit setzt die Sekundär- im Gegensatz zur Primäraluminiumproduktion überwiegend auf brennstoffbetriebene Schmelzaggregate /EAA-03 18/, /BRUNK-01 16/, /VDI-02 08/. Das Modell sieht bisher keine Elektrifizierung der brennstoffbasierten Schmelzaggregate vor. Da die Sekundär- aber etwa 95 % weniger Energie als die Primärroute benötigt, verschiebt das Modell dennoch nennenswerte Produktionskapazitäten auf die Sekundärerzeugung und defossilisiert den Produktionsprozess mittels erneuerbarer Brennstoffe. Nennenswerte elektrische Flexibilitätspotenziale ergeben sich dadurch prospektiv nicht.

Im Gegensatz dazu nutzt die Primäraluminiumproduktion in der Schmelzflusselektrolyse (Aluminiumelektrolyse) ausschließlich elektrische Energie zur Reduktion des Aluminiumoxids zu metallischem Aluminium /RPOHL-01 15/, /KRAM-01 09/. Zwar besteht dieses Potenzial auch schon heute, qualifiziert sich aber aufgrund der Verschiebung hin zur Sekundäraluminiumherstellung dennoch für die Analyse der Auswirkungen von CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität. In der Elektrolysezelle dient der sogenannte Aluminiumsee zur Entkoppelung nachgelagerter Prozessschritte /FFE-53 17/, /TRI-02 17/. Trotz der hohen Potenziale ist die Flexibilität der Elektrolysezelle begrenzt, da sie nahezu dauerhaft bei Nennlast betrieben und ein Produktionsausgleich bei vorherig positiven Flexibilitätsabrufen daher nur über ein großes Zeitfenster möglich ist /AGORA-05 17/.

/FFE-53 17/, /EWI-09 10/. Thermische und magnetische Schwankungen, welche durch die Variation der Leistung entstehen, sind darüber hinaus lediglich in sehr begrenztem Umfang kompensierbar /FFE-53 17/. Eine zu hohe Betriebstemperatur würde die Kruste aufschmelzen und die Prozessstabilität gefährden. Eine zu niedrige Temperatur kann zum Einfrieren der Zelle führen /WIE-01 15/. Die Flex-Aluminiumelektrolyse ermöglicht es hingegen, die Last um +/- 25 % der Nennleistung über einen längeren Zeitraum zu variieren /IPA-01 19/. Dazu sind technologische Aufrüstungen der Elektrolysezelle durch Magnetfeldkompensation, thermische Kompensation und eine leistungsfähige Prozesssteuerung notwendig /IPA-01 19/. Die Flex-Aluminiumelektrolyse umfasst etwa 10 % der Aluminiumproduktionsmenge in Deutschland und verbleibt im Szenario konstant.

6.2 Entwicklung flexibilitätsrelevanter Prozesse und Technologien

Abbildung 6-2 zeigt die Veränderung der Produktionsmengen (Balken) und installierten Leistungen (Linien) flexibilitätsrelevanter Prozesse und Technologien im CP-Szenario.

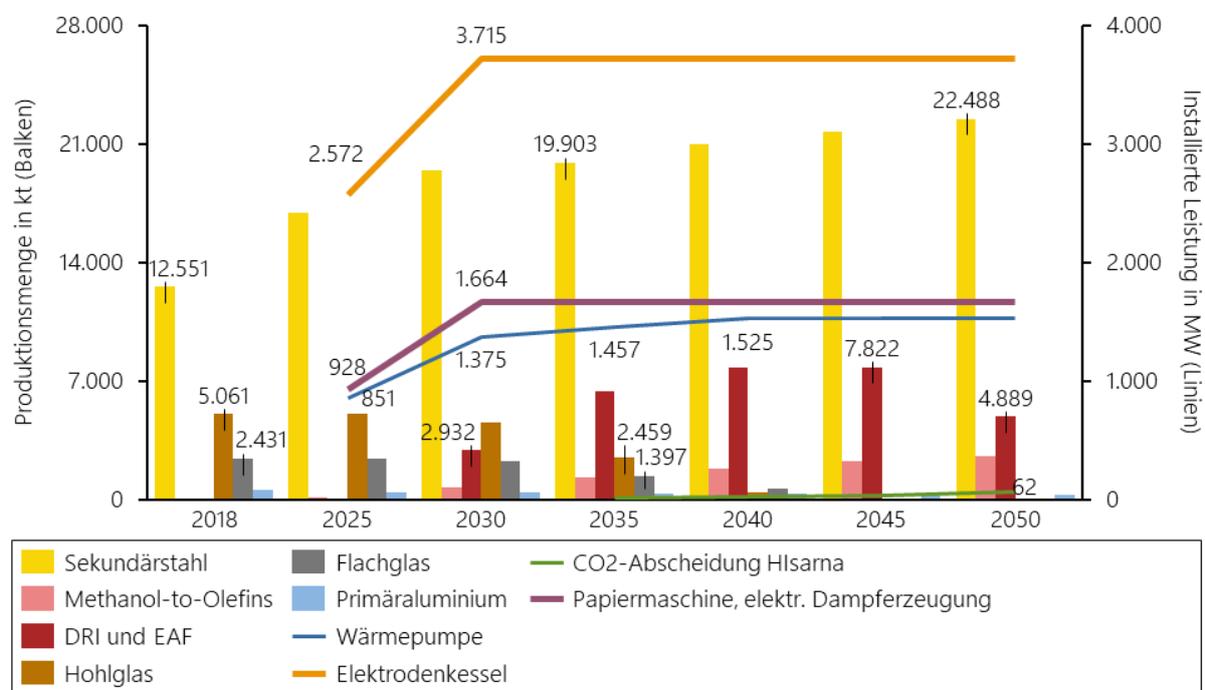


Abbildung 6-2: Verlauf der Produktionsmengen und installierten Leistungen flexibilitätsrelevanter Prozesse und Technologien

Zusätzliche elektrische Leistungen in der Niedertemperatur entstehen durch den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln ab 2021. Dabei ist die installierte elektrische Leistung der Elektrodenkessel im Schnitt etwa dreimal höher als die der Wärmepumpen. Aufgrund der höheren Effizienz der Wärmepumpe teilt sich die thermische Wärmebereitstellung im CP-Szenario jedoch annähernd zu gleichen Teilen auf die Technologien auf. Die Maßnahme zur Elektrifizierung der Dampferzeugung von Papiermaschinen ist aufgrund ihres hohen elektrischen Verbrauchs separat gelistet, spiegelt jedoch ebenso den zunehmenden Einsatz industrieller Hochtemperaturwärmepumpen in der Industrie wider.

Flexibilitätsrelevante Prozesse wie das MTO-Verfahren und die H₂-Stahlroute (DRI & EAF) laufen erst mit Beginn ihrer hinterlegten technischen Verfügbarkeit hoch. Gleiches gilt für die CO₂-Abscheidung der Hlsarna-Stahlproduktion. /AGORA-07 19/ schätzt ab, dass der Markthochlauf des Hlsarna-Verfahrens aufgrund der fehlenden technischen Reife erst ab 2035 beginnt. Die Hohl- und Flachglasherstellung werden ebenso wie Primäraluminium zunehmend durch alternative Verfahrensrouten ersetzt. Elektrische Schmelzen kommen ab 2030 zum Einsatz und substituieren die konventionellen Herstellungsverfahren bis 2045 vollständig. Davon profitiert in der Stahlindustrie die Sekundärstahlerzeugung, welche die Hochofenroute zunehmend substituiert. Das Szenario impliziert eine in Zukunft höhere Verfügbarkeit von Stahl- und Aluminiumschrott.

6.3 Modellfunktionalität am Beispiel der Wärmepumpe

Das Flexibilitätsmodul optimiert den Lastgang in Abhängigkeit des Strompreises, welcher annahmegemäß die zeitaufgelöste Kritikalität der Stromverfügbarkeit reflektiert.

Um die Funktionalität und die Methode des Flexibilitätsmoduls zu belegen, visualisiert Abbildung 6-3 exemplarisch den Tagesverlauf des Differenzlastgangs der Wärmepumpe und des Strompreissignals am 1. Januar 2025.

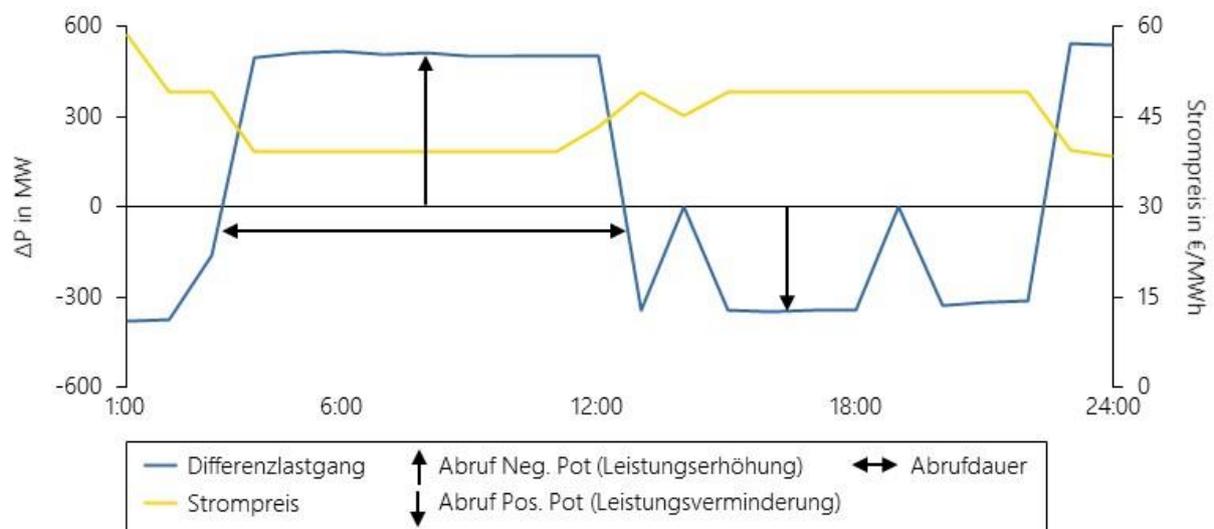


Abbildung 6-3: Wärmepumpe: Differenzlastgang und Strompreisverlauf

Beispielsweise nimmt der Optimierungsalgorithmus bei niedrigem Strompreis zwischen 4 und 13 Uhr eine Lasterhöhung, zwischen 15 und 19 Uhr bei hohem Strompreis eine Lastsenkung ggü. dem originären Lastgang vor. Um Flexibilitätsabrufe bei Wärmepumpen durchführen zu können, nutzt die Optimierung den Warmwasserspeicher.

Den zeitaufgelösten Füllstand des Speichers (funktionale Einheit: MWh) in Abhängigkeit des Lastgangs der Wärmepumpe zeigt Abbildung 6-4. Im Zeitraum der Lasterhöhung (4 – 13 Uhr) steigt der Speicherfüllstand, wohingegen er im Zeitraum der Lastsenkung (15 – 19 Uhr) fällt.

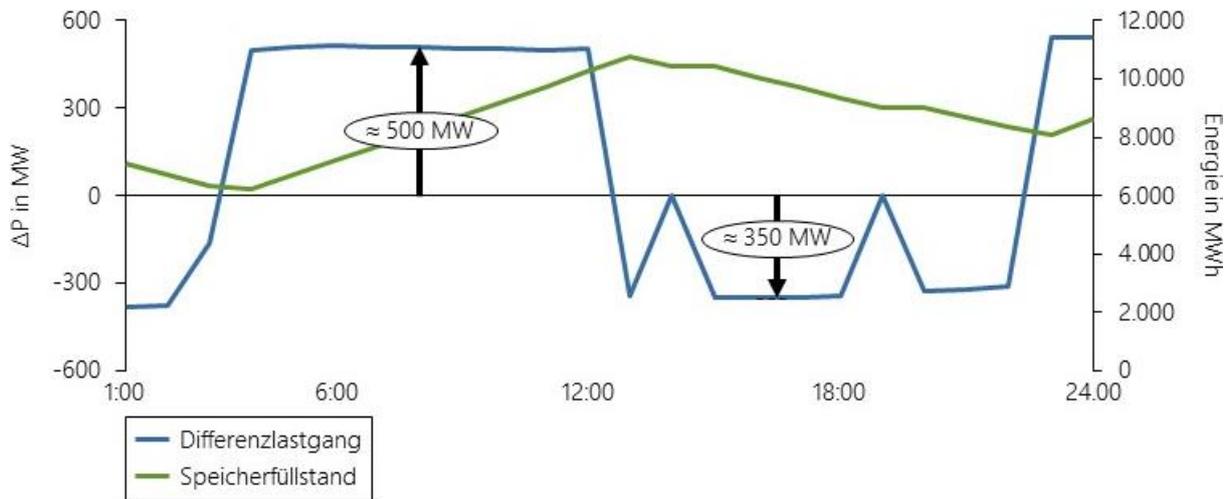


Abbildung 6-4: Wärmepumpe: Differenzlastgang und Füllstandsverlauf

6.4 Simulationsergebnisse Flexibilitätspotenziale und -energien

Abbildung 6-5 zeigt links die Entwicklung des positiven und negativen Flexibilitätspotenzials betrachteter Prozesse und Technologien. Um die Auswirkungen der CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität zu pointieren, weist Abbildung 6-5 die Flexibilitätspotenziale ab 2025 als Differenz ggü. 2018 aus. Rechts enthält Abbildung 6-5 die veränderte Flexibilitätsenergie ab 2025, welche sich ebenfalls aus der Differenz ggü. 2018 errechnet. Da das Modell die uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung annimmt und veränderte Energieverbräuche im Verlauf eines Jahres demgemäß zu nivellieren sind, gleichen sich die Jahressummen positiver und negativer Flexibilitätsenergien. Abbildung 6-5 verzichtet dementsprechend auf eine individuelle Darstellung.

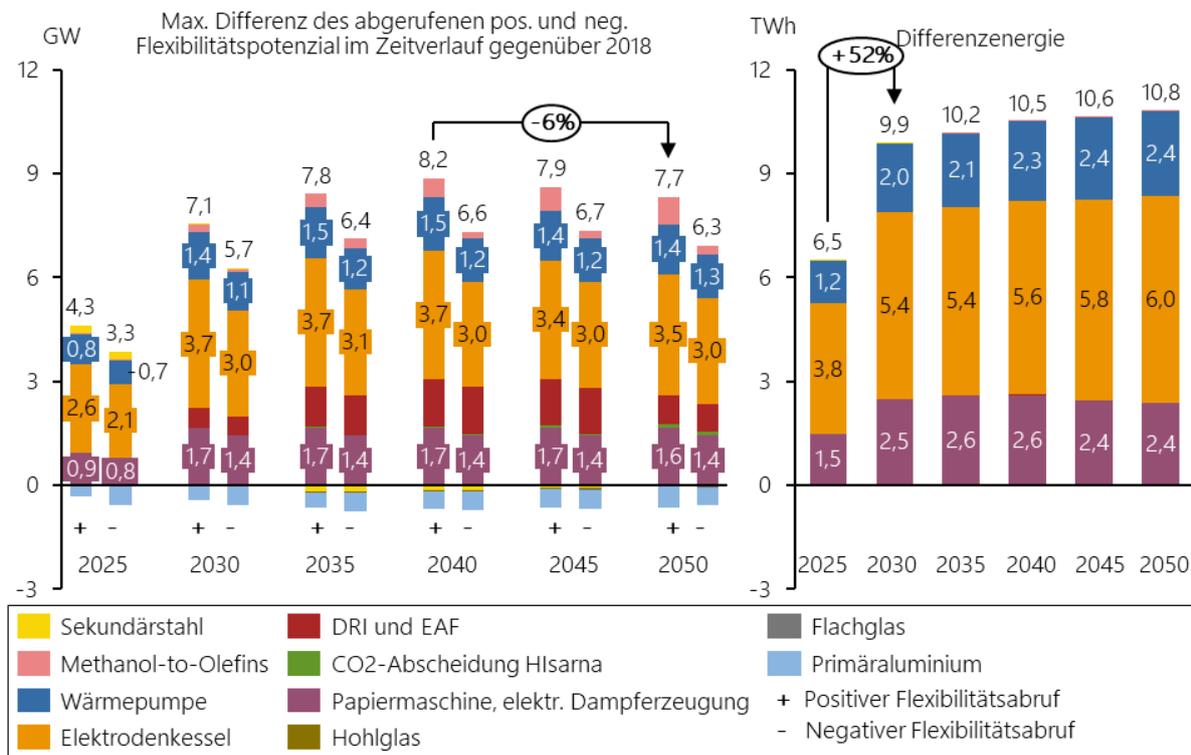


Abbildung 6-5: Maximales Differenzpotenzial und Differenzenergie der betrachteten Prozesse und Technologien

In Summe über die betrachteten Prozesse und Technologien steigt das positive bzw. negative Flexibilitätspotenzial um 7,7 GW respektive 6,3 GW in 2050 ggü. 2018. Wegen der hohen Auslastung industrieller Prozesse ist das zusätzliche negative Flexibilitätspotenzial im Zeitverlauf ggü. 2018 stets geringer als das zusätzliche positive Flexibilitätspotenzial. Das zusätzliche positive Flexibilitätspotenzial erreicht in 2040 sein Maximum (8,2 GW). Aufgrund des Einsatzes zusätzlicher Prozesseffizienz, der Substitution von Primär- durch Sekundäraluminium und dem Wechsel von H₂- auf Hilsarna-Stahlroute sinkt es anschließend leicht um etwa 6 % bis 2050. Etwa 85 % (90 %) des Anstiegs positiver (negativer) Flexibilitätspotenziale in 2050 ggü. 2018 ist auf den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln in der industriellen Niedertemperatur sowie der elektrischen Dampferzeugung in der Papierproduktion zurückzuführen. Elektrodenkessel weisen aufgrund der höheren installierten Leistung infolge geringerer Effizienz ggü. Wärmepumpen einen deutlich höheren Anteil am Differenzpotenzial auf, obwohl die thermische Wärmeauskopplung beider Technologien im CP-Szenario in etwa gleich ist. Das Beispiel verdeutlicht die in den Endenergiesektoren häufig auftretende Interdependenz zwischen effizientem Energieverbrauch und der Bereitstellung von Flexibilitätspotenzialen.

Werden die Ergebnisse den Flexibilitätspotenzialen der zweiten Förderphase des Kopernikus-Projekts SynErgie gegenübergestellt, zeigt sich ein starker Anstieg des maximalen positiven und negativen Flexibilitätspotenzials infolge der Umsetzung von elf CO₂-Verminderungsmaßnahmen in 2050 ggü. 2018. SynErgie weist ein positives Flexibilitätspotenzial von 5 GW bei einer Abrufdauer von 5 Minuten und ein negatives Flexibilitätspotenzial von 3,6 GW bei einer Abrufdauer von einer Minute aus /BMBF-03 21/. Dabei sind Querschnittstechnologien lediglich beim positiven Flexibilitätspotenzial inkludiert. In 2050 steigt das positive bzw. negative Flexibilitätspotenzial allein durch die betrachteten Prozesse und Technologien folglich um etwa 150 % (7,7 GW) bzw. 175 % (6,7 GW) ggü. der SynErgie-Erhebung in 2018.

Die zusätzliche Flexibilitätsenergie in 2050 ist in Summe etwa 10,8 TWh höher als in 2018. Zwischen 2025 und 2030 ist mit einem Zuwachs um etwa 52 % (3,4 TWh) der höchste Anstieg der Flexibilitätsenergie im Zeitverlauf ggü. 2018 zu verzeichnen. Elektrische Niedertemperaturwärmeerzeuger erbringen den Großteil der Flexibilitätsenergie. Da sich die Flexibilitätsenergie aus dem Produkt der Laständerung und der Abrufdauer zusammensetzt, belegt Abbildung 6-5 die deutlich höhere zeitliche Verfügbarkeit von elektrischen Technologien zur Auskopplung von Niedertemperaturwärme im Vergleich zu direkt wertschöpfenden Prozessen. Die Sekundärstahl-, H₂-Stahl-, Primäraluminium-, Hohlglas- und Flachglaserzeugung sowie das MTO-Verfahren weisen Grenzen hinsichtlich ihrer Abrufhäufigkeit pro Jahr auf (exogen auf 365 festgelegt), welche der vergleichsweise hohen Komplexität von Produktionsprozessen ggü. der reinen Wärmebereitstellung Rechnung tragen. Bereits kleinere Temperaturschwankungen können bei Produktionsprozessen zu irreparablen Schäden an Produktionsanlagen führen. Die Abrufdauer der Prozessflexibilität beträgt zudem teilweise nur wenige Minuten. Die Speicher von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln können hingegen annahmegemäß vollständig für die Optimierung des Strombezugs und der Wärmeauskopplung genutzt werden. Trotz sinkender Flexibilitätspotenziale zwischen 2040 und 2050 steigt die Flexibilitätsenergie weiter an. Höhere Abrufhäufigkeiten von Wärmepumpen und Elektrodenheizkessel in Abhängigkeit des Lastgangs bedingen den Anstieg. (vgl. Abbildung 6-7).

Abbildung 6-6 zeigt analog zu Abbildung 6-5 Flexibilitätspotenziale und Flexibilitätsenergien ab 2025 als Differenz ggü. 2018, wobei sich Abbildung 6-6 auf Prozesse und Prozesstechnologien fokussiert.

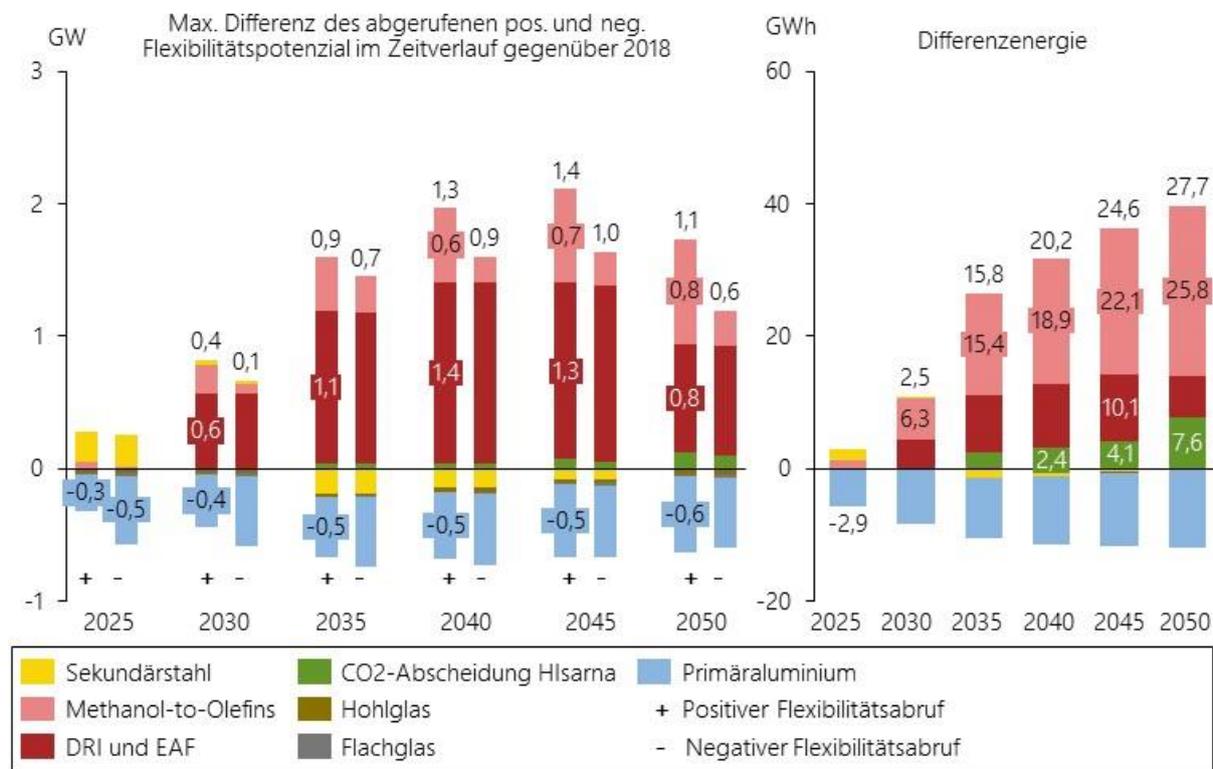


Abbildung 6-6: Maximales Differenzpotenzial und Differenzenergie der Prozesse

Die Steigerung des Flexibilitätspotenzials durch den zunehmenden Einsatz des MTO-Verfahrens und der H₂-Stahlproduktion übertreffen das sinkende Flexibilitätspotenzial aufgrund der Verfahrensroutenwechsel in der Glas- und Aluminiumerzeugung. Obwohl die Sekundärstahlproduktion deutlich steigt, führen starke Effizienzgewinne annahmegemäß zur Verminderung der installierten Leistung und damit des Flexibilitätspotenzials. Das zusätzliche positive und negative Flexibilitätspotenzial der betrachteten Prozesse erreicht in 2045 seinen Höhepunkt und sinkt anschließend hpts. aufgrund der Substitution der H₂-Stahlroute durch das Hlsarna-Verfahren. Trotz der sinkenden Flexibilitätspotenziale steigt die erbrachte zusätzliche Flexibilitätsenergie bis 2050 ggü. 2018 kontinuierlich an. Den Rückgang des Flexibilitätspotenzials der H₂-Stahlroute überkompensiert das MTO-Verfahren und die CO₂-Abscheidung der Hlsarna-Stahlproduktion. Dabei führt die Erhöhung des Flexibilitätspotenzials des MTO-Verfahrens um eine Einheit aufgrund der höheren Abrufdauer im Vergleich zur H₂-Stahlerzeugung (~Faktor 12) ceteris paribus zu einer deutlich höheren Flexibilitätsenergie.

Abbildung 6-7 zeigt exemplarisch die Abrufhäufigkeiten der Wärmepumpe im Vergleich zur Sekundärstahlproduktion. Außerdem unterteilt Abbildung 6-7 die Abrufe der Wärmepumpen in positives und negatives Flexibilitätspotenzial und spezifiziert zudem Leistungsklassen des positiven Potenzials in 2050.

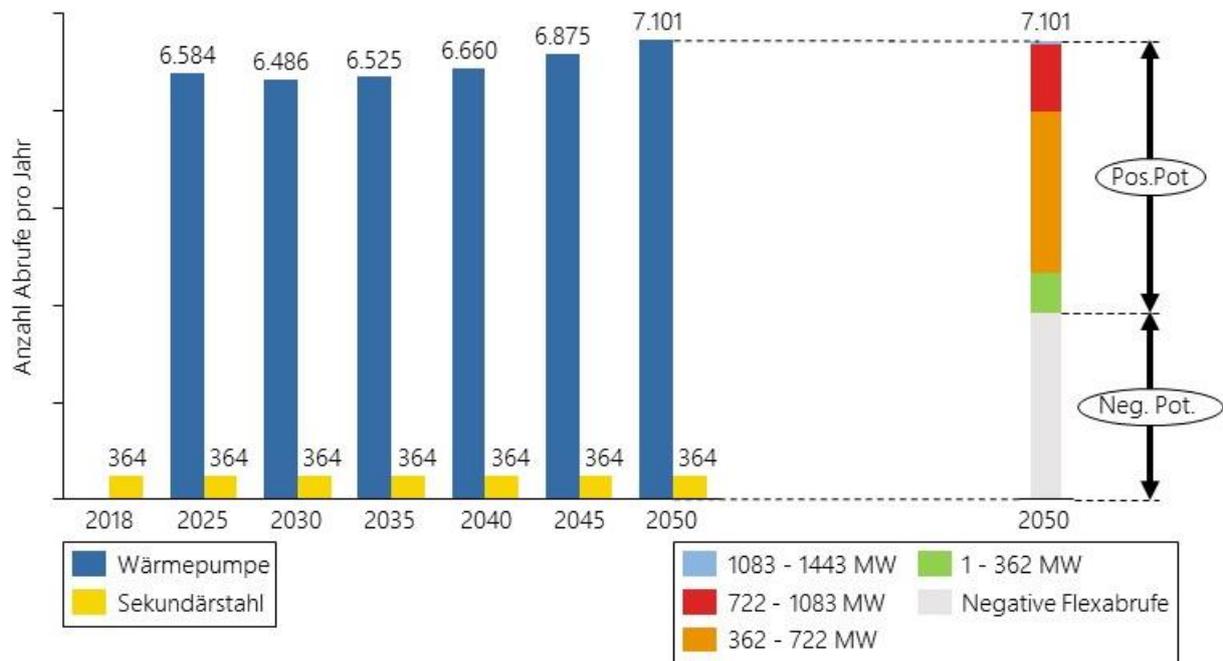


Abbildung 6-7: Abrufhäufigkeit von Wärmepumpe und Sekundärstahl

Aufgrund der im Gegensatz zur Wärmepumpe modellexogenen Begrenzung der Abrufdauer von Flexibilitätspotenzialen der Sekundärstahlproduktion auf einen Abruf pro Tag, werden deren Potenziale deutlich seltener abgerufen. Die meisten positiven Flexibilitätsabrufe der Wärmepumpe erfolgen in der Leistungsklasse zwischen 362 und 722 MW, wobei der maximale positive Flexibilitätsabruf 1 443 MW beträgt (nahezu gesamte zusätzliche installierte Leistung in 2050 ggü. 2018).

Im Gegensatz zu den bisherigen Auswertungen beinhaltet die folgende Sensitivitätsanalyse die Simulationsergebnisse zur Flexibilitätsenergie, welche sich bei konstantem Flexibilitätssignal (Strompreis) und damit verbundenen, gleichbleibenden Preisspreads ergeben. Dafür nutzt das Modell den prospektiven Strompreis aus 2050. Abbildung 6-8 enthält links (1) die statistische Verteilung des Flexibilitätssignals (Strompreis) in den Jahren 2018 und 2050 und rechts (2) den Hochlauf der flexiblen Differenzenergie ab 2025 ggü. 2018 in Summe über die aufgeführten Prozesse bei konstantem Flexibilitätssignal (2050).

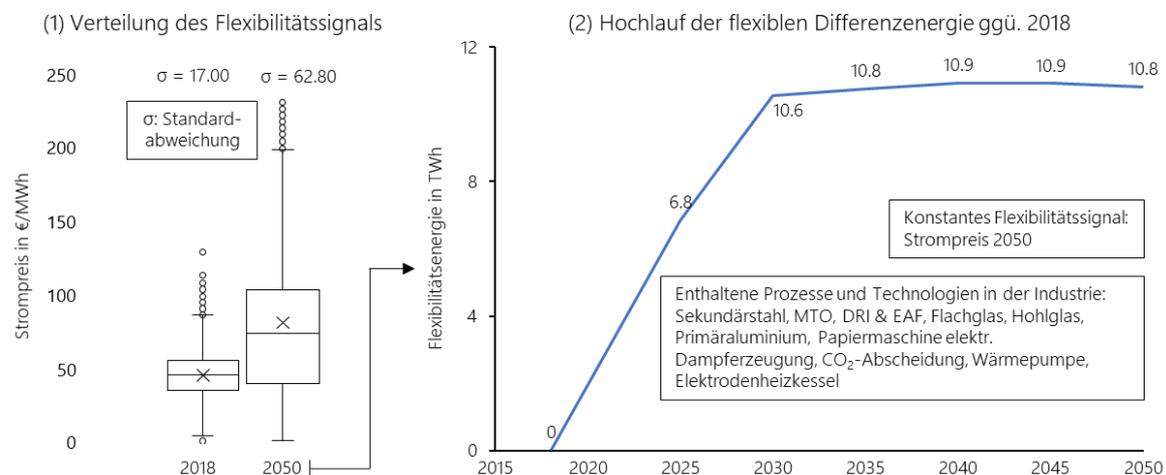


Abbildung 6-8: Boxplots (1) mit statistischer Verteilung des Flexibilitätssignals (Strompreis) und Hochlauf der flexiblen Differenzenergie auf je Stützjahr ab 2025 ggü. 2018

Die deutlich höheren Spreads der Strompreise in 2050 mit einer Standardabweichung von 62,8 ggü. 2018 mit einer Standardabweichung von 17 reflektieren die deutlich gestiegene kurzfristige und saisonale Volatilität der Stromerzeugung. Diese entstehen u.a. durch Dunkelflauten, Hellbriesen und weiterer Extremsituationen wetterabhängiger EE-Erzeugung. Die bisherigen Ergebnisse geben steigende Flexibilitätspotenziale und -energien wieder, welche in Abhängigkeit des jeweiligen jahresspezifischen Strompreises optimiert werden. Es bleibt deshalb bislang unklar, ob die Optimierung lediglich auf den zunehmenden Marktanreiz gesteigener Strompreisspreads reagiert. Die rechte Seite (2) in Abbildung 6-8 enthält erweiterte Simulationsergebnisse bei konstantem Strompreissignal (2050). Abgebildet ist die Differenz der Flexibilitätsenergie ab 2025 ggü. 2018 summiert über die in Abschnitt 6.1 abgeleiteten flexibilitätsrelevanten Prozesse und Technologien. Abbildung 6-8 verdeutlicht, dass selbst bei gleichbleibend hohen Spreads der Strompreise ein deutlicher Hochlauf der zur Verfügung gestellten Flexibilitätsenergie ggü. 2018 erfolgt. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die industrielle Transformation sowie die damit einhergehende Elektrifizierung und Nutzung entstehender Stromflexibilität auch einen wesentlich stärkeren Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien leisten könnte, als bisher. Die zunehmende Umstellung des Bereitstellungssektors auf erneuerbare Energien geht im CP-Szenario dabei Hand in Hand mit der Transformation des Industriesektors. Gerade die prospektiv steigende elektrische Flexibilitätsenergie suggeriert das Abfedern von wetterbedingten Extremereignissen wie Dunkelflauten und Hellbriesen. Eine Analogie ist bei der Transformation des Verkehrssektor, der damit verbundenen Elektrifizierung des Fahrzeugbestands und den bidirektionalen Nutzungsoptionen zu beobachten.

7 Schlussbetrachtung

Basierend auf den Simulationsergebnissen eines ambitionierten Klimaschutzszenarios (CP-Szenario) des Sektormodells Industrie (Smlnd), leiten die Autoren mittels der Erweiterung des Modells um ein Flexibilitätsmodul veränderte flexibilitätsrelevante Parameter (z.B. Flexibilitätspotenziale) von Prozessen und Technologien ab. Das Szenario ist durch eine Kombination aus starker Elektrifizierung, dem Einsatz von Biomasse und der Substitution fossiler durch synthetische Brennstoffe gekennzeichnet.

Anhand einer eigens entwickelten Methode und initialen Simulationsergebnissen werden zunächst elf disruptive CO₂-Verminderungsmaßnahmen bestimmt, welche die Flexibilität industrieller Prozesse und Technologien beeinflussen. Die Maßnahmen umfassen transformative Technologien der Stahl-, Papier, Ethylen und Glasproduktion sowie der Erzeugung von Niedertemperaturwärme. In Summe bewirken die ausgewählten Maßnahmen eine CO₂-Verminderung von knapp 40 % (~63,3 Mio.t CO₂e) ggü. 2020 (178 Mio.t CO₂e).

Anschließend bestimmt das Flexibilitätsmodul positive und negative Differenzpotenziale mit zugehöriger Abrufdauer und Abrufhäufigkeit, welche das veränderte Flexibilitätspotenzial infolge der industriellen Transformation wiedergeben. Das Flexibilitätsmodul berechnet ein zusätzliches positives bzw. negatives Flexibilitätspotenzial von 7,7 GW bzw. 6,3 GW in der Industrie in 2050 ggü. 2018. Etwa 85 % (90 %) des Anstiegs positiver (negativer) Flexibilitätspotenziale in 2050 ggü. 2018 ist auf den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrodenheizkesseln in der industriellen Niedertemperatur sowie der elektrischen Dampferzeugung in der Papierproduktion zurückzuführen. Elektrodenkessel weisen aufgrund der höheren installierten Leistung infolge geringerer Effizienz ggü. Wärmepumpen einen deutlich höheren Anteil am Differenzpotenzial auf, obwohl die thermische Wärmeauskopplung beider Technologien im CP-Szenario in etwa gleich ist. Der Sachverhalt verdeutlicht die häufig auftretende Interdependenz zwischen effizientem Energieverbrauch und der Verfügbarkeit von Flexibilitätspotenzialen in den Verbrauchssektoren. Bei einzelnen Prozessen und Technologien wie der Hohl- und Flachglasproduktion ist infolge der industriellen Transformation auch ein Rückgang des Flexibilitätspotenzials zu beobachten. Insgesamt steigt in 2050 das positive bzw. negative Flexibilitätspotenzial allein durch die betrachteten Prozesse und Technologien um etwa 150 bzw. 175 % ggü. der SynErgie-Potenzialerhebung der zweiten Förderphase.

Neben den Differenzpotenzialen erhebt das Flexibilitätsmodul Differenzenergien. Das Modell weist eine zusätzliche Flexibilitätsenergie von 10,8 TWh in 2050 ggü. 2018 aus. Die höhere Flexibilität reiner Wärmeerzeuger ggü. Prozesstechnologien führt dazu, dass die zusätzliche Flexibilitätsenergie fast ausschließlich durch Wärmepumpen und Elektrodenkessel erbracht wird.

Die Sensitivitätsanalyse, welche das Flexibilitätssignal (Strompreis) als konstant annimmt, impliziert, dass selbst bei gleichbleibend hohen Strompreisspreads ein deutlicher Hochlauf der zur Verfügung gestellten Flexibilitätsenergie ggü. 2018 erfolgt. Die industrielle Transformation sowie die damit einhergehende Elektrifizierung und Nutzung entstehender Stromflexibilität könnte folglich auch einen wesentlich stärkeren Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien leisten, als bisher.

Trotz der umfangreichen Datenerhebung und Modellierung bestehen weiterhin Limitationen und Forschungslücken, welche weitergehende Forschungsarbeiten im Themenbereich schließen könnten.

Wie die meisten Modellarbeiten, sind sowohl die Ergebnisse des CP-Szenarios, als auch des Flexibilitätsmoduls stark annahmegetrieben. Aufgrund der bisher in Forschungsarbeiten fehlenden Analysen zur Flexibilität von industriellen Transformationstechnologien, basiert die Datengrundlage teilweise auf Analogien zu bereits bestehenden Technologien sowie Experteninterviews. Experteninterviews sind geprägt von subjektiven Einschätzungen der Interviewpartner, die allgemeingültige Aussagen erschweren.

Die Ergebnisse sind weiterhin auf die Entwicklung der Flexibilitätspotenziale ausgewählter Technologien begrenzt, welche wiederum auf (lediglich) elf CO₂-Verminderungstechnologien beruhen. Zwar weisen die Maßnahmen in Summe eine hohe CO₂-Verminderung auf (40 % in 2050 ggü. 2020), bilden dennoch aber nur einen Teil der Entwicklung des Industriesektors ab. Weitere Forschungsarbeiten sind dazu aufgerufen, zusätzliche Prozesse und Technologien in die Analyse einzubeziehen. Darüber hinaus bestimmen die modellendogenen Ergebnisse des CP-Szenarios, welche Technologien zum Einsatz kommen. Bspw. verhindert das günstigere MTO-Verfahren den Einsatz des elektrischen Steamcrackers, welcher aufgrund der elektrischen Dampferzeugung hohe Flexibilität offeriert. Die Flexibilität bestehender, aber im CP-Szenario kaum veränderter Prozesse, fließt nicht in die Analysen ein, obwohl sich kleinere Änderungen infolge der prospektiven Veränderung der Wertschöpfung ergeben. Dementsprechend repräsentieren die ausgewiesenen Flexibilitätspotenziale ausschließlich die betrachteten Prozesse und Technologien.

Darüber hinaus vernachlässigt das Flexibilitätsmodul die Fixkosten der Flexibilität. Investitionen in Speicher und Produktionslager sowie die notwendige Technik für die Prozessregelung exkludiert das Modul.

Die Simulationen setzen die homogene Betriebsweise der Produktionsanlagen analog zu den konstruierten Lastgängen voraus. In der Praxis variiert die Betriebsweise der Produktionsanlagen jedoch werkspezifisch /HÜB-01 17/. Ebenso ist die angenommene Gleichzeitigkeit des Summenlastgangs als theoretisches Konstrukt zu verstehen. Ein Großteil der Flexibilitätspotenziale ist auf kleinteilige, elektrische Wärmeerzeuger zurückzuführen. Deren Gleichzeitigkeit sowie die Notwendigkeit von Poolinglösungen zur Hebung der Potenziale klammert die Analyse aus. Infolgedessen stellt das ermittelte Differenzpotenzial auf Bundesebene eine obere Abschätzung dar.

Mit steigender Anforderung durch das Flexibilitätssignal (Strompreis) steigt auch der Anreiz Flexibilität abzurufen. Mit höheren Strompreisspreads könnten sich dementsprechend auch erhöhte Flexibilitätspotenziale und -energien einstellen. Jedoch zeigt die Sensitivitätsanalyse „konstanter Strompreis“, dass selbst bei konstantem Flexibilitätssignal zusätzliche Flexibilitätsenergien im Zeitverlauf ggü. 2018 im CP-Szenario entstehen.

Die Analyse der Auswirkungen von industriellen CO₂-Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien zeigt, dass bei hohem industriellen Klimaschutzambitionsniveau zusätzliche Flexibilitätspotenziale in der Industrie entstehen. Reine Wärmeversorger eignen sich aufgrund ihrer hohen Flexibilitätsenergie und geringeren Komplexität für die Überbrückung längerfristiger Zeiträume, wohingegen wertschöpfende

Prozesse primär zum Ausgleich kurzzeitiger extremer Lastspitzen nützen. Die Ergebnisse zeigen, dass die zunehmende Umstellung des Bereitstellungssektors auf erneuerbare Energien Hand in Hand mit der Transformation des Industriesektors geht und damit einen wesentlichen Beitrag zu deren Integration leisten können. Die Flexibilität zu heben und das damit verbundene, angestrebte Klimaschutzambitionsniveau zu erreichen, obliegt nun den jeweiligen Unternehmen, Akteuren und politischen Entscheidungsträgern der Bundesrepublik Deutschland.

Finanzierung und Förderung:

Das dieser Publikation zugrundeliegende Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SFK300-2 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Publikation liegt vollständig bei den Autoren.



8 Literatur

- AGORA-05 16** Nabe, Christian: Flex-Efficiency - Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. Berlin: Agora Energiewende, 2016
- AGORA-05 17** Praetorius, Barbara; Lenck, Thorsten: Neue Preismodelle für Energie - Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger. Berlin: Agora Energiewende, 2017
- AGORA-07 19** Joas, Fabian et al.: Klimaneutrale Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, Wuppertal: Agora Energiewende, 2019.
- AGORA-07 20** Prognos et al.: Klimaneutrales Deutschland - In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Berlin: Agora Energiewende, 2020.
- AGORA-11 20** Schneider, Clemens et al.: klimaneutrale Industrie - Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Berlin: AGORA Energiewende, 2020.
- ARCE-01 10** Birat, J-P.: 16 - Carbon dioxide (CO₂) capture and storage technology in the iron and steel industry. France: ArcelorMittal Global, 2010.
- ARNO-01 12** Arnold, Heinz: Trimet Aluminium: "Wir brauchen dringend die Abschaltverordnung!" in: <http://www.smarterworld.de/smart-energy/sonstige/artikel/89092/> (Abruf: 16.09.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6te3blBR4>). Haar: WEKA FACHMEDIEN GmbH, 2012
- AURU-01 19** Umweltschutz im Aurubis-Konzern und aktualisierte Umwelterklärung 2019 der Aurubis AG der Standorte Hamburg und Lünen. Hamburg: Aurubis AG, 2019.
- BCG-01 13** Wörtler, Martin et al.: Steel's contribution to a low-carbon Europe 2050 - Technical and economic analysis of the sector's CO₂ abatement potential. Boston: The Boston Consulting Group (BCG), Steel Institute (VDEh), 2013
- BMBF-01 17** Kopernikus-Projekt SynErgie in: <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/industrieprozesse> (Abruf: 21.03.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6p7jPY669>). Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2017
- BMBF-01 20** Laufendes Projekt: Kopernikus SynErgie: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - Zweite Förderphase v4.0 (2019 - 2022). München: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2019.
- BMBF-03 21** Wie das Kopernikus-Projekt SynErgie der Industrie dabei hilft, ihre Stromnachfrage an das Stromangebot anzupassen. In: <https://www.kopernikus-projekte.de/synergie>. (Abruf am 2021-10); Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021.
- BMWi-06 18** BMWi: Energiedaten: Gesamtausgabe. Berlin: BMWi, 2018.
- BMWi-01 19** Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021).

- München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- BMWI-12 21** Entwurf eines Ersten Gesetzes zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Ausgefertigt am 2021-06-24, Version vom 2021-08-18; Berlin, Bonn: BMWI, BMU, 2021.
- BÖK-01 17** Böker, Andreas; Paerschke, Hartmuth; Boggasch, Ekkehard: Elektrotechnik für Gebäudetechnik und Maschinenbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017
- BRD-04 19** Projektionsbericht 2019 für Deutschland. Berlin: Bundesregierung, 2019.
- BRUNK-01 16** Brunke, Jean-Christian: Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland - Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Dissertation. Herausgegeben durch die Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, geprüft von Voß, Alfred und Sauer, Alexander: Stuttgart, 2016.
- BYU-01 09** Baxter, Larry et al.: Cryogenic CO2 Capture as a Cost-Effective CO2 Capture Process. Provo, Orem: Brigham Young University, 2009.
- DECH-02 19** Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. München, Frankfurt: Dechema, 2019.
- DECHEMA-01 17** Bazzanella, Alexis et al.: Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 2017.
- DENA-01 16** Seidl, Hannes; Schenuit, Carolin; Teichmann, Mario: Roadmap Demand Side Management - Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2016
- DOW-01 13** Kai, Moll: Trimet: Deutsche Aluhütten können Stromspeicherkapazität in: <http://www.dowjones-metals.de/trimet-deutsche-aluhutten-konnen-stromspeicherkapazit/>. Frankfurt: Dow Jones News GmbH, 2013
- EAA-03 18** Environmental Profile Report - Life-Cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Brussels: European Aluminium (eea), 2018.
- EANRW-01 16** Langrock, Th.; Brühl, St.; Michels, A.: Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. Düsseldorf: EnergieAgentur.NRW, 2016
- EWI-09 10** Paulus, Moritz; Borggreffe, Frieder: The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany in: Applied Energy. Köln: Institute of Energy Economics (EWI), 2010
- FFE-06 15** Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Industrielles Power-to-Heat Potenzial in: Vortrag bei der IEWT 2015 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2015
- FFE-16 15** Pellingner, Christoph; Schmid, Tobias et al.: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Technoökonomische Analyse

- funktionaler Energiespeicher; laufendes Projekt. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2015
- FFE-26 16** Gruber, Anna; Von Roon, Serafin; Fattler, Steffen: Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2016
- FFE-05 17** Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017
- FFE-154 17** Guminski, Andrej et al.: CO₂-Verminderung in der Hohlglasherstellung. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017.
- FFE-53 17** Hauck, Heribert; Email - Aluminiumelektrolyse; Expertenbefragung, geführt von Anna Gruber. Essen: TRIMET Aluminium SE, 2017
- FFE-72 17** Glink, Saskia: Vergleich der Fernwärmeversorgung ausgewählter EU-Länder anhand charakteristischer Kenngrößen und Ableitung politischer Handlungsempfehlungen für Deutschland. Bachelorarbeit, betreut durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.: München, 2017
- FFE-12 18** Ausfelder, Florian et al.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie - Methodik | Potenziale | Hemmnisse. München, Frankfurt/Main, Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2018.
- FFE-104 19** Fattler, Steffen et al.: Dynamis Hauptbericht - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2019.
- FFE-144 19** Fattler, Steffen; Conrad, Jochen; Regett, Anika et al.: Dynamis Hauptbericht - Dynamis - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems - Online: <https://www.ffe.de/dynamis>. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2019. DOI: 10.34805/ffe-144-19
- FFE-70 19** Böing, F., & Regett, A. (2019). Hourly CO₂ Emission Factors and Marginal Costs of Energy Carriers in Future Multi-Energy Systems. *Energies*, 12(12), 2260. Basel, Switzerland: MDPI AG, 2019.
- FFE-09 20** Hübner, Tobias: Small-Scale Modelling of Individual Greenhouse Gas Abatement Measures in Industry. Munich: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2020.
- FFE-39 20** Hübner, Tobias; Serafin von Roon: Modellierung kosteneffizienter Transformationspfade der deutschen Industrie. In: *Energieinnovation 2020 - 16. Symposium Energieinnovation 16(20)*. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2020.
- FFE-02 21** Ganz, Kirstin et al.: Wie können europäische Branchen-Lastgänge die Energiewende im Industriesektor unterstützen? In: et - *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Ausgabe 1/2, 2021, S. 79 - 81.

- München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FFE), 2021.
- FFE-26 21** Guminski, Andrej et al.: CO₂-Verminderung in der Flachglasherstellung. München, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2021.
- FFE-41 21** Brand, Dr. Ulrich Jobst: Interview - Technische Daten zur Sekundärstahlherstellung mittels Elektrolichtbogenofen (Terni); Interview, geführt von Metzger, Konstantin; FFE München: Thyssen-Krupp, 2021
- FFE-42 21** Stoffregen, Torsten: Interview - Speicherkapazität von Post-Carbon-Capture-Analgen; Interview, geführt von Metzger, Konstantin; Essen: Linde AG, 2021
- FFE-43 21** Brand, Jobst: Interview - Vollaststunden Hochofenroute; Interview, geführt von Metzger, Konstantin; Duisburg: Thyssen-Krupp, 2021
- GRUB-01 17** Gruber, Anna-Maria: Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien – Dissertation, eingereicht an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU München, durchgeführt an der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: München, 2017
- HÜB-01 17** Hübner, Tobias: Simulation von Referenzprozessen zur Bestimmung von Flexibilitätspotenzialen und der Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen in der Grundstoffindustrie. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München, betreut durch die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: München, 2017.
- ICCC-01 12** Carpenter, Anne: CO₂ abatement in the iron and steel industry. London: IEA Clean Coal Centre, 2012.
- IER-01 20** Radgen, Peter et al.: Exergie und Wirtschaft - Untersuchung der Transformationspfade von Hauptprozessen in der deutschen Wirtschaft mit dem Ziel der Dekarbonisierung auf der Grundlage von exergetischen Analysen und Untersuchung der Auswirkungen möglicher Veränderungen auf den Schutz der natürlichen Ressourcen und der natürlichen Umwelt. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart, 2020.
- IPA-01 19** Sauer, Alexander et al.: Energieflexibilität in der deutschen Industrie - Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer IPA und EEP, 2019. ISBN 978-3-8396-1479-2.
- ISI-05 13** Fleiter, Tobias; Schlomann, Barbara; Eichhammer, Wolfgang: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien - Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente in: ISI Schriftenreihe "Innovationspotentiale". Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2013
- ISI-12 13** Fleiter, Tobias et al.: Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotentiale, Hemmnisse

- und Instrumente. Stuttgart: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2013.
- ISI-07 17** Pfluger, Benjamin et al.: Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI), 2017.
- ISI-07 19** Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2019.
- ISI-11 19** Chan, Yeen et al.: Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. - Part 1: Technology Analysis. London: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, 2019.
- IWU-03 15** Reinhart, Gunther; Dornmair, Rita; Graßl, Markus; Keller, Fabian: Ergebnispapier: Flexibilisierung der Energienachfrage von industriellen Verbrauchern - Ergebnisse des Arbeitskreises I des Forschungsverbunds FOREnergy. Augsburg: Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), 2015
- KFA-01 16** Wang, Yuan et al.: A Review of Post-combustion CO2 Capture Technologies from Coal-fired Power Plants. Jülich: Forschungszentrum Jülich, 2016.
- KRAM-01 09** Kammer, Catrin: Aluminium Taschenbuch 1. Düsseldorf: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikatio GmbH, 2009
- LEE-01 02** Unger, H.; Wagner, H.-J.; et al.: Validierung und kommunale Disaggregation des Expertensystems HERAKLES - Abschlussbericht zum Vorhaben 258 114 98. Bochum: Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ruhr-Universität Bochum (LEE), 2002
- ÖKO-01 16** Bauknecht, Dierk Dr.; Heinemann, Christoph; Koch, Matthias Dr.; Ritter, David; Harthan, Ralph Dr.; Sachs, Anja; Vogel, Moritz; Tröster, Eckehard Dr.; Langanke, Stefan: Systematischer Vergleich von Flexibilitäts- und Speicheroptionen im deutschen Stromsystem zur Integration von erneuerbaren Energien und Analyse entsprechender Rahmenbedingungen. Freiburg, Darmstadt: Öko-Institut e.V., Energynautics GmbH, 2016
- OST-02 14** Ostermann, Friedrich: Anwendungstechnologie Aluminium - Gewinnung, Recycling, Ökologie in: VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014
- OTTO-01 17** Otto, Alexander; Robinius, Martin; Grube, Thomas; Schiebahn, Sebastian; Praktiknjo, Aaron; Stolten, Detlef: Power-to-Steel - Reducing CO2 through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry in: Energies (4), 2017, S. 451. Basel: MDPI, 2017
- REN-02 06** Ren, Tao et al.: Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. In: Energy 31. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University, 2006.
- RPOHL-01 15** Pohling, Rolf: Chemische Reaktionen in der Wasseranalyse. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015
- STEU-01 17** Steuerer, Martin: Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Dissertation. Herausgegeben durch das Institut für Energiewirtschaft

- und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER),
geprüft von Hufendiek, Kai und Scheffknecht, Günter: Stuttgart, 2017.
- TAMU-01 15** Jasper, Sarah et al.: A Techno-Economic Comparison between Two Methanol-to-Propylene Processes. Texas, Bochum: Texas A&M University, 2015.
- TRI-02 13** Hauck, Heribert: Aluminiumelektrolyse als virtueller Stromspeicher - ein Beitrag zum Gelingen der Energiewende in: 4. Dow Jones Aluminium-Forum 2013. Essen: Trimet Aluminium AG, 2013
- TRI-01 16** Hauck, Heribert: Aluminiumelektrolyse als virtueller Stromspeicher. Darmstadt: Hauck, 2016
- TRI-02 17** Nübold, Wolfgang: „Virtuelle Batterie“ der TRIMET wird Teil der KlimaExpo.NRW in:
<http://www.trimet.eu/de/presse/pressemitteilungen/2017/2017-01-13-virtuelle-batterie-der-trimet-wird-teil-der-klimaexpo.nrw?id=6> (Abruf: 03.07.2017) (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6te3zOM5X>). Köln: Instinctif Partners, 2017
- UBA-05 15** Langrock, Thomas; Achner, Sigggi; Jungbluth, Christian; Marambio, Constanze; Michels, Armin; Weinhard, Paul; Baumgart, Bastian; Otto, Achim: Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015
- US-03 19** Alejandro, Tristán et al.: SynErgie II – Glossar - Einheitliche und clusterübergreifende Definition von Begrifflichkeiten im Kontext der Energieflexibilität. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2019.
- UTU-01 08** Ren, Tao et al.: Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO2 emissions and production costs. Utrecht: Utrecht University, 2008.
- UTU-02 09** Ren, Tao: Petrochemicals from Oil, Natural Gas, Coal and Biomass: Energy Use, Economics and Innovation. Utrecht: Utrecht University, 2009.
- VDI-02 08** Emissionsminderung Aluminiumschmelzanlagen (VDI 2286). Ausgefertigt am 2008-06, Version vom 2008; Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2008.
- VDI-01 13** Gruber, Anna; Von Roon, Serafin; Pellingner, Christoph; Buber, Tim; Schmid, Tobias: Lastflexibilisierung in der Industrie in Konkurrenz zu weiteren funktionalen Speichern. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2013
- VDZ-03 16** Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015 - Environmental Data of the German Cement Industry. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2016
- VDZ-01 20** Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien - Eine CO2 - Roadmap für die deutsche Zementindustrie. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), 2020.
- VDZ-02 21** Schall, Albrecht: Interview - OPEX und CAPEX in der Zement- und Klinkerherstellung; Interview, geführt von Metzger, Konstantin; FFE München: VDZ- Verein Deutscher Zementwerke, 2021

- VTT-02 14** Hannula, Ilkka et al.: Light olefins and transport fuels from biomass residues via synthetic methanol: performance and cost analysis. Finland: Technical Research Centre of Finland, 2014.
- WI-05 08** Irrek, Wolfgang; Thomas, Stefan; Böhler, Susanne; Spitzner, Meike: Definition Energieeffizienz. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2008
- WI-02 17** Markewitz, P. et al.: Technologiebericht 2.3 CO₂- Abscheidung und Speicherung (CCS) - Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal, Karlsruhe, Saarbrücken: Wuppertal Institut, 2017.
- WIE-01 15** Wietschel, Martin et al.: Energietechnologien der Zukunft - Erzeugung, Speicherung, Effizienz und Netze. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015
- WOLF-02 16** Wolf, Stefan: Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme - Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung. Dissertation. Herausgegeben durch Universität Stuttgart, geprüft von Voß, A. und Sauer, A.: Stuttgart, 2016.

9 Anhang

9.1 Ergebnisse Klimaschutzszenario und Flexibilitätsmodul

Tabelle 9-1: Industrielle Produktionsmengen je Prozess im „Climate Protection“ Szenario

Industrielle Prozesse	Produktionsmengen in kt, CP-Szenario					
	2019	2025	2030	2040	2045	2050
Milch	18 753	19 271	19 387	18 594	18 582	18 570
Backwaren	6 068	6 267	6 337	6 109	6 135	6 162
Papierherstellung	22 399	22 281	21 955	23 117	23 411	23 706
Grasstoff	3	4	4	4	4	4
Zellstoff	1 594	1 567	1 497	1 302	1 212	1 121
Holzstoff	907	891	851	741	690	638
Altpapierstoff	17 730	18 028	17 718	17 550	18 005	18 460
Ammoniak	2 653	2 667	2 651	2 872	2 867	2 862
Ethylen, konventionell	5 039	5 035	4 521	3 495	2 981	2 468
Methanol	904	1 521	4 149	9 391	11 645	12 919
Chlor	4 673	5 134	5 206	5 318	5 314	5 309
Polyethylen	1 682	1 775	1 825	1 957	2 060	2 163
Luftzerlegung	9 399	9 920	10 267	10 514	10 934	11 354
Ethylen, elektrische Dampferzeugung	0	0	0	0	0	210
Ethylen, MTO-Verfahren	0	133	700	1 809	2 295	2 570
Hohlglas	5 078	5 066	4 564	418	0	0
Flachglas	2 439	2 433	2 240	609	0	0
Elektrohohlglas	0	0	418	4 575	5 163	5 334
Elektroflachglas	0	0	152	1 788	2 479	2 561
Haushalts-, Sanitärkeramik	45	43	41	43	43	43
Technische Keramik	237	227	216	224	224	223
Fliesen-, Platten-, Feuerfestkeramik	2 232	2 171	2 089	2 134	2 158	2 183
Zement	33 576	32 338	30 765	27 869	26 848	25 844
Kalk gebrannt	6 468	6 297	6 320	6 163	5 998	5 832
Ziegel	12 952	12 381	11 779	11 180	10 963	10 746
Klinker	24 375	23 264	21 967	19 492	18 534	17 593
Innovative Bindemittel	0	0	0	1 467	2 177	2 872
Strombasierte Klinkerherstellung	0	0	0	0	0	0
Primärstahl Hochofen	29 325	24 134	19 125	9 107	4 098	0
Sekundärstahl	12 527	16 929	19 427	20 981	21 750	22 488
Primärstahl H ₂	0	0	2 932	7 822	7 822	4 889
Primärstahl Hlsarna	0	0	0	3 028	6 701	12 424
Walzstahl	35 900	34 607	34 342	33 968	33 610	33 253
Sinter	25 664	24 985	25 073	24 450	23 794	23 138
Primäraluminium	566	444	397	350	328	305
Primärkupfer	408	379	360	346	345	344
Sekundärkupfer	296	314	307	311	320	329
Sekundäraluminium	681	806	827	941	989	1 038
Aluminium Gießereien	1 023	1 061	1 071	1 194	1 271	1 348
Aluminium Walzen	2 381	2 467	2 491	2 775	2 955	3 135
Kupferbearbeitung	1 875	1 842	1 772	1 794	1 816	1 838
Bayer-Prozess	1 085	1 072	1 038	1 020	982	944

Industrielle Prozesse	Produktionsmengen in kt, CP-Szenario					
	2019	2025	2030	2040	2045	2050
Papierherstellung	22 399	22 281	21 955	23 117	23 411	23 706
Ammoniak	2 653	2 667	2 651	2 872	2 867	2 862
Ethylen, konventionell	5 039	5 035	4 521	3 495	2 981	2 468
Ethylen, elektrische Dampferzeugung	0	0	0	0	0	210
Ethylen, MTO-Verfahren	0	133	700	1 809	2 295	2 570
Flachglas	2 439	2 433	2 240	609	0	0
Elektroflachglas	0	0	152	1 788	2 479	2 561
Zement	33 576	32 338	30 765	27 869	26 848	25 844
Innovative Bindemittel	0	0	0	1 467	2 177	2 872
Primäraluminium	566	444	397	350	328	305
Sekundäraluminium	681	806	827	941	989	1 038

Tabelle 9-2: Industrieller spezifischer Stromverbrauch je Prozess im „Climate Protection“ Szenario

Industrielle Prozesse	Spezifischer Stromverbrauch in MWh/t, CP-Szenario					
	2019	2025	2030	2040	2045	2050
Milch	0,14	0,179	0,197	0,2	0,2	0,2
Backwaren	0,509	0,497	0,493	0,499	0,498	0,498
Papierherstellung	0,433	0,567	0,689	0,691	0,691	0,691
Grasstoff	0,129	0,09	0,085	0,079	0,078	0,077
Zellstoff	0,636	0,476	0,325	0,049	0,04	0,034
Holzstoff	1,717	1,591	1,489	1,368	1,342	1,327
Altpapierstoff	0,244	0,211	0,181	0,163	0,159	0,157
Ammoniak	1,572	1,499	1,451	1,404	1,392	1,385
Ethylen, konventionell	0,201	0,202	0,206	0,217	0,216	0,215
Methanol	0,164	0,156	0,159	0,236	0,277	0,31
Chlor	2,704	2,557	2,454	2,33	2,282	2,241
Polyethylen	0,458	0,385	0,32	0,308	0,305	0,303
Luftzerlegung	0,202	0,193	0,188	0,183	0,181	0,18
Ethylen, elektrische Dampferzeugung	-	-	-	-	-	9,81
Etyhlen, MTO-Verfahren	-	2,595	2,514	2,447	2,427	2,414
Hohlglas	0,319	0,304	0,295	0,283	-	-
Flachglas	0,751	0,704	0,67	0,628	-	-
Elektrohohlglas	-	-	0,788	0,763	0,757	0,753
Elektroflachglas	-	-	1,974	1,908	1,892	1,884
Haushalts-, Sanitärkeramik	1,154	1,121	1,113	1,114	1,105	1,101
Technische Keramik	0,883	0,858	0,847	0,837	0,828	0,827
Fliesen-, Platten-, Feuerfestkeramik	0,241	0,235	0,234	0,234	0,232	0,231
Zement	0,05	0,042	0,036	0,026	0,026	0,026
Kalk gebrannt	0,122	0,085	0,056	0,045	0,042	0,034
Ziegel	0,143	0,132	0,124	0,112	0,106	0,101
Klinker	0,06	0,054	0,052	0,048	0,048	0,048
Innovative Bindemittel	-	-	-	0,17	0,165	0,161
Strombasierte Klinkerherstellung	-	-	-	-	-	-
Primärstahl Hochofen	0,033	0,027	0,028	0,038	0,048	-
Sekundärstahl	0,518	0,433	0,344	0,291	0,291	0,291
Primärstahl H ₂	-	-	0,621	0,566	0,553	0,543
Primärstahl Hlsarna	-	-	-	0,215	0,255	0,294
Walzstahl	0,127	0,12	0,112	0,102	0,1	0,098
Sinter	0,036	0,034	0,032	0,029	0,029	0,028
Primäraluminium	15,517	14,251	13,277	12,534	12,311	12,155
Primärkupfer	0,888	0,833	0,797	0,775	0,767	0,764
Sekundärkupfer	0,962	0,904	0,868	0,864	0,861	0,863
Sekundäraluminium	0,273	0,263	0,258	0,264	0,26	0,258
Aluminium Gießereien	2,853	2,753	2,709	2,767	2,799	2,844
Aluminium Walzen	0,501	0,472	0,452	0,438	0,431	0,427
Kupferbearbeitung	0,152	0,145	0,14	0,14	0,137	0,136
Bayer-Prozess	0,148	0,152	0,159	0,179	0,177	0,175

Tabelle 9-3: Technologiespezifisches positives Differenzpotenzial

Industrielle Prozesse	Positives Differenzpotenzial ggü. 2018 in GW					
	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Sekundärstahl	0,231	0,032	-0,189	-0,147	-0,079	-0,012
Methanol-to-Olefins	0,044	0,224	0,411	0,562	0,706	0,787
Wärmepumpe	0,849	1,371	1,453	1,524	1,434	1,443
Elektrodenkessel	2,566	3,706	3,706	3,713	3,422	3,516
DRI und EAF	0	0,562	1,146	1,366	1,335	0,819
CO ₂ -Abscheidung Hlsarna	0	0	0,035	0,039	0,067	0,123
Papiermaschine, elektr.	0,927	1,653	1,663	1,653	1,65	1,634
Dampferzeugung						
Hohlglas	-0,033	-0,033	-0,025	-0,03	-0,033	-0,033
Flachglas	-0,011	-0,011	0,002	-0,005	-0,011	-0,011
Primäraluminium	-0,283	-0,403	-0,452	-0,506	-0,546	-0,584

Tabelle 9-4: Technologiespezifisches negatives Differenzpotenzial

Industrielle Prozesse	Negatives Differenzpotenzial ggü. 2018 in GW					
	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Sekundärstahl	0,231	0,032	-0,189	-0,147	-0,079	-0,012
Methanol-to-Olefins	0,016	0,07	0,272	0,197	0,246	0,274
Wärmepumpe	0,699	1,128	1,196	1,249	1,249	1,251
Elektrodenkessel	2,111	3,048	3,05	3,042	3,043	3,046
DRI und EAF	0	0,562	1,146	1,366	1,335	0,819
CO ₂ -Abscheidung Hlsarna	0	0	0,031	0,034	0,051	0,1
Papiermaschine, elektr.	0,795	1,43	1,42	1,43	1,43	1,427
Dampferzeugung						
Hohlglas	-0,033	-0,033	-0,017	-0,03	-0,033	-0,033
Flachglas	-0,022	-0,022	-0,009	-0,016	-0,022	-0,022
Primäraluminium	-0,522	-0,531	-0,533	-0,537	-0,539	-0,529

Tabelle 9-5: Technologiespezifische Differenzenergie

Industrielle Prozesse	Positive/Negative Differenzenergie ggü. 2018 in GWh					
	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Sekundärstahl	1,75	0,24	-1,43	-1,12	-0,60	-0,09
Methanol-to-Olefins	1,16	6,31	15,38	18,86	22,10	25,80
Wärmepumpe	1246,48	1990,96	2131,02	2294,22	2373,65	2440,83
Elektrodenkessel	3767,88	5379,94	5435,35	5593,95	5791,63	5954,99
DRI und EAF	0,00	4,26	8,69	10,36	10,12	6,21
CO ₂ -Abscheidung Hlsarna	0,00	0,00	2,22	2,37	4,09	7,64
Papiermaschine, elektr.	1474,53	2488,66	2583,23	2593,60	2437,49	2368,10
Dampferzeugung						
Hohlglas	-0,11	-0,11	-0,11	-0,09	-0,11	-0,11
Flachglas	0,00	0,00	0,16	0,06	0,00	0,00
Primäraluminium	-5,66	-8,25	-9,11	-10,25	-11,03	-11,76

9.2 Eingangsdaten Modellierung

Tabelle 9-6: Relevante Prozess- und Technologieparameter der Modellierung

Prozess/Technologie	1	2	3	4	5	Quellen
Sekundärstahl	7 709	3 242	0,00016	62	2,5	/FFE-12 18/, /ISI-05 13/, /FFE-41 21/ /VTT-02 14/, /UTU-01 08/, /DECHEMA-01 17/, /IER-01 20/, /ISI-05 13/, /FFE-41 21/, /STEU-01 17/
MTO-Verfahren	7 890	7 890	0,00035	151	30	/DECHEMA-01 17/, /IER-01 20/, /ISI-05 13/, /FFE-41 21/, /STEU-01 17/
H ₂ -Stahl (DRI & EAF)	7 709	3 242	0,00016	62	2,5	/FFE-12 18/, /ISI-05 13/, /FFE-41 21/ /ISI-12 13/, /BRD-04 19/, /IPA-01 19/, /STEU-01 17/
Hohlglas	8 760	7 076	0,0000196	0,044	8	/ISI-12 13/, /BRD-04 19/, /IPA-01 19/, /STEU-01 17/
Flachglas	8 760	7 076	0,0000275	0,044	8	/ISI-12 13/, /BRD-04 19/, /IPA-01 19/, /STEU-01 17/
Primäraluminium, konv.	8 760	8 520	0,00176	10,54	60	/HÜB-01 17/, /GRUB-01 17/, /WIE-01 15/ /HÜB-01 17/, /TRI-02 13/, /IPA-01 19/, /GRUB-01 17/, /TRI-01 16/
Primäraluminium, flex	8 760	8 520	0,00176	10,54	60	/HÜB-01 17/, /TRI-02 13/, /IPA-01 19/, /GRUB-01 17/, /TRI-01 16/
Papiermaschine, elek. Dampf	5 000	3 500	0,00029	16,8	60	/FFE-06 15/, /IPA-01 19/, /FFE-12 18/ /FFE-43 21/, /FFE-12 18/, /FFE-41 21/, /ISI-05 13/, /STEU-01 17/
CO ₂ -Abscheidung Hlsarna	7 709	7 000	0,000027	57,5	30	/FFE-43 21/, /FFE-12 18/, /FFE-41 21/, /ISI-05 13/, /STEU-01 17/
Wärmepumpe	5 000	3 500	0,00029	16,8	60	/FFE-06 15/, /IPA-01 19/, /FFE-12 18/ /FFE-06 15/, /IPA-01 19/, /FFE-12 18/
Elektrodenkessel	5 000	3 500	0,00029	16,8	60	/FFE-06 15/, /IPA-01 19/, /FFE-12 18/

1: Betriebsstunden (h/a); 2: Volllaststunden (h/a); 3: Spez. elek. Leistung (kW/t); 4: Spez. phys. Speicher (kWh/kW)

5: Speicherteilmenge pro Stunde (min/h)

Tabelle 9-7: Weitere Relevante Prozess- und Technologieparameter der Modellierung

Prozess/Technologie	6	7	8	9	10	11	Quellen
Sekundärstahl	0	unbegrenzt	365	0	0	1	/FFE-12 18/
MTO-Verfahren	28	unbegrenzt	315	0	0	1	/STEU-01 17/
H ₂ -Stahl (DRI & EAF)	0	unbegrenzt	365	0	0	1	/FFE-12 18/
Hohlglas	876	unbegrenzt	365	1	0,667	1,19	/STEU-01 17/, /IPA-01 19/
Flachglas	876	unbegrenzt	365	1	0,667	1,19	/STEU-01 17/, /IPA-01 19/
Primäraluminium, konv.	4	4	365	0	0	1,02	/FFE-53 177/, /WIE-01 15/
Primäraluminium, flex.*	4	48	365	1	0,75	1,25	/TRI-01 16/
Papiermaschine, elek. Dampf	0	unbegrenzt	8760	0	0	1	/FFE-12 18/
CO ₂ -Abscheidung Hlsarna	28	unbegrenzt	315	0	0	1	/STEU-01 17/
Wärmepumpe	0	unbegrenzt	8760	0	0	1	/FFE-12 18/
Elektrodenkessel	0	unbegrenzt	8760	0	0	1	/FFE-12 18/

6: Sperrzeit nach Flexabruf (h); 7: Max. Abrufhäufigkeit in Folge (h); 8: Max. Abrufhäufigkeit pro Jahr (Stk.); 9: Teillastbetrieb ja/nein (bin);

10: Min. Leistung (% von Nennlast); 11: Max. Leistung (% von Nennlast) *Anteil flex. Primäraluminium in DE angenommen mit 10 %

9.3 Methode zur Auswahl relevanter CO₂-Verminderungsmaßnahmen

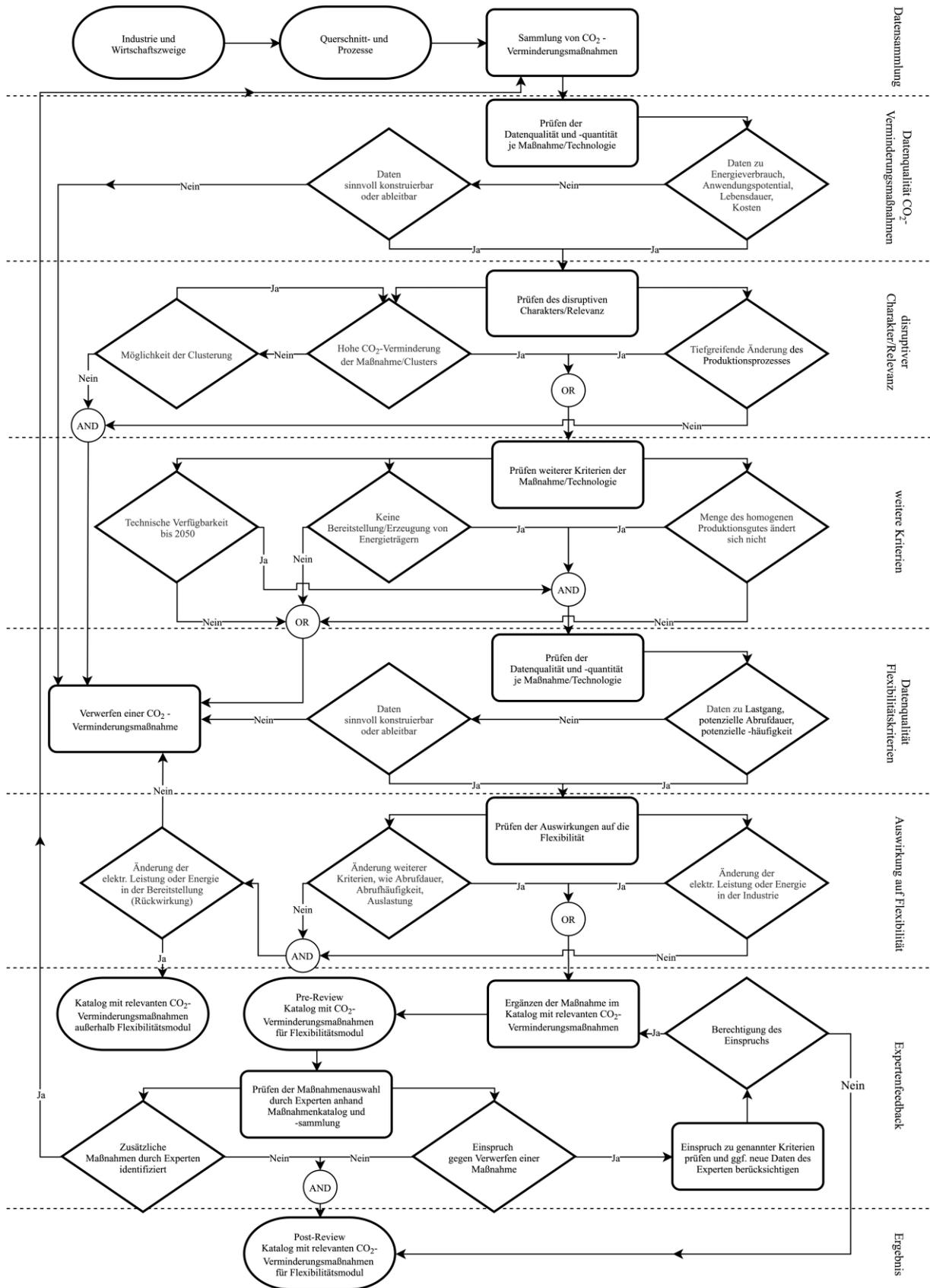


Abbildung 9-1: Vollständige Methodik zur Identifizierung und Auswahl von disruptiven CO₂-Verminderungsmaßnahmen