

CO₂-Vermeidungspotential beim Einsatz von Maßnahmen industrieller Nachfrageflexibilität

Bastian Zachmann¹, Stefan Seifermann

Hochschule Mannheim, Paul-Wittsack-Str. 10, 68163 Mannheim, 0621 292 6911,
b.zachmann@hs-mannheim.de, www.hs-mannheim.de

Kurzfassung:

Der Industriesektor nimmt aufgrund seiner hohen Stromnachfrage eine zentrale Rolle für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende ein. Maßnahmen der industriellen Nachfrageflexibilität sind hierbei ein essentieller Baustein im zukünftigen Stromsystem aus volatilen Erzeugern. Während die Energiewende das Ziel einer CO₂-Reduzierung verfolgt, liegt der Fokus bisheriger Potentialanalysen zu industrieller Nachfrageflexibilität auf energetischen Größen zu Leistung und Arbeit. In den vorliegenden Forschungsarbeiten wird das CO₂-Vermeidungspotential industrieller Flexibilitätsmaßnahmen ausgehend von gegebenen technischen Potentialgrößen anhand einer geeigneten Methodik ermittelt. Die CO₂-Reduzierung industrieller Flexibilitätsmaßnahmen ergibt sich dabei aus der Verschiebung von Arbeit aus Zeiträumen einer CO₂-intensiven Stromerzeugung in Zeiträume niedriger spezifischer CO₂-Emissionen.

Ausgehend von einer Potentialerhebung zu insgesamt 36 Flexibilitätsmaßnahmen aus 20 Branchen im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie wurde mit Hilfe einer ¼-stündlichen Modellierung möglicher CO₂-Einsparungen ein **CO₂-Vermeidungspotential** industrieller Nachfrageflexibilität für den gegenwärtigen Strommix in Höhe von **ca. 700.000 t CO₂** ermittelt. Unter Betrachtung zukünftiger Strommix-Szenarien steigt das CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität bis zum Jahr 2030 zunächst an. Bis zum Jahr 2050 ist dieses hingegen moderat rückläufig. Erst bei einer abgeschlossenen Dekarbonisierung der Stromerzeugung ist ein Einbruch des CO₂-Vermeidungspotentials zu beobachten. Als wesentliche Ursache des auch zukünftig stabilen CO₂-Vermeidungspotentials industrieller Nachfrageflexibilität wird eine zunehmende Bedeutung von Emissionsspitzen aufgrund verbleibender fossiler Kraftwerke identifiziert. Es liegt daher nahe, dass insbesondere Lastverzicht (industrieller) Flexibilitätsmaßnahmen zur CO₂-Reduzierung im zukünftigen Energiesystem eine wichtige Rolle zuteilwird.

Keywords: Nachfrageflexibilität, CO₂-Vermeidung, Industrie, Demand-Side-Management, Demand-Response

¹ Jungautor

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Mit dem Fortschritt der Energiewende stellt der kontinuierlich steigende Anteil Erneuerbarer Energien die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts zwischen Erzeugung und Verbrauch im Stromsystem zunehmend vor Herausforderungen. Während die Erzeugung im bisherigen System an die vorliegende Last angepasst wurde (*verbrauchsorientierte Erzeugung*), hat im zukünftigen Energiesystem die Last vermehrt einem volatilen Erzeugungsangebot zu folgen (*erzeugungsorientierter Verbrauch*). Hierfür bietet sich unter anderem eine Beeinflussung des Verbrauchs (*Nachfrageflexibilität*) mittels tariflicher Anreize (*Demand-Response*) oder aktiver Steuerungssignale (*Demand-Side-Management*) an. [1] Der Industriesektor nimmt dabei aufgrund seines hohen Strombedarfs durch stromintensive Prozesse eine zentrale Rolle in der erfolgreichen Gestaltung der Energiewende ein. Industrielle Nachfrageflexibilität kann im Vergleich zu anderen Flexibilitätsoptionen eine kostengünstige Alternative darstellen, welche gleichzeitig teilnehmenden Unternehmen durch verminderte Strombezugskosten zusätzliche Erlösmöglichkeiten eröffnet. [2]

Maßnahmen der industriellen Nachfrageflexibilität sind folglich ein essentieller Baustein im zukünftigen Stromsystem aus volatilen Erzeugern. Während sich der Emissionsausstoß gemessen in $\text{CO}_{2\text{eq}}^2$ dabei als wesentliche Erfolgsgröße der Energiewende etabliert hat, stehen in erfolgten Potentialanalysen zu industrieller Nachfrageflexibilität traditionell vor allem energetische Größen für Leistung und Arbeit (W bzw. Wh) im Zentrum der Betrachtungen [3]. Im Gegensatz zu klassischen Maßnahmen der Energiewende, wie beispielsweise dem Ausbau Erneuerbarer Energien, werden Emissionen dabei jedoch nicht *direkt* durch die Bereitstellung zusätzlicher Erzeugungskapazitäten reduziert, sondern bewirken eine *indirekte* CO_2 -Reduzierung durch eine verbesserte Ausnutzung vorhandener Erzeugungskapazitäten. Eine CO_2 -Reduzierung ergibt sich hierbei aus einer intensiveren Nutzung emissionsarmer Erzeugungstechnologien, durch welche wiederum Stromerzeugung emissionsintensiver Erzeugungstechnologien vermieden wird.

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeiten ist es, das CO_2 -Vermeidungspotential industrieller Flexibilitätsmaßnahmen ausgehend von gegebenen technischen Potentialgrößen anhand einer geeigneten Methodik zu ermitteln und somit vergleichbar abzuschätzen.

2 Methodische Vorgehensweise

Im Folgenden wird die generelle methodische Vorgehensweise skizziert, welche im Anschluss in den Kapiteln 2.1 und 2.2 detailliert dargestellt wird.

Im Rahmen der dargestellten Arbeiten wird untersucht, welche CO_2 -Emissionen durch industrielle Flexibilitätsmaßnahmen vermieden werden können. Als Ausgangsbasis dienen Daten aus der Potentialerhebung industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen, welche im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie durchgeführt [3] und um neue Erkenntnisse aus aktuellen Forschungsarbeiten ergänzt wurden. Des Weiteren werden die CO_2 -Emissionen der deutschen Stromerzeugung für den Status-quo auf ¼-stündlicher Ebene ermittelt. Auf Basis der ¼-stündlichen historischen Nettostromerzeugung aus [4] werden in Anlehnung an [5] die

² Nachfolgend vereinfacht als CO_2 statt $\text{CO}_{2\text{eq}}$ bezeichnet

Emissionen des Strommix über Emissionsfaktoren der einzelnen Erzeugungstechnologien berechnet. Die Emissionsvermeidung industrieller Flexibilitätsmaßnahmen ergibt sich schließlich aus der Verschiebung von Arbeit aus Zeiträumen mit hohen spezifischen Emissionen in Zeiträume mit niedrigen spezifischen Emissionen. Die mögliche CO₂-Vermeidung der jeweils betrachteten Flexibilitätsmaßnahme wird für jeden beliebigen Zeitpunkt (d.h. für jede ¼-Stunde) ermittelt.

Zur Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen aus den Einzelmaßnahmen werden Blöcke mit der Länge eines Abrufzyklus festgelegt, wobei jeweils die höchstmögliche CO₂-Vermeidung angesetzt wird. Das jährliche CO₂-Vermeidungspotential ergibt sich schließlich mit der Abrufhäufigkeit k aus der Summe der k größten Werte der Einzelblöcke. *Abbildung 1* veranschaulicht zusammengefasst die methodische Vorgehensweise:

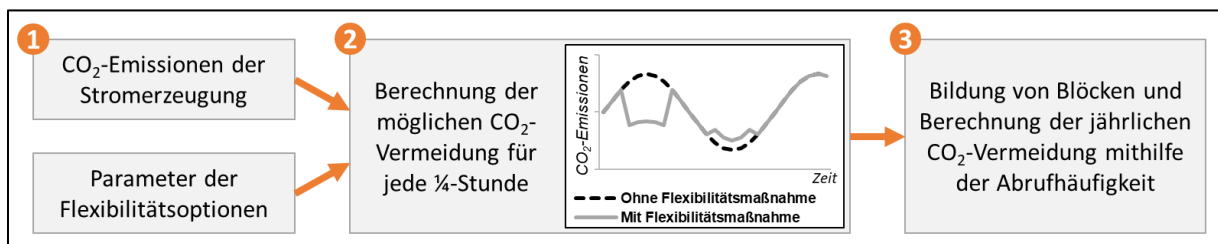


Abbildung 1: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise zur Abschätzung des jährlichen CO₂-Vermeidungspotentials

Zur Abschätzung des künftigen CO₂-Vermeidungspotentials werden im Anschluss Strommix-Szenarien auf Basis ausgewählter Studien für die Stützjahre 2030 und 2050 festgelegt und mithilfe eines vereinfachten Stromerzeugungsmodells auf eine ¼-stündliche Ebene heruntergebrochen. Die Berechnung des CO₂-Vermeidungspotentials erfolgt analog für alle betrachteten Szenarien.

2.1 Berechnungsmethode der CO₂-Vermeidung einzelner Zeitpunkte

Die Emissionsvermeidung industrieller Flexibilitätsmaßnahmen ergibt sich aus der Verschiebung von Arbeit aus Zeiträumen mit hohen spezifischen Emissionen (geringer Anteil Erneuerbarer Energien) in Zeiträume mit niedrigen spezifischen Emissionen (hoher Anteil Erneuerbarer Energien). Die verschobene Arbeit muss dabei aus prozesstechnischen oder wirtschaftlichen Gründen zu einem unbestimmten Zeitpunkt ausgeglichen werden. Für den Ausgleich der verschobenen Arbeit werden auf Basis der Annahme, dass sich die Emissionswerte bei vielen Abrufen und Einsatzstunden dem Jahresmittel annähern, die mittleren spezifischen Emissionen der Stromerzeugung angesetzt. Die mittleren spezifischen Emissionen werden aus dem Quotienten der jährlichen CO₂-Emissionen und der jährlichen Stromerzeugung errechnet. Die mögliche CO₂-Vermeidung einer Flexibilitätsmaßnahme mit der Abrufdauer n zum Zeitpunkt i lässt sich dementsprechend wie in *Formel (1)* dargestellt berechnen:

$$CO_2 \text{ Vermeidung}_i = \sum_i^{i+n} \text{Laständerung}_i * (-\text{spez. Emissionen}_i + \text{mittlere spez. Emissionen})$$

Formel (1)

Mit Hilfe dieser zentralen Formel lässt sich nun die mögliche CO₂-Vermeidung einer Flexibilitätsoption für jeden beliebigen Zeitpunkt eines Jahres berechnen. Die Berechnungen erfolgen dabei in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten. Eine geringere Auflösung (z.B. Stunden) ist für einige untersuchte Flexibilitätsoptionen nicht ausreichend, eine Berechnung in höherer Auflösung (z.B. fünf Minuten) wiederum ist aufgrund der vorherrschenden Datenlage mit einem angemessenen Aufwand nicht umsetzbar.

In einem ersten Schritt werden zur Beschreibung der verschobenen Arbeit ¼-stündliche Zeitreihen aus Leistungsänderung (in kW) und Abrufdauer (in h) erstellt. Mit Hilfe einer ebenfalls in ¼-stündlicher Auflösung vorliegenden Zeitreihe der spezifischen Emissionen der Stromerzeugung kann unter Verwendung von *Formel (1)* im Anschluss die mögliche CO₂-Vermeidung beim Einsatz der Flexibilitätsmaßnahme zum jeweils betrachteten Zeitpunkt errechnet werden.

2.2 Jährliches CO₂-Vermeidungspotential und Aggregation der Ergebnisse

Auf Basis der beschriebenen Berechnungsmethode wird für jede ¼-Stunde des Jahres die mögliche CO₂-Vermeidung mit Hilfe von *Formel (1)* ermittelt. Im Ergebnis liegt eine ¼-stündliche Zeitreihe der möglichen CO₂-Vermeidung vor. *Abbildung 2* zeigt dies beispielhaft und auszugsweise für den *Lastverzicht* in Kalenderwoche 36 (2019). Auf Basis dieser Zeitreihe soll nun mithilfe der jährlichen Abrufhäufigkeit k einer Flexibilitätsmaßnahme das jährliche CO₂-Vermeidungspotential bestimmt werden. Bei einer Bestimmung der k größten Werte fällt allerdings auf, dass sich eine Vielzahl dieser Werte um einen Hochpunkt und damit im Zeitbereich desselben Abrufzyklus bewegen (vgl. *Abb. 2* Block E). Ein Abrufzyklus setzt sich hierbei aus der Abrufdauer sowie einer prozesstechnisch bedingten Nachholzeit direkt im Anschluss an den Abruf zusammen. Ein erneuter Abruf der Flexibilitätsmaßnahme ist erst nach Beendigung des vorherigen Abrufzyklus möglich. Zur Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen werden daher Blöcke mit der Länge eines Abrufzyklus aus Abrufdauer und Nachholzeit eingeführt. Für jeden Block wird dabei jeweils der höchstmögliche CO₂-Vermeidungswert angesetzt.

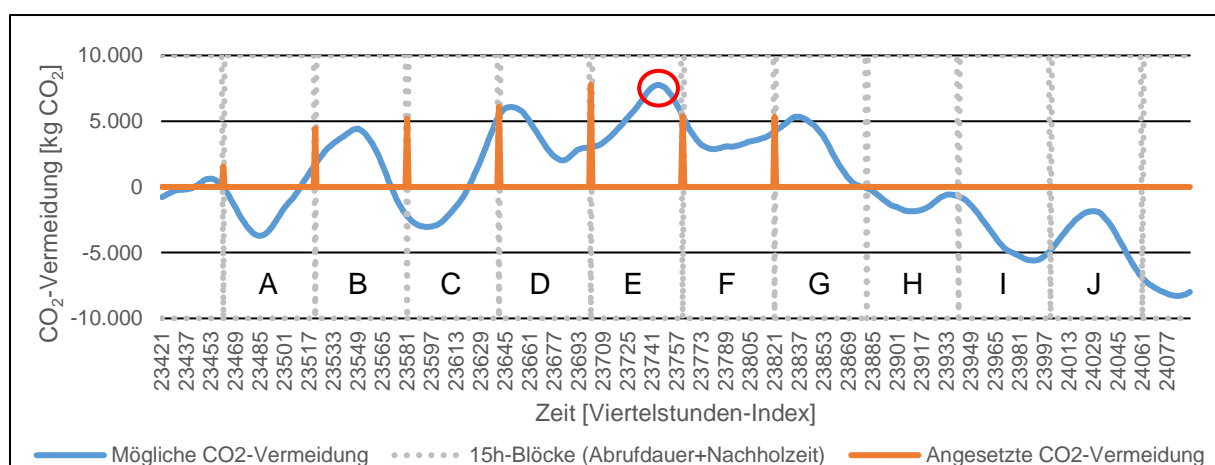


Abbildung 2: CO₂-Vermeidung des „Beispiel-Prozess“ bei Lasterhöhung im zeitlichen Verlauf (Auszug)

Durch die Bildung von Blöcken können Fehler aus zeitlichen Überschneidungen von Abrufzyklen dabei zwar deutlich reduziert, jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Insbesondere in Fällen, in welchen sich lokale Maxima in der Nähe von Block-Grenzen

befinden, ist eine Überschneidung der Abrufzyklen dabei wahrscheinlich (z.B. Abb. 2 Block C/ Block D). Durch die Ermittlung einer mathematisch optimalen Einsatzplanung könnten diese Fehler aus Überschneidungen vollständig beseitigt werden. Da die Entwicklung eines Optimierungsmodells zur Ermittlung der optimalen Einsatzplanung in Hinblick auf eine maximale CO₂-Vermeidung allerdings mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden wäre, wird diese Ungenauigkeit für die weiteren Betrachtungen in Kauf genommen.

Das jährliche CO₂-Vermeidungspotential ergibt sich schließlich aus den k größten Werten der angesetzten CO₂-Vermeidung der einzelnen Blöcke. Für Fälle, in denen für Lasterhöhung und Lastverzicht Abrufzyklen in identischer Länge vorliegen, wird darüber hinaus die mögliche CO₂-Vermeidung für eine *Kombination* aus Lastverzicht und Lasterhöhung untersucht. Für jeden Block wird hierbei jeweils das Maximum der zuvor ermittelten angesetzten CO₂-Vermeidung aus *Lastverzicht* und *Lasterhöhung* gebildet und im Anschluss die k größten Werte dieser *Kombination* bestimmt. Für den Fall von Abrufzyklen mit unterschiedlicher Länge wird auf die Untersuchung einer *Kombination* aus Lastverzicht und Lasterhöhung verzichtet. Zur Aggregation wird aufgrund der Tatsache, dass *Lastverzicht* und *Lasterhöhung* nicht zum selben Zeitpunkt zum Einsatz kommen können, jeweils das Maximum der jährlichen CO₂-Vermeidung aus *Lastverzicht* und *Lasterhöhung* herangezogen. Das Gesamtergebnis der jährlichen CO₂-Vermeidung entspricht schließlich dem maximalen Wert der jährlichen Ergebnisse aus *Lastverzicht*, *Lasterhöhung* sowie der *Kombination* aus Lastverzicht und Lasterhöhung.

Zur Veranschaulichung der Berechnungsmethode des CO₂-Vermeidungspotentials wird eine fiktive Flexibilitätsmaßnahme („*Beispiel-Prozess*“) eingeführt. Die angenommenen Parameter dieses Beispiel-Prozesses sind vereinfacht in *Tabelle 1* dargestellt. Zur beispielhaften Darstellung der Berechnungen werden die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung des Jahres 2019 herangezogen, welche in Kapitel 3.1 genauer beschrieben werden.

Beispiel-Prozess	Lastverzicht	Lasterhöhung
Leistungsänderung [kW]	4.000	6.000
Abrufdauer [h]	10	10
Nachholzeit [h]	5	5
Abrufhäufigkeit [1/a]	365	365

Tabelle 1: Vereinfachte Parameter der fiktiven Flexibilitätsmaßnahme „Beispiel-Prozess“

Für den hier betrachteten *Beispiel-Prozess* ergibt sich schließlich das in *Tabelle 2* dargestellte CO₂-Vermeidungspotential. Das Gesamtergebnis ergibt sich hierbei aus der möglichen CO₂-Vermeidung im Fall einer *Kombination* von Lastverzicht und Lasterhöhung als Maximalwert der untersuchten Anwendungsfälle.

Beispiel-Prozess	Lastverzicht	Lasterhöhung	Kombination	Gesamt-Ergebnis
CO ₂ -Vermeidungspotential [kg CO ₂]	2.405.409,67	1.649.252,34	3.000.659,26	3.000.659,26

Tabelle 2: Vereinfachte Aggregation des jährlichen CO₂-Vermeidungspotentials im „Beispiel-Prozess“

3 Datenbasis zur Berechnung des CO₂-Vermeidungspotentials

Mit Hilfe der in Kapitel 2 beschriebenen Berechnungsmethodik kann nun auf Basis einer ¼-stündlichen Zeitreihe der spezifischen Emissionen sowie der Parameter industrieller Flexibilitätsmaßnahmen (*Laständerung, Abrufdauer, Nachholzeit* sowie *Abrufhäufigkeit*) das CO₂-Vermeidungspotential industrieller Flexibilitätsmaßnahmen berechnet werden. Die Ergebnisse hängen folglich wesentlich von hierzu getroffenen Annahmen ab. Im Folgenden wird die Datenbasis dieser Eingangsdaten daher detailliert dargestellt.

3.1 Unterjährige spezifische CO₂-Emissionen des Status-quo (2019)

Zur Darstellung des gegenwärtigen CO₂-Vermeidungspotentials wird das Jahr 2019 gewählt. Da die Energieversorgung im Jahr 2020 wesentlich von (kurzfristigen) Auswirkungen der Covid-19 Pandemie geprägt wurde [6], wird auf eine Betrachtung dieses Jahres als Referenz-Jahr trotz aktuellerer Daten verzichtet.

Zur Ableitung der spezifischen Emissionen der Stromerzeugung des Jahres 2019 wird zunächst die Stromerzeugung einzelner Erzeugungstechnologien ermittelt. Als Ausgangsbasis hierfür werden historische Erzeugungsdaten der ENTSO-E Transparenzplattform [4] herangezogen, welche die Nettostromerzeugung aller Kraftwerke einer elektrischen Leistung ab 100 MW abbildet [7]. Es wird angenommen, dass Kraftwerke < 100 MW überwiegend zur (industriellen) Eigenerzeugung eingesetzt werden. Aufgrund der geringen Korrelation dieser Kraftwerke zum Strommarkt (ca. 70 % hiervon sind KWK-Anlagen) wird die fehlende Stromerzeugungsmenge (ca. 9 % der Bruttostromerzeugung) in den weiteren Betrachtungen nicht berücksichtigt [8]. Zur Abbildung des Kraftwerkseigenverbrauchs werden darüber hinaus Annahmen zu Eigenverbrauchsfaktoren (eigene Annahmen in Anlehnung an die Bruttostromerzeugung aus [9]) getroffen und in den Erzeugungsdaten entsprechend berücksichtigt. Gemäß der vorliegenden Daten wird darüber hinaus das Außenhandelsaldo der Stromerzeugung vollständig vernachlässigt, es werden folglich die in Deutschland verursachten CO₂-Emissionen dargestellt.

Auf Basis von Emissionsfaktoren der einzelnen Erzeugungstechnologien können schließlich aus den Stromerzeugungsdaten die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung für jede ¼-Stunde ermittelt werden. Die gewählten Emissionsfaktoren in Anlehnung an [5] und [10] bilden hierbei nicht nur direkte (d.h. Emissionen direkt aus der Stromerzeugung), sondern auch vorgelagerte Emissionen der Stromerzeugung ab (z.B. zum Abbau und Transport von Steinkohle). Dementsprechend werden nicht nur für konventionelle, sondern auch für erneuerbare Erzeugungstechnologien Emission angesetzt (z.B. für die Herstellung von PV-Modulen). Eine Übersicht der angenommenen Emissionsfaktoren ist in *Tabelle 3* dargestellt.

Energieträger	Emissionsfaktor	Energieträger	Emissionsfaktor
Biomasse	71 g/kWh	Kernenergie	11 g/kWh
Braunkohle	1.100 g/kWh	Andere	247 g/kWh
Erdgas	550 g/kWh	Andere Erneuerbare	27 g/kWh
Steinkohle	1.000 g/kWh	PV	43 g/kWh
Erdöl	790 g/kWh	Abfall	690 g/kWh
Geothermie	45 g/kWh	Wind Offshore	9 g/kWh
Pumpspeicher	34 g/kWh	Wind Onshore	8 g/kWh
Laufwasser	4 g/kWh	Wasserstoff	63 – 224 g/kWh ³
Stauseewasser	9 g/kWh		

Tabelle 3: Angenommene Emissionsfaktoren einzelner Erzeugungstechnologien [5, 10]

In Summe werden so für das Jahr 2019 CO₂-Emissionen der Stromerzeugung von insgesamt 221 Mio. t CO₂ ermittelt. Das Umweltbundesamt (UBA) gibt für das Jahr 2019 direkte CO₂-Emissionen der deutschen Bruttostromerzeugung in Höhe von 222 Mio. t CO₂ an [11]. In dem zum Vergleich herangezogenen Wert des UBAs sind hierbei abweichend zu dem zuvor beschriebenen Ansatz einerseits Emissionen aus industrieller Eigenversorgung berücksichtigt, andererseits keine vorgelagerten Emissionen enthalten. Aufgrund gegenläufiger Effekte dieser beiden abweichenden Ansätze erscheinen die ermittelten CO₂-Emissionen eine plausible und belastbare Datengrundlage für die weiteren Berechnungen darzustellen.

Mithilfe von *Formel (2)* können schließlich aus den ermittelten CO₂-Emissionen der Stromerzeugung sowie der Stromerzeugung selbst die spezifischen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung für jede Viertelstunde *i* bestimmt werden.

$$\text{Spezifische Emissionen}_i = \frac{\text{Emissionen der Stromerzeugung}_i}{\text{Stromerzeugung}_i}$$

Formel (2)

3.2 Unterjährige spezifische CO₂-Emissionen zukünftiger Strommix-Szenarien

Um darüber hinaus eine Aussage zum CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität im zukünftigen Energiesystem treffen zu können, werden zusätzlich verschiedene Strommix-Szenarien betrachtet. Hierfür werden zunächst auf Basis vorliegender Studien relevante Strommix-Szenarien für die Stützjahre 2030 und 2050 identifiziert, für welche im Anschluss die unterjährigen spezifischen CO₂-Emissionen über eine vereinfachte Stromerzeugungsmodellierung abgebildet werden.

3.2.1 Szenario-Rahmen

Für die Stützjahre 2030 und 2050 wurden insgesamt drei relevante Strommix-Szenarien aus einschlägigen Untersuchungen in [4], [12] und [13] identifiziert. Im Jahr 2050 werden dabei die Szenarien *80%-Pfad* und *95%-Pfad* unterschieden, wobei 80 % bzw. 95 % jeweils die Treibhausgasminde rung gegenüber 1990 im Gesamtsystem bezeichnen. Für das Jahr 2030

³ Eigene Annahme; Abbildung über den jeweiligen Emissionsfaktor der Stromerzeugung in Deutschland bei angenommenem Gesamtwirkungsgrad einer Rückverstromung von 35,9 %

wird hingegen lediglich ein Strommix-Szenario eines unter aktuellen Maßnahmen wahrscheinlichen Referenzpfades betrachtet. Aufgrund des verhältnismäßig kurzen Zeithorizonts wird auf eine weitere Differenzierung verzichtet. Die Zusammensetzung der Bruttostromerzeugung der einzelnen Szenarien wird in *Abbildung 3* gegenübergestellt.

Die gewählten Szenarien bilden dabei das gegenwärtige Spannungsfeld ambitionierterer politischer Zielsetzungen bei einer gleichzeitig zu erwartenden deutlichen Zielverfehlungen unter Berücksichtigung aktueller Maßnahmen ab. So wurden einerseits im Juni 2021 ambitioniertere Klimaschutzvorgaben festgelegt, welche u.a. eine Treibhausgasreduzierung bis 2030 von 65 % (zuvor 55 %) ggü. 1990 sowie Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 (zuvor 2050) vorsehen [14]. Andererseits kommt ein aktueller Bericht des Bundesumweltministeriums (Stand August 2021) hingegen zu dem Schluss, dass bis zum Jahr 2030 (unter Berücksichtigung der bis August 2020 beschlossenen Maßnahmen) lediglich eine Emissionsreduzierung um 49 % ggü. 1990 und damit eine deutliche Zielverfehlung zu erwarten ist, auch für das Jahr 2040 würden die Klimaziele demnach deutlich verfehlt [15].

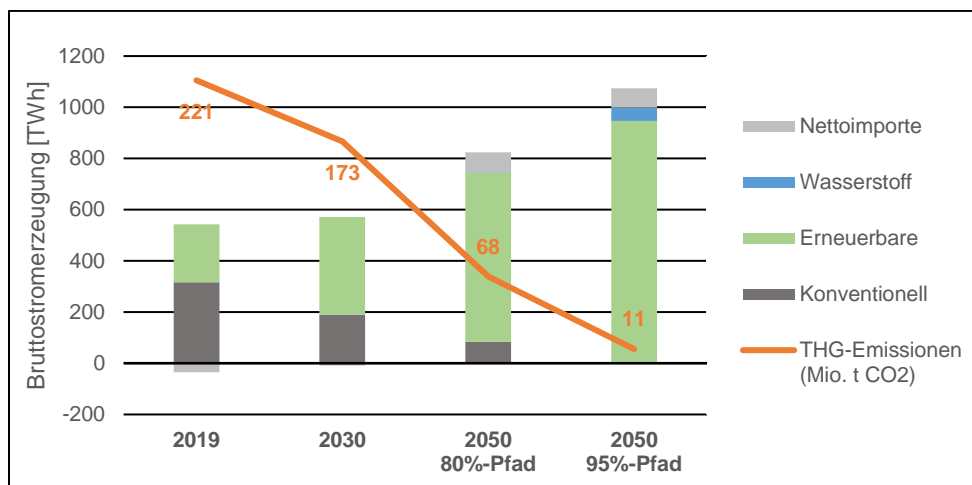


Abbildung 3: Bruttostromerzeugung der betrachteten Strommix-Szenarien⁴ [4, 12, 13]

Der Strommix des Jahres **2030** stützt sich auf Forschungsergebnisse, welche im Rahmen des Kopernikus-Projekts ENSURE unter Beteiligung von Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Öko-Institut, Deutsche Umwelthilfe, RWTH Aachen sowie des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (ewi) mit Fokus auf das Energiesystem im Jahr 2030 erarbeitet wurden. Das herangezogene Szenario *Referenzentwicklung* beschreibt dabei, in Anlehnung an den Netzentwicklungsplan 2030, einen unter heute vorliegenden Voraussetzungen wahrscheinlichen Entwicklungspfad. Die ehemaligen Klimaschutzziele der Bundesregierung, welche eine Treibhausgasreduzierung bis 2030 von 55 % ggü. 1990 vorsahen, werden hierbei überwiegend erreicht, im Verkehrssektor allerdings verfehlt. Im Gesamtsystem wird das ehemalige Klimaschutzziel 2030 daher mit einer Treibhausgasreduzierung von 53 % ggü. 1990 leicht verfehlt. Im Stromsektor steigt der Anteil Erneuerbarer Energien bis zum Jahr 2030 entsprechend der politischen Zielsetzung bis auf 65 % an. Die von der Kommission Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung („Kohlekommission“) vorgeschlagene installierte Leistung an Braun- und Steinkohle (17 GW) wird mit 19,1 GW hingegen leicht überschritten. [12]

⁴ 2019 ohne industrielle Eigenerzeugung

Die Szenarien **80%-Pfad** sowie **95%-Pfad** für das Jahr **2050** stützen sich auf Untersuchungen des Forschungszentrums Jülich (*Szenario 80* bzw. *Szenario 95*), in welchem unter Verwendung verschiedener Energiemarktmodelle kosteneffiziente Treibhausgasminierungsstrategien erarbeitet wurden. Neben einer entsprechenden Treibhausgasminierung wurden für die Ermittlung kostenoptimaler Reduktionsstrategien dabei als Vorgaben lediglich Kernenergie- und Kohleausstieg sowie der Ausschluss einer großtechnischen CO₂-Speicherung (CCS) im Voraus festgelegt. Im *Szenario 80* steigt der Anteil Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 bis auf ca. 90 % an, die übrige Stromerzeugung wird überwiegend durch Erdgas bereitgestellt. Im *Szenario 95* erhöht sich der Anteil Erneuerbarer Energien im Jahr 2050 bis auf 94 %, die übrige Stromerzeugung erfolgt hier zum größten Teil auf Basis von Wasserstoff. [13]

3.2.2 Modellierung unterjähriger spezifischer Emissionen

Um auch für zukünftige Strommix-Szenarien belastbare und vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, ist eine analoge Berechnung auf Basis unterjähriger spezifischer Emissionswerte erforderlich. Zur ¼-stündlichen Abbildung der Szenarien wurde daher ein stark vereinfachtes Stromerzeugungsmodell entwickelt, anhand dessen die unterjährige Stromerzeugung der Erzeugungstechnologien nachgebildet werden soll.

Das entwickelte Stromerzeugungsmodell setzt sich dabei im Wesentlichen aus folgenden Eingangsdaten zusammen:

- Jährliche Stromerzeugung, Stromnachfrage und Erzeugungskapazitäten [12, 13]
- Historische unterjährige Stromnachfrage [4]
- Historische unterjährige Erzeugungsdaten [4]
- Merit-Order-Tool 2021 des ewi [16] (für das Backtesting: Merit-Order-Tool 2020 [17])

Zunächst wird bestimmt, welche flexibel betriebenen Erzeugungstechnologien optimiert werden sollen. Nicht optimiert werden hierbei u.a. Erzeugungstechnologien, deren Anteil an der gesamten Stromerzeugung jeweils < 1 % beträgt. Hinzu kommen aufgrund ihrer geringer Grenzkosten volatile Erneuerbare Energien sowie im Jahr 2030 aufgrund regulatorischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen Biomasse und Geothermie. Die Stromerzeugung folgender Erzeugungstechnologien wird folglich jeweils im Stromerzeugungsmodell ermittelt:

- Modellierung 2030: Braunkohle, Steinkohle, Erdgas
- Modellierung 2050: Erdgas, Wasserstoff, Biomasse

Nicht modellierte Erzeugungstechnologien werden entsprechend ihres normierten historischen Erzeugungsprofils abgebildet. Analog hierzu wird die unterjährige Nachfrage anhand des historischen Nachfrageprofils bestimmt [4]. Um vergleichbare sowie konsistente Ergebnisse zu erhalten, werden hierfür jeweils die historischen Daten des Jahres 2019 herangezogen. Aus der Differenz der unterjährigen Nachfrage sowie der nicht-optimierten Erzeugung wird im Anschluss die *Restlast* ermittelt, welche durch die optimierten Erzeugungstechnologien gedeckt werden muss. Mithilfe des Merit-Order-Tools des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität zu Köln (ewi) [16] wird im Anschluss die Merit-Order für die jeweils getroffenen Annahmen ermittelt. Das Merit-Order-Tool wird hierfür um die im jeweiligen Strommix-Szenario vorliegenden Rahmenbedingungen (z.B. Kraftwerkspark, Commodities) sowie die getroffenen Optimierungsentscheidungen (z.B.

Ausschluss nicht-optimierte Erzeugungstechnologien) modifiziert. Auf Basis der kumulierten Leistung dieser modifizierten Merit-Order kann jeder *Restlast* der entsprechende Leistungswert der einzelnen optimierten Erzeugungstechnologien zugeordnet werden. Zur Berücksichtigung zeitlicher Einschränkungen (z.B. Leistungsänderungsgeschwindigkeit) wird zusätzlich ein *Must-run*-Element eingeführt, um eine zu flexible Abbildung der optimierten Technologien zu vermeiden. Bei Angabe eines *Must-Run*-Wertes (z.B. 10 %) wird hierbei ein Teil der vorhandenen Erzeugungsleistung als Grundlast zu jedem Zeitpunkt des Jahres eingesetzt, die verfügbare Leistung aller Kraftwerke innerhalb der Merit-Order reduziert sich entsprechend. Das *Must-run*-Element wird bei Bedarf außerdem zur Feinabstimmung des Modells herangezogen, um die in den Strommix-Szenarien vorgegebenen jährlichen Stromerzeugungsdaten möglichst genau nachbilden zu können.

Aus der so abgebildeten ¼-stündlichen Stromerzeugung der einzelnen Erzeugungstechnologien werden schließlich mithilfe von Emissionsfaktoren analog zum in Kapitel 3.1 beschriebenen Vorgehen die unterjährigen spezifischen CO₂-Emissionen der Stromerzeugung abgeleitet. *Abbildung 4* zeigt auszugsweise für den Monat Januar der modellierten Jahre den Verlauf der so ermittelten spezifischen CO₂-Emissionen.

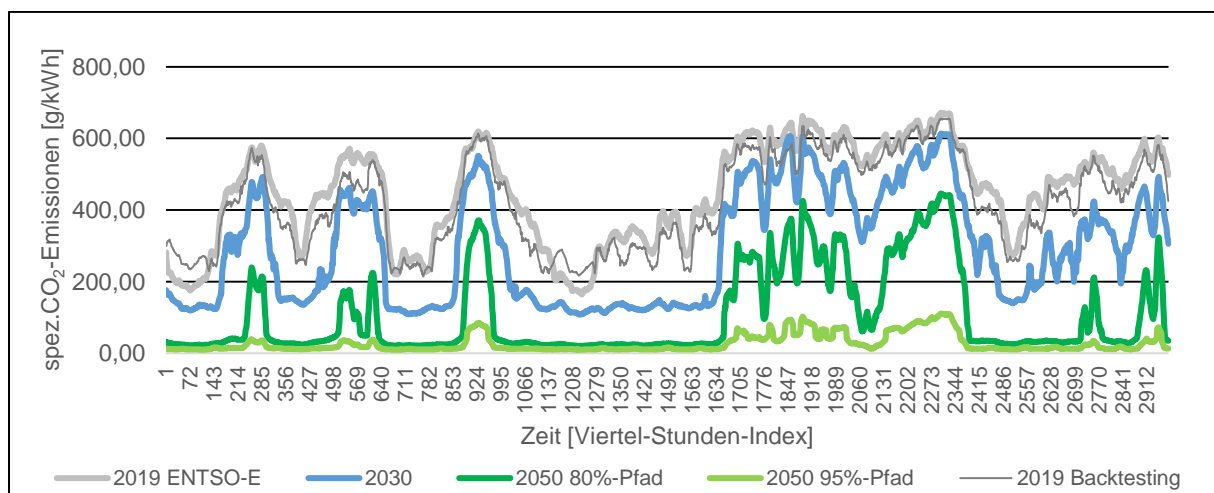


Abbildung 4: Unterjährige spezifische CO₂-Emissionen der untersuchten Strommix-Szenarien (Auszug)

Zur Überprüfung der Ergebnisse auf mögliche Modelleffekte wurde darüber hinaus ein Backtesting anhand der Merit Order [17] und jährlichen Stromerzeugungsdaten [4] des Jahres 2019 durchgeführt. Die Ergebnisse des Backtestings (siehe die Verläufe „2019 Backtesting“ und „2019 ENTSO-E“ in *Abb. 4*) bilden trotz vereinzelter Abweichungen insbesondere den für die weiteren Betrachtungen relevanten zeitlichen Verlauf der spezifischen CO₂-Emissionen gut ab. Insgesamt stellen die Modellergebnisse daher eine hinreichend genaue Grundlage für die weiteren Untersuchungen dar.

Bei genauerer Betrachtung der zukünftigen spezifischen Emissionswerte ist zu erkennen, dass die Bedeutung von Emissionsspitzen bei einem steigenden Anteil Erneuerbarer Energien zunimmt. Gleichzeitig verschieben sich die mittleren Emissionen zunehmend in den unteren Wertebereich der spezifischen Emissionen, wodurch die Bedeutung von Emissionstälern bei einem steigenden Anteil Erneuerbarer Energien abnimmt. Bei einem insgesamt größeren Angebot Erneuerbarer Energien im Stromsystem werden niedrige spezifische Emissionen folglich zunehmend zum Normalzustand, der Effekt von Emissionstälern (bei hohem Anteil Erneuerbarer Energien) ist weniger ausschlaggebend und wird zunehmend durch den

relevanter werdenden Effekt von Emissionsspitzen in Zeiten eines niedrigen Anteils Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung verdrängt.

3.3 Datenbasis industrieller Nachfrageflexibilität

Als Grundlage für die weiteren Berechnungen werden im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie erhobene Potentiale industrieller Nachfrageflexibilität herangezogen. Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie wurden bereits bis zum Jahr 2019 Flexibilitätspotentiale in insgesamt 15 Branchen untersucht [3]. Diese Potentialanalysen werden seitdem in weiteren Untersuchungen präzisiert und um zusätzliche Branchen und Prozesse erweitert. Als Datengrundlage für die folgenden Betrachtungen dient ein um neue Erkenntnisse (Stand Juli 2021) aktualisierter Datensatz, welcher insgesamt 36 unterschiedliche industrielle Flexibilitätsmaßnahmen aus insgesamt 20 Branchen abbildet.

Die vorliegenden Potentiale werden dabei nach verschiedenen Ausprägungen differenziert:

Ausprägungen betrachteter Anwendungsfälle industrieller Flexibilitätsmaßnahmen	
Lasterhöhung	Lastverzicht
(heute bereits verfügbares) Potential	(zukünftige) Perspektive
Maximale Laständerung	Maximale Abrufdauer

Tabelle 4: Ausprägungen betrachteter Anwendungsfälle industrieller Flexibilitätsmaßnahmen

Die Anwendungsfälle *Maximale Laständerung* sowie *Maximale Abrufdauer* beschreiben hierbei jeweils unterschiedliche Flexibilisierungsansätze. In den jeweiligen Anwendungsfällen wird in der Ausgestaltung der Flexibilitätsmaßnahme der Fokus dementsprechend auf eine möglichst hohe Leistungsänderung bzw. eine möglichst lange Abrufdauer gelegt.⁵

Für jede untersuchte Flexibilitätsmaßnahme ergeben sich folglich bis zu acht Anwendungsfälle. Für die untersuchten Flexibilitätsmaßnahmen werden sämtliche vorliegenden Anwendungsfälle zunächst einzeln betrachtet und erst im Anschluss auf ein Gesamtergebnis verdichtet. Hierbei wird jeweils der Maximalwert aus den Anwendungsfällen *Maximale Laständerung* und *Maximale Abrufdauer* herangezogen und im Anschluss analog zur jeweils im Rahmen der Potentialanalyse festgelegten individuellen Methode auf eine Gesamtsumme aus *Potential* und *Perspektive* aggregiert. Zuletzt wird schließlich als Gesamtergebnis wie in Kapitel 2.2 beschrieben der Maximalwert aus *Lasterhöhung*, *Lastverzicht* sowie (falls vorhanden) einer *Kombination* aus Lastverzicht und Lasterhöhung ermittelt.

Für den zuvor eingeführten *Beispiel-Prozess* (erweiterte Parameter s. Anhang) ergibt sich als beispielhaftes Gesamtergebnis einer Flexibilitätsoption das in *Tabelle 5* dargestellte CO₂-Vermeidungspotential (hier: Maximum aus Potential und Perspektive).

⁵ Eine detaillierte Abgrenzung der verschiedenen Ausprägungen ist für die weiteren Betrachtungen nicht direkt relevant. Für eine genaue Definition der einzelnen Ausprägungen wird auf [3] verwiesen.

Beispiel-Prozess	CO₂-Vermeidung [kg CO₂]	Potential	Perspektive	Potential & Perspektive
Lasterhöhung	Maximale Laständerung	2.004.508,06	2.405.409,67	2.405.409,67
	Maximale Abrufdauer	229.778,92	459.557,83	459.557,83
Lastverzicht	Maximale Laständerung	711.722,13	1.649.252,34	1.649.252,34
	Maximale Abrufdauer	90.909,63	188.659,68	188.659,68
Lasterhöhung				
Lasterhöhung	Maximum	2.004.508,06	2.405.409,67	2.405.409,67
Lastverzicht	Maximum	711.722,13	1.649.252,34	1.649.252,34
Kombination	Maximale Laständerung	0,00	3.000.659,26	3.000.659,26
Gesamtergebnis	Maximum	3.000.659,26		

Tabelle 5: Ausführliche Aggregation des jährlichen CO₂-Vermeidungspotentials des „Beispiel-Prozess“

Die im Rahmen von SynErgie untersuchten industriellen Flexibilitätsmaßnahmen aus 20 Branchen werden in Anlehnung an [18] zu sieben Industriezweigen zusammengefasst. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in den weiteren Ergebnissen lediglich auf die aggregierten Gesamtergebnisse der einzelnen Industriezweige weiter eingegangen.

4 CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität

Mit Hilfe der in Kapitel 2 eingeführten Berechnungsmethode kann schließlich aus den in Kapitel 3 beschriebenen unterjährigen spezifischen CO₂-Emissionen der Strommix-Szenarien und Eingangsdaten industrieller Nachfrageflexibilität das CO₂-Vermeidungspotential errechnet werden.

4.1 Ergebnisse des jährlichen CO₂-Vermeidungspotentials

Eine Übersicht des ermittelten CO₂-Vermeidungspotentials industrieller Nachfrageflexibilität in den betrachteten Industriezweigen und Strommix-Szenarien ist in *Tabelle 6* dargestellt:

<i>Jährliches CO₂-Vermeidungspotential [t CO₂]</i>	Status-quo (2019)	2030	2050 80%-Pfad	2050 95%-Pfad
Automobilindustrie	60.644,76	55.673,67	34.687,08	7.453,16
Chemieindustrie	95.303,99	130.532,39	92.198,31	19.135,19
Glaswaren, Keramik, Steine und Erden	19.638,99	25.418,87	22.001,71	4.521,17
Metallerzeugung und -bearbeitung	163.835,88	185.953,78	131.946,60	27.130,52
Nahrungsmittelindustrie	188.497,20	264.673,73	153.956,17	29.829,82
Papierindustrie	13.679,72	22.751,03	17.806,82	3.514,68

Wärme- und Kälteanwendungen	164.122,09	238.723,99	165.764,34	33.326,61
Gesamtergebnis	705.722,62	923.727,47	618.361,03	124.911,17

Tabelle 6: Jährliches CO₂-Vermeidungspotential industrieller Flexibilitätsmaßnahmen in den Strommix-Szenarien „Status-quo (2019)“, „2030“, „2050 80%-Pfad“ sowie „2050 95%-Pfad“

Unter Annahme des **gegenwärtigen Strommix (2019)** ergibt sich aus den untersuchten Flexibilitätsmaßnahmen ein jährliches CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität von ca. **700.000 t CO₂**. Die Industriezweige *Nahrungsmittelindustrie*, *Wärme- und Kälteanwendungen* sowie *Metallerzeugung und -bearbeitung* tragen hierbei zu über 70 % des ermittelten CO₂-Vermeidungspotentials bei.

Das **zukünftige CO₂-Vermeidungspotential** industrieller Nachfrageflexibilität steigt bis zum Jahr 2030 zunächst um ca. 31 % an. Von 2030 bis 2050 ist dieses allerdings rückläufig, sodass sich in den betrachteten Szenarien für das Jahr 2050 auch im Vergleich zum Status quo ein geringeres CO₂-Vermeidungspotential ergibt. Im Szenario „80%-Pfad“ reduziert sich das CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität lediglich in geringem Ausmaß um 12 % ggü. 2019. Das CO₂-Vermeidungspotential im Szenario „95%-Pfad“ hingegen vermindert sich stark um 82 % ggü. 2019.

Die Ergebnisse der einzelnen betrachteten industriellen Flexibilitätsoptionen unterscheiden sich individuell in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Parameterausprägungen. Dies spiegelt sich auch in den aggregierten Ergebnissen auf Ebene der Industriezweige wider. So ist beispielsweise im Industriezweig *Automobilindustrie* von 2019 auf 2030 trotz eines Anstiegs des Gesamtergebnisses ein rückläufiges CO₂-Vermeidungspotential zu beobachten.

4.2 Interpretation der Ergebnisse

Die Entwicklung des CO₂-Vermeidungspotentials wird im Wesentlichen von zwei gegenläufigen Effekten beeinflusst: Zum einen sind die mittleren spezifischen Emissionen in den Strommix-Szenarien rückläufig. Durch das insgesamt niedrigere Level der CO₂-Emissionen reduziert sich dementsprechend auch das CO₂-Vermeidungspotential. Basierend auf *Formel (1)* ist dabei ein linearer Zusammenhang zu erwarten. Zum anderen ist in den Strommix-Szenarien durch den Zubau an CO₂-armen Erneuerbaren Erzeugern jedoch eine zunehmende Verschiebung der mittleren spezifischen Emissionen in den unteren Rand des Wertebereichs zu beobachten. Im Fall von Lastverzicht wirkt sich diese Entwicklung (bei konstanten übrigen Rahmenbedingungen) dabei steigernd, für Lastverzicht hingegen mindernd auf das resultierende CO₂-Vermeidungspotential aus. Da sich die Berechnungen wie in Kapitel 2.2 beschrieben auf den Maximalwert aus *Lastverzicht* und *Lastserhöhung* (und ggf. die *Kombination*) beziehen, kann hieraus insgesamt ein Anstieg des CO₂-Vermeidungspotentials resultieren.

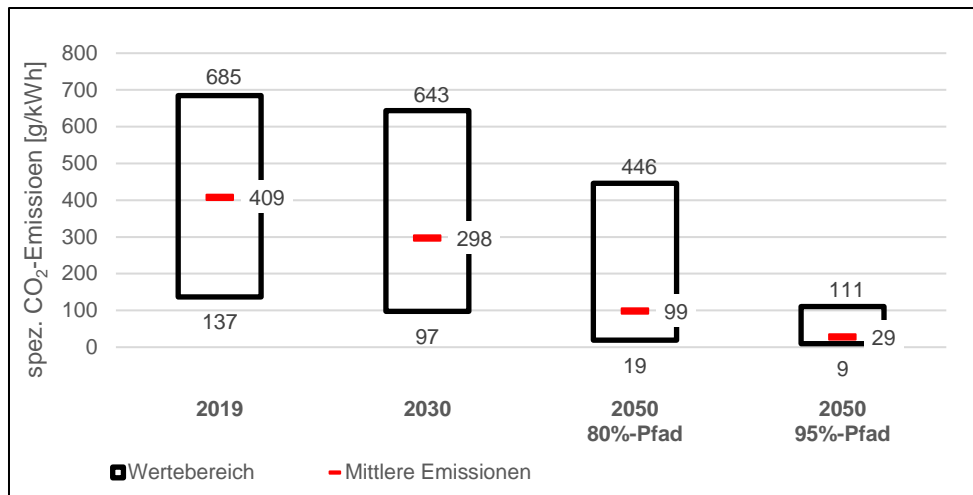


Abbildung 5: Wertebereich und Mittel der spezifischen Emissionen in den Strommix-Szenarien

Wie *Abbildung 5* zeigt reduzieren sich bis zum Jahr **2030** die spezifischen Emissionen der Stromerzeugung bereits merklich. Gleichzeitig ist allerdings eine signifikante Verschiebung der mittleren Emissionen in den unteren Wertebereich zu beobachten. Aufgrund noch in Betrieb befindlicher Stein- und Braunkohle-Kraftwerke reduzieren sich die maximalen spezifischen Emissionen dabei lediglich leicht. Der Rückgang der mittleren CO₂-Emissionen wird folglich durch eine erhöhte CO₂-Einsparung durch die Vermeidung von Emissionsspitzen (aufgrund der Verschiebung der mittleren Emissionen im Wertebereich) überkompensiert. Hierdurch ergibt sich im Jahr 2030 ein insgesamt steigendes CO₂-Vermeidungspotential.

Bis zum Jahr **2050** setzt sich sowohl der Rückgang des generellen Emissionsniveaus als auch die Verschiebung der mittleren Emissionen im Wertebereich hin zum Minimum schließlich fort. Aufgrund des abgeschlossenen Kohleausstiegs vermindert sich hierbei auch der Maximalwert der spezifischen Emissionen deutlich. Im Szenario „80%-Pfad“ befindet sich dieser aufgrund einer verbleibenden Stromerzeugung aus Erdgas dennoch auf einem verhältnismäßig hohen Niveau. Parallel hierzu ist ein starker Rückgang der mittleren Emissionen zu beobachten. Die zusätzliche CO₂-Einsparung durch Vermeidung von Emissionsspitzen kompensiert daher einen Großteil des Rückgangs der mittleren Emissionen, sodass sich das CO₂-Vermeidungspotential insgesamt lediglich moderat vermindert. Im Szenario „95%-Pfad“ ist die Defossilisierung der Stromerzeugung hingegen vollständig abgeschlossen. Emissionsspitzen resultieren vor allem aus der verhältnismäßig emissionsarmen Rückverstromung von Wasserstoff. CO₂-Einsparungen aus der Vermeidung von Emissionsspitzen wirken dem Rückgang der mittleren Emissionen daher lediglich in einem geringen Ausmaß entgegen, woraus ein deutlich vermindertes CO₂-Vermeidungspotential resultiert.

Insgesamt ist auch für sonstige (Flexibilitäts-)Maßnahmen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung bei fortschreitender Dekarbonisierung aufgrund des generell rückläufigen Niveaus der CO₂-Emissionen eine rückläufige Entwicklung zu erwarten.

4.3 Reflektion der Ergebnisse

Die dargestellten Ergebnisse wurden auf Basis nachvollziehbarer Berechnungen sowie einer belastbaren Datengrundlage ermittelt. Dennoch basieren sie auf einer Reihe von Annahmen und Vereinfachungen, welche die Ergebnisse beeinflussen können. Für eine bessere Einordnung werden im Folgenden daher die wesentlichen Annahmen und Vereinfachungen

erläutert und die hieraus entstandenen Einflüsse auf die Ergebnisse mit Hilfe von Sensitivitätsrechnungen abgeschätzt und eingeordnet.

4.3.1 Wesentliche Annahmen und Vereinfachungen

Zur Bestimmung der Berechnungsmethode sowie Ermittlung der hierfür notwendigen Eingangsdaten wurden folgende wesentliche Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- **Verzicht auf die Abbildung von Emissionen auf Kraftwerks-Ebene**

Es wird angenommen, dass die betrachteten industriellen Flexibilitätsmaßnahmen in den Strommarkt eingebunden werden. Auf eine kraftwerksscharfe Abbildung der CO₂-Emissionen wurde daher verzichtet. Stattdessen wurden die Emissionen der öffentlichen Stromerzeugung als Grundlage der Berechnungen herangezogen. In den Berechnungen werden folglich die tatsächlich anfallenden Emissionen bei Netzbezug abgebildet. Aus Berechnungen unter Annahme einer Verschiebung von Arbeit zwischen spezifischen Kraftwerken können hierbei erheblich höhere Ergebnisse des CO₂-Vermeidungspotentials resultieren.
- ❓ **Nicht-Berücksichtigung industrieller Eigenversorgung im Status-quo**

Aufgrund der geringen Korrelation der Stromerzeugung aus Kraftwerken der industriellen Eigenversorgung zum Strommarkt (ca. 70 % KWK-Anlagen) wird die entsprechende Stromerzeugungsmenge (ca. 9 % der Bruttostromerzeugung), welche im für den Status-quo vorliegenden Datensatz nicht abgebildet wurde, in den Betrachtungen nicht berücksichtigt [8]. Aufgrund der unbekanntenen zeitlichen Verteilung industrieller Eigenerzeugung ist der Effekt einer Berücksichtigung desselben auf die ermittelten Ergebnisse unklar.
- **Optimierung der Flexibilitätsmaßnahmen nach der maximalen CO₂-Einsparung**

Der Einsatz industrieller Flexibilitätsoptionen wurde in der gewählten Berechnungsmethode nach einer maximalen CO₂-Vermeidung optimiert. In der Realität kann es bei einer erlösgetriebenen Optimierung daher zu abweichenden Einsätzen industrieller Nachfrageflexibilität kommen. Hinzu kommt, dass die vorliegenden Ergebnisse auf einem *perfect-foresight*-Modell basieren. Bei steigenden Preisen von Emissionszertifikaten, beispielsweise im EU-ETS, ist künftig zwar eine zunehmende Korrelation von (hohen) Strompreisen und CO₂-Emissionen zu erwarten. Aufgrund eines erlösgetriebenen Einsatzes sowie mangels vollständiger Datentransparenz wird das dargestellte CO₂-Vermeidungspotential in der Realität voraussichtlich dennoch nicht in voller Höhe ausnutzbar sein.
- **Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen über Block-Bildung**

Zeitliche Restriktionen werden vereinfacht durch die Bildung von Blöcken mit der Länge eines Abrufzyklus abgebildet. Auf eine exakte Einsatzplanung zum Ausschluss von Überschneidungen einzelner Abrufzyklen wird aufgrund eines für die vorliegenden Betrachtungen unverhältnismäßig hohen Aufwands verzichtet. Bei Berücksichtigung einer exakten Einsatzplanung ist ein geringeres CO₂-Vermeidungspotential zu erwarten.
- **Vernachlässigung von Emissionen aus dem Einsatz industrieller Flexibilität**

Emissionen, welche aus dem Einsatz industrieller Flexibilitätsmaßnahmen resultieren (z.B. beim Einsatz von Bivalenz-Technologien), werden in den Berechnungen aufgrund

ihrer im Gesamtkontext niedrig erscheinenden Größenordnung vernachlässigt. Eine Berücksichtigung dieser Emissionen würde zu einem etwas geringeren CO₂-Vermeidungspotential industrieller Flexibilitätsmaßnahmen führen.

◆ **Berücksichtigung vorgelagerter Emissionen**

Durch eine Vermeidung CO₂-intensiver Stromerzeugung werden nicht nur direkte, bei der Stromerzeugung selbst verursachte Emissionen, sondern auch vorgelagerte Emissionen (z.B. durch Abbau und Transport von Steinkohle oder die Herstellung von PV-Modulen) vermieden. Vorgelagerte Emissionen werden daher in den angesetzten Emissionsfaktoren berücksichtigt. Bei einer Nicht-Berücksichtigung vorgelagerter Emissionen fallen die Ergebnisse entsprechend niedriger aus.

4.3.2 Einordnung der Ergebnisse

Zur besseren Einordnung der Ergebnisse werden im Folgenden die Resultate von durchgeführten Sensitivitätsrechnungen vorgestellt. Die Sensitivitätsrechnungen sollen hierbei nicht die einzelnen getroffenen Annahmen und Vereinfachungen selbst untersuchen, sondern den denkbaren Wertebereich der Ergebnisse bei abweichenden grundlegenden Berechnungsansätzen und -parametern darstellen. Hierfür werden der Extremfall einer *vollständigen Lastverschiebung von Braunkohle zu Erneuerbaren Energien* als Maximalabschätzung, der relativierte Ansatz einer *Lastverschiebung von Braunkohle bzw. Erneuerbaren Energien zu den mittleren Emissionen* sowie der bei klassischen Maßnahmen der CO₂-Reduzierung häufig verwendete Ansatz einer *vollständigen Vermeidung der Arbeit zu durchschnittlichen Emissionen* herangezogen. Die Berechnung des CO₂-Vermeidungspotentials erfolgt hierbei stark vereinfacht auf jährlicher Ebene. Die Aussagekraft der dargestellten Ergebnisse der Sensitivitätsrechnungen ist folglich begrenzt.

Vollständige Lastverschiebung von Braunkohle zu Erneuerbaren Energien

Durch Lastverzicht wird der Betrieb eines Braunkohlekraftwerks vermieden, welcher zu einem späteren Zeitpunkt vollständig durch Erneuerbare Energien (Mittelwert aus Wind und PV) ausgeglichen wird. Analog wird durch Lasterhöhung der Betrieb eines Braunkohlekraftwerks vermieden, indem die entsprechende Arbeit zu einem anderen Zeitpunkt durch Erneuerbare Energien erbracht wird. Eine solche Verschiebung der Arbeit ist für Fälle denkbar, in welchen Arbeit tatsächlich kraftwerksscharf verschoben werden kann, beispielsweise bei einem Betrieb industrieller Flexibilitätsmaßnahmen in einem Inselsystem ohne Anbindung an das Netz der öffentlichen Stromversorgung. Zeitliche Einschränkungen an die Verfügbarkeit Erneuerbarer Energien werden hierbei nicht berücksichtigt. Es ergibt sich ein CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität für den gegenwärtigen Strommix (2019) von ca. 6,1 Mio. t CO₂. Arbeit wird hierbei vollständig von der CO₂-intensivsten zur CO₂-ärmsten Erzeugungstechnologie verschoben, das vorliegende Ergebnis stellt folglich eine Maximalabschätzung dar.

Lastverschiebung von Braunkohle bzw. Erneuerbaren Energien zu mittleren Emissionen

Durch Lastverzicht wird der Betrieb eines Braunkohlekraftwerks vermieden. Verschobene Arbeit wird hierbei zu mittleren Emissionen der Stromerzeugung ausgeglichen. Bei Lasterhöhung wiederum werden die mittleren Emissionen der Stromerzeugung vermieden, indem Arbeit hin zu Erneuerbaren Energien (Mittelwert aus Wind und PV) verschoben wird. Ein solcher Einsatz industrieller Flexibilitätsmaßnahmen ist bei einer lokalen Kopplung

industrieller Nachfrageflexibilität mit entsprechenden Erzeugungseinheiten bei gleichzeitig unterdimensioniertem Netzzugang denkbar (CO₂-Vermeidung durch Nutzung von Überschussstrom bzw. Vermeidung des Einsatzes von Back-up Kraftwerken). Es ergibt sich ein CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität für den gegenwärtigen Strommix (2019) von ca. 3,9 Mio. t CO₂.

Vollständige Vermeidung der Arbeit zu durchschnittlichen Emissionen

Hierbei handelt es sich um einen rein theoretischen Ansatz, welcher häufig für klassische Maßnahmen zur Verminderung von Emissionen, wie beispielsweise den Zubau Erneuerbarer Energien, herangezogen wird. Durch die verschobene Arbeit werden dabei sowohl für Lastverzicht als auch Lasterhöhung die mittleren Emissionen der Stromerzeugung vermieden, es erfolgt kein Ausgleich der verschobenen Arbeit. Aus diesem Ansatz ergibt sich ein CO₂-Vermeidungspotential für den gegenwärtigen Strommix (2019) von ca. 2,3 Mio. t CO₂.

Obwohl eine Anpassung einiger der in Kapitel 4.3.1 dargestellten wesentlichen Annahmen und Vereinfachungen zu geringeren Ergebnissen führen können, scheint es sich folglich bei dem für den gegenwärtigen Strommix ermittelten CO₂-Vermeidungspotential industrieller Nachfrageflexibilität von ca. 700.000 t CO₂ (bzw. 0,7 Mio. t CO₂) insgesamt um eine realistische bis konservative Abschätzung zu handeln.

5 Schlussfolgerungen und Fazit

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeiten war es, das CO₂-Vermeidungspotential industrieller Flexibilitätsmaßnahmen abzuschätzen. Aus den im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie untersuchten industriellen Flexibilitätsmaßnahmen konnte ein **CO₂-Vermeidungspotential** von ca. **700.000 t CO₂** ermittelt werden. Die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik sowie die Belastbarkeit der getroffenen Annahmen konnte nachgewiesen werden. Das errechnete CO₂-Vermeidungspotential ermöglicht nun einen Vergleich industrieller Nachfrageflexibilität mit weiteren Maßnahmen der Energiewende und kann als **wichtige Kennzahl industrieller Flexibilitätsmaßnahmen** herangezogen werden. Als solche können die vorliegenden Ergebnisse nicht nur als Grundlage politischer Entscheidungsprozesse dienen, sondern auch eine wesentliche Rolle in der gesellschaftspolitischen Diskussion einnehmen.

Das **zukünftige CO₂-Vermeidungspotential steigt** bis zum Jahr **2030** aufgrund des Weiterbetriebs CO₂-intensiver Erzeuger trotz rückläufiger Emissionen der Stromerzeugung an. Im Jahr **2050** ist das CO₂-Vermeidungspotential in den betrachteten Strommix-Szenarien aufgrund eines weiteren Rückgangs der Emissionen der Stromerzeugung hingegen **rückläufig**. Im Szenario *80%-Pfad* ist dabei ein moderater Rückgang des CO₂-Vermeidungspotentials zu beobachten. Lediglich im Szenario *95%-Pfad* vermindern sich die Ergebnisse aufgrund einer abgeschlossenen Defossilisierung der Stromerzeugung stark. Bei zunehmender Dekarbonisierung der Stromerzeugung ist jedoch auch für sonstige Maßnahmen zur CO₂-Reduktion langfristig ein rückläufiges CO₂-Vermeidungspotential zu erwarten. Insgesamt handelt es sich folglich bei industrieller Nachfrageflexibilität **auch im zukünftigen Energiesystem** um ein **effektives Instrument der CO₂-Reduzierung**.

Bei Betrachtung der ¼-stündlich modellierten Strommix-Szenarien konnte als wesentliche Ursache des verhältnismäßig schwachen Rückgangs des CO₂-Vermeidungspotentials (mit

Ausnahme des Szenarios *95%-Pfad*) eine zusätzliche CO₂-Vermeidung durch die Vermeidung von Emissionsspitzen identifiziert werden. Bei einem steigenden Anteil Erneuerbarer Energien werden niedrige spezifische Emissionen hierbei zunehmend zum Normalzustand. Aus Emissionsspitzen verbleibender thermischer Kraftwerke ergibt sich hierdurch ein steigendes CO₂-Vermeidungspotential, Emissionstäler verlieren hingegen zunehmend an Bedeutung. Für das CO₂-Vermeidungspotential von Flexibilitätsoptionen lässt sich daher schlussfolgern, dass im zukünftigen Energiesystem insbesondere **Lastverzicht** eine **zentrale Rolle** zur CO₂-Vermeidung einnimmt, während einer (gezielten) **Lasterhöhung** lediglich eine **untergeordnete Rolle zur CO₂-Vermeidung** zuteilwird. Die Tatsache, dass über die betrachteten Flexibilitätsmaßnahmen Lastverzicht ein circa doppelt so hohes Potential an verschiebbarer Arbeit wie Lastverzicht aufweist [3], stärkt die zukünftige Bedeutung industrieller Nachfrageflexibilität zusätzlich. Für weitere Forschungsarbeiten (industrieller) Flexibilitätsmaßnahmen mit dem Ziel einer CO₂-Reduzierung wird empfohlen, die besondere Bedeutung von Lastverzicht im zukünftigen Energiesystem entsprechend zu berücksichtigen.

Die erarbeitete Methodik kann des Weiteren zur Abschätzung des CO₂-Vermeidungspotentials vergleichbarer Flexibilitätsmaßnahmen herangezogen werden. Einzelne Anwendungsfälle vorliegender industrieller Flexibilitätsmaßnahmen wurden im Rahmen der bisherigen Arbeiten bereits untersucht. Mit Hilfe der erarbeiteten Methodik kann darüber hinaus das **individuelle CO₂-Vermeidungspotential** für Flexibilitätsmaßnahmen **einzelner Unternehmen** ermittelt werden. Die Ergebnisse können dementsprechend im Rahmen der Unternehmenskommunikation als Marketing-Maßnahme eingesetzt werden und erzeugen somit einen zusätzlichen (nicht-monetären) wirtschaftlichen Mehrwert industrieller Flexibilitätsmaßnahmen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere in der **optimalen Ausgestaltung einer Flexibilitätsmaßnahme** hinsichtlich ihrer für die CO₂-Vermeidung relevanten Parameter (Spannungsfeld zwischen maximaler Abrufdauer und maximaler Laständerung), welche wiederum wichtige Implikationen für weitere Forschungs- und Förderungsschwerpunkte enthalten. Eine zuverlässige direkte **Gegenüberstellung verschiedener Flexibilitätsmaßnahmen** im Hinblick auf ihre **CO₂-Effizienz** erfordert darüber hinaus eine analoge Berechnung des CO₂-Vermeidungspotentials sonstiger Flexibilitätsmaßnahmen (z.B. Batteriespeicher) nach der dargestellten Berechnungsmethodik. Um den **Zugang von Unternehmen zu ihrem individuellen CO₂-Vermeidungspotential** zu vereinfachen, ist darüber hinaus eine Automatisierung der dargestellten Berechnungsmethodik unter Einbezug einer angemessenen externen Schnittstelle notwendig.

6 Danksagung

Die vorliegenden Forschungsergebnisse wurden von der Hochschule Mannheim im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie erarbeitet, welches durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie den Projektträger Jülich gefördert wird.

7 Literaturverzeichnis

- [1] AICHELE, Christian; DOLESKI, Oliver D. (Hrsg.): *Smart Market : Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014
- [2] HAUPT, Leon ; KÖRNER, Marc-Fabian ; SCHÖPF, Michael ; SCHOTT, Paul ; FRIDGEN, Gilbert: *Strukturierte Analyse von Nachfrageflexibilität im Stromsystem und Ableitung eines generischen Geschäftsmodells für (stromintensive) Unternehmen*. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 44 (2020), Nr. 2, S. 141–160
- [3] SAUER, Alexander; ABELE, Eberhard; BUHL, Hans Ulrich (Hrsg.): *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 Verlag, 2019
- [4] ENTSO-E: *ENTSO-E Transparency Platform*. URL <https://transparency.entsoe.eu/> – Überprüfungsdatum 2021-08-25
- [5] FIORINI, Laura ; AIELLO, Marco: *Household CO2-efficient energy management*. In: *Energy Informatics* (2018), S. 21–34
- [6] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2020 : Energieverbrauch sinkt in Deutschland im Jahr 2020 in Folge der Covid-19-Pandemie auf historisches Tief*. URL <https://ag-energiebilanzen.de/20-0-Berichte.html>. – Aktualisierungsdatum: 2021-04-06 – Überprüfungsdatum 2021-08-10
- [7] 50HERTZ ; AMPRION ; TENNET ; TRANSNETBW: *Erste Schritte zur Meldungsumsetzung in Deutschland entsprechend der EU-Transparenzverordnung*. URL https://www.netztransparenz.de/portals/1/Erste_Schritte_zur_Meldungsumsetzung_EU_VO_Nr._543-2013.pdf – Überprüfungsdatum 2021-08-11
- [8] DOSSOW, Patrick: *Die Bedeutung der industriellen Eigenerzeugung bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien*. In: *11. Internationale Energiewirtschaftstagung* (2019)
- [9] ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN E.V.: *Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 - 2020*. URL https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=ausdruck_strez_abgabe_feb2021_a10_.pdf. – Aktualisierungsdatum: Februar 2021 – Überprüfungsdatum 2021-08-11
- [10] WEISSER, Daniel: *A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies*. In: *Energy* 32 (2007), Nr. 9, S. 1543–1559
- [11] UMWELTBUNDESAMT: *Energiebedingte Emissionen*. URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen#energiebedingte-kohlendioxid-emissionen-durch-stromerzeugung>. – Aktualisierungsdatum: 2021-06-02 – Überprüfungsdatum 2021-08-11
- [12] POGANIETZ, Witold-Roger ; TIMPE, Christof ; BECKER, Liv ; HÖFER, Tim ; KOCH, Matthias ; SEEBACH, Dominik ; WEISS, Annika ; WILDGRUBE, Theresa: *ENTWICKLUNGSPFADE AUS DEM ENSURE-PROJEKT : TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS BIS ZUM JAHR 2030*, 2019

- [13] MARTIN ROBINIUS ; PETER MARKEWITZ ; PETER LOPION ; FELIX KULLMANN ; DETLEF STOLTEN: *WEGE FÜR DIE ENERGIEWENDE Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050*, 2020
- [14] BUNDESREGIERUNG: *Klimaschutzgesetz 2021 : Generationenvertrag für das Klima*. URL <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>. – Aktualisierungsdatum: 2021-08-25 – Überprüfungsdatum 2021-07-12
- [15] TAGESSCHAU.DE: *Bericht: Klimaziele 2030 dürften verfehlt werden*. URL <https://www.tagesschau.de/inland/klimaziele-2030-verfehlt-101.html>. – Aktualisierungsdatum: 2021-08-19 – Überprüfungsdatum 2021-08-25
- [16] ARNOLD, Fabian ; SCHLUND, David ; SCHULTE, Simon: *EWI Merit-Order Tool 2021*. URL <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/ewi-merit-order-tool-2021/>. – Aktualisierungsdatum: Januar 2021 – Überprüfungsdatum 2021-08-25
- [17] SCHLUND, David ; ARNOLD, Fabian: *EWI Merit-Order Tool 2020: Weniger Kohle, mehr Gas im Einsatz*. URL <https://www.ewi.uni-koeln.de/de/aktuelles/ewi-merit-order-tool-2020-weniger-kohle-mehr-gas-im-einsatz/>. – Aktualisierungsdatum: 2020-03-12 – Überprüfungsdatum 2021-08-25
- [18] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Klassifikation der Wirtschaftszweige*. Mit Erläuterungen. URL <https://www.destatis.de/static/DE/dokumente/klassifikation-wz-2008-3100100089004.pdf> – Überprüfungsdatum 2021-08-25

Anhang

Vollständige Parameter der fiktiven Flexibilitätsmaßnahme „Beispiel-Prozess“

Beispiel-Prozess		Potential	Perspektive	
Lasterhöhung	Maximale Leistung	Leistung [kW]	5000	6000
		Abrufdauer [h]	10	10
		Nachholzeit [h]	5	5
		Abrufhäufigkeit [1/a]	365	365
	Maximale Abrufdauer	Leistung [kW]	500	1000
		Abrufdauer [h]	100	100
		Nachholzeit [h]	20	20
		Abrufhäufigkeit [1/a]	52	52
Lastverzicht	Maximale Leistung	Leistung [kW]	2500	4000
		Abrufdauer [h]	10	10
		Nachholzeit [h]	10	5
		Abrufhäufigkeit [1/a]	200	365
	Maximale Abrufdauer	Leistung [kW]	250	500
		Abrufdauer [h]	100	100
		Nachholzeit [h]	50	40
		Abrufhäufigkeit [1/a]	36	36

Tabelle 7: Vollständige Parameter der fiktiven Flexibilitätsmaßnahme „Beispiel-Prozess“