

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# Elektrifizierung und Flexibilisierung der Industrie im Modell Power-Flex – Lastprofile, Preise und regulatorische Hemmnisse [IND-E]

Schlussbericht Teilvorhaben Öko-Institut

Freiburg, 25.02.2025

Zuwendungsempfänger: Öko-Institut e.V.

Förderkennzeichen: 03E11026C

## Autoren und Autorinnen

Christoph Heinemann  
Moritz Vogel  
Matthias Koch  
Markus Haller

**Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt  
bei den Autoren.**

## Kontakt

[info@oeko.de](mailto:info@oeko.de)  
[www.oeko.de](http://www.oeko.de)

## Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71  
79017 Freiburg

## Hausadresse

Merzhauser Straße 173  
79100 Freiburg  
Telefon +49 761 45295-0

## Büro Berlin

Borkumstraße 2  
13189 Berlin  
Telefon +49 30 405085-0

## Büro Darmstadt

Rheinstraße 95  
64295 Darmstadt  
Telefon +49 6151 8191-0



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzdarstellung</b>	<b>4</b>
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4	Darstellung von wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde	10
1.4.1	Angabe zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	12
1.4.2	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	12
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	19
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>20</b>
2.1	Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	20
2.2	Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	36
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	36
2.4	Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	37
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	38
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11	38
<b>3</b>	<b>Literatur</b>	<b>39</b>

## 1 Kurzdarstellung

Das Forschungsprojekt Ind-E „Dekarbonisierungs- und Elektrifizierungspotentiale in der deutschen Industrie – Daten, Akteure und Modelle“ wurde von März 2021 bis August 2024 durch ein Projektkonsortium aus Fraunhofer ISE (Projektkoordination), dem INATECH der Universität Freiburg, dem Öko-Institut sowie der Hochschule Offenburg bearbeitet. Der vorliegende Bericht stellt die Arbeiten und Ergebnisse des Öko-Instituts dar. Die Ziele, Arbeiten und Ergebnisse der Projektpartner sind in gesonderten Berichten aufgeführt. Ein gemeinsamer veröffentlichter Ergebnisbericht, fasst die zentralen inhaltlichen Ergebnisse zusammen. Der Bericht ist unter diesem Link abrufbar: [IND-E - Dekarbonisierungs- und Elektrifizierungspotentiale in der deutschen Industrie - Fraunhofer ISE](#).

### 1.1 Aufgabenstellung

Deutschland hat sich mit der Novellierung des Klimaschutzgesetzes (KSG) im Jahr 2022 das Ziel gesetzt bis zum Jahr 2045 Klimaneutral zu werden. Zudem sah das Gesetz bis zur erneuten Novellierung im Jahr 2024 vor, dass sektorale jährlich zulässige Emissionsminderungen bis zum Jahr 2030 erreicht werden müssen. Der Industriesektor machte im Jahr 2022 einen Anteil 28% am Endenergieverbrauch (AGEB 2024) aus. Die Treibhausgasemissionen des Sektors machten im Jahr 2023 23% der Gesamtemissionen (ohne LULUCF) aus (UBA 2024). Gegenüber dem Jahr 2023 hätte der Sektor nach altem KSG von 155 Mt CO<sub>2</sub>-Äq. im Jahr 2023 auf 122 Mt CO<sub>2</sub>-Äq. im Jahr 2030 reduzieren müssen. Die sektorspezifischen Ziele wurden jedoch mit der jüngsten Novellierung zugunsten einer sektorübergreifenden Gesamtbetrachtung und unter Berücksichtigung von zukünftigen Projektionsdaten abgeschafft.

Treibhausgas-Emissionen von Unternehmen werden in drei Geltungsbereiche (Scopes) eingeteilt. Der erste Geltungsbereich (Scope 1) umfasst alle diejenigen Emissionen, die direkt von den betrachteten Unternehmen erzeugt werden. Im Fall der energieintensiven Industrien sind dies Emissionen, welche entweder bei der Verbrennung fossiler Energieträger zur Energiegewinnung entstehen oder im Verlauf der Produktionsprozesse (z.B. bei der Kalzination von Kalk zu Klinker) anfallen. Zum zweiten Geltungsbereich (Scope 2) zählen Emissionen aus der Nutzung von eingekaufter Energie, zum dritten (Scope 3) solche, welche an anderen Stellen der Wertschöpfungskette anfallen und somit nicht unmittelbar die Unternehmensaktivitäten betreffen, mit dem Produkt dennoch in Verbindung stehen (Allianz für Energie und Klima, 2021). Die in der Literatur beschriebenen Treibhausgas-Emissionen der energieintensiven Industrien sind vornehmlich energie- (68%) und prozessbedingt (32%) (Agora Energiewende & Wuppertal Institut, 2019) und betreffen somit in erster Linie die Geltungsbereiche 1 und 2, worauf auch die technischen Dekarbonisierungsoptionen ausgerichtet sind.

Um das Ziel der Klimaneutralität und die Zwischenziele in den Jahren 2030 und 2040 zu erreichen, stellt sich für viele Industrieunternehmen die Frage, wie ihre Energieversorgung und ihre Emissionen mittel- und langfristig reduzieren können, um mit den Klimapolitischen Zielen der Bundesregierung in Einklang zu stehen. Energie- ebenso wie wärmeintensive Prozesse werden heute immer noch vorwiegend mit fossilen Brennstoffen versorgt. Der Anteil von Strom am Endenergieverbrauch der Industrie lag im Jahr 2022 bei 30% (AGEB 2024). Zudem stellt sich die Frage, inwieweit Sektorkopplungsmaßnahmen und hierunter insbesondere Elektrifizierungsmaßnahmen zur Nutzung von erneuerbarem Strom heute und in der Zukunft realisiert, werden können.

Das Forschungsprojekt Ind-E leistet einen Beitrag, indem die sehr heterogenen Voraussetzungen von einzelnen Industriebranchen mit unterschiedlichen Energienachfragen auf ihr Elektrifizierungs- sowie Flexibilisierungspotential untersucht, für die Energiesystemanalyse aufbereitet und die Effekte auf das Energiesystem analysiert werden. Der Ansatz hierfür ist eine Kombination aus qualitativen und quantitativer Akteursanalyse gekoppelt mit einer quantitativen modellgestützten Analyse, in der unterschiedlichste Modelle erweitert werden und zum Einsatz kommen.

Das Forschungsprojekt wird durch das Projektkonsortium aus Fraunhofer ISE, Öko-Institut, Universität Freiburg sowie die Hochschule Offenburg bearbeitet. Das Fraunhofer ISE koordiniert das Gesamtprojekt.

### **Ziel des Gesamtvorhabens waren:**

- Identifikation und Berücksichtigung der Treiber und Hemmnisse für Elektrifizierung und Flexibilisierung von industriellen Prozessen der jeweiligen Akteure in der Industrie.
- Branchenspezifische Erweiterung der Energiesystemanalyse in dem Bereich der Industriemodellierung
- Identifikation von Transformationspfaden der deutschen Industrie auf nationaler Ebene, in Industriegebieten und in Einzelunternehmen in verschiedenen Szenarien basierend auf quantitativer Energiesystemmodellierung unter Berücksichtigung akteurspezifischer Einflussfaktoren auf Defossilisierungs- und Flexibilisierungsmaßnahmen sowie politischer Rahmenbedingungen.
- Ermittlung der Total Cost of Ownership verschiedener Dekarbonisierungsstrategien der energieintensiven Industrie.
- Identifikation von Effekten Elektrifizierung und Flexibilisierung der unterschiedlichen Transformationspfade auf Lastflüsse, Netzausbau und Strommärkte.

**Ziel des Teil-Vorhabens des Öko-Instituts** war es, einen Beitrag zur Berücksichtigung der Elektrifizierungspotenziale der Industrie in der energiesystemischen Modellierung zu leisten. Damit wurde die Grundlage gelegt, in zukünftigen Energiesystemanalysen das Potenzial der Industrie zur Elektrifizierung und Flexibilisierung angemessen zu berücksichtigen. Dazu wurde

- erstens das bestehende Modell PowerFlex in seinen Funktionalitäten weiterentwickelt,
- zweitens einzelne Modellmodule und Daten Open Source der Modellierungsgemeinschaft zur Verfügung gestellt
- drittens spezifische Fragestellungen zur Elektrifizierung der Industrie und dem resultierenden Beitrag zum Klimaschutz in einer Szenarien-Analyse ermittelt und
- viertens regulatorische Hemmnisse für die Elektrifizierung der Industrie herausgearbeitet.

### **Detaillierte methodische Fragestellungen** des Vorhabens waren:

- Wie können flexible Lasten und die Möglichkeit des Lastabwurfs adäquat und mit vertretbarem Optimierungsaufwand (insbesondere bzgl. erforderlichen Rechenleistung) in der Modellierung abgebildet werden?

- Wie kann methodisch das aggregierte Lastprofil für Deutschland (z.B. der Übertragungsnetzbetreiber) disaggregiert werden und so Veränderungen durch die Elektrifizierung, Effizienzbestrebungen sowie Flexibilität in der modellgestützten Szenarien-Analyse angemessen berücksichtigt werden?
- Wie kann der Regelenergiemarkt adäquat in der Modellierung abgebildet werden? Die Herausforderung liegt dabei im Spannungsfeld zwischen einer schnell zunehmenden Komplexität des Optimierungsproblems und einer möglichst detaillierten Abbildung, so dass zumindest die neuen Akteure in den Regelenergiemarkt integriert werden können.

Inhaltlich wurden im Projekt die folgenden Fragestellungen untersucht:

- In welcher Höhe nimmt der Stromverbrauch durch die Elektrifizierung in der Industrie und im verarbeitenden Gewerbe in der Jahressumme zu und welche Auswirkungen hat das auf den benötigten Zubau an erneuerbaren Energien im Stromsystem?
- Wie verändert sich das elektrische Lastprofil mit Blick auf Verlauf und Spitzen aufgrund der Elektrifizierung von Prozessen, Effizienzmaßnahmen und Flexibilisierungsmöglichkeiten?
- Wie beeinflusst ein durch die zunehmende Elektrifizierung der Industrie (als Strategie zur Dekarbonisierung) geprägtes Lastprofil das Energiesystem bezüglich der notwendigen gesicherten Kraftwerksleistung?
- Welchen Einfluss haben Elektrifizierung und Flexibilisierung der Industrie auf Börsenstrompreise und weitere Indikatoren im Strommarkt, wie z.B. CO<sub>2</sub>-Emissionen und EE-Abregelung?

Neben den modellseitigen Fragestellungen wurden die regulatorischen Hemmnisse für die Anwendung von Elektrifizierungstechnologien in der Industrie untersucht. Diese wurden für die Modellierung aufbereitet und konnten so einen Einblick in die Auswirkungen heutiger Regulierung auf die Sektorkopplung ermöglichen.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Ind-E wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms des BMWK im Förderschwerpunkt Systemanalyse gefördert. Nachfolgende Tabelle stellt den Beitrag des Projektes zu den Förderpolitischen Zielen dar.

**Tabelle 1: Gegenüberstellung der förderpolitischen Ziele und der geplanten Beiträge des Vorhabens**

Förderpolitische Ziele	Beitrag des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen
Neu- und Weiterentwicklung systemanalytischer Werkzeuge und Methoden	Mit dem Projekt werden methodische Weiterentwicklungen erzielt, die den State-of-the-Art der Energiesystemmodellierung signifikant erweitern. Es werden dadurch Möglichkeiten geschaffen, Elektrifizierungsmaßnahmen in der Industrie ganzheitlich auf verschiedenen Ebenen zu untersuchen und ihren Beitrag zu Klimaschutzzielen ebenso wie ihre Auswirkungen auf Infrastrukturbedarfe zu bestimmen.
Einbindung aller relevanten Fachdisziplinen	Im Vorhaben fließen die Kompetenzen und Inhalte verschiedener Disziplinen ein, vor allem Ingenieurwesen (Energietechnik, Stromnetze), Wirtschaftswissenschaften (Bepreisung der Infrastruktur,

	Anreizmechanismen, Investitionsanalyse) und Sozialwissenschaften (Akteursverhalten bzgl. Investitionen).
Internationale Perspektive des Energiesystems	Berücksichtigung von internationalen Entwicklungen im Bereich Energietechnologien sowie Industrie. In den Energiesystemmodellen werden zum Teil auch europäische Effekte berücksichtigt (Im- und Exporte).
Transparenz in der Systemanalyse	Bereitstellung der gewonnenen Inputdaten für die Energiesystemmodelle aus den Analyse-Arbeitspaketen AP1 und AP2 (Open Data)
Verbesserte Abbildung von Akteuren und Akteursverhalten	Es wird detailliert untersucht, wie Industriebetriebe sich in Bezug auf Dekarbonisierung und Elektrifizierung positionieren, welche Hemmnisse sie sehen und nach welchen Kriterien sie eine Entscheidung für oder gegen eine konkrete Technologie treffen.
Stärkung der heimischen Wirtschaft	Durch die Identifikation prioritärer Elektrifizierungsmaßnahmen können Förderbedarfe für deren Ausbau abgeleitet werden und somit Klimaschutztechnologien in Deutschland gestärkt werden. Die Kosten für die Einhaltung der Klimaschutzverpflichtungen auf Seiten der Industrie können somit möglichst niedrig gehalten werden.

Wesentliche Voraussetzungen für das Projekt waren die vorhandenen Energiesystemmodelle und Modellierungskennntnisse sowie die breite Datengrundlage der beteiligten Konsortialpartner. Am Fraunhofer ISE wurden die vorhandenen Gesamtenergiesystemmodelle REMod und DISTRICT erweitert, am INATECH wurde das Modell flexible weiterentwickelt und am Öko-Institut das Modell PowerFlex, ohne die das Projekt in der Form nicht hätte durchgeführt werden können.

Das Projekt wurde als Verbundvorhaben mit den folgenden Partnern durchgeführt:

- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme
- Hochschule Offenburg

Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme hatte die Verbundkoordination inne.

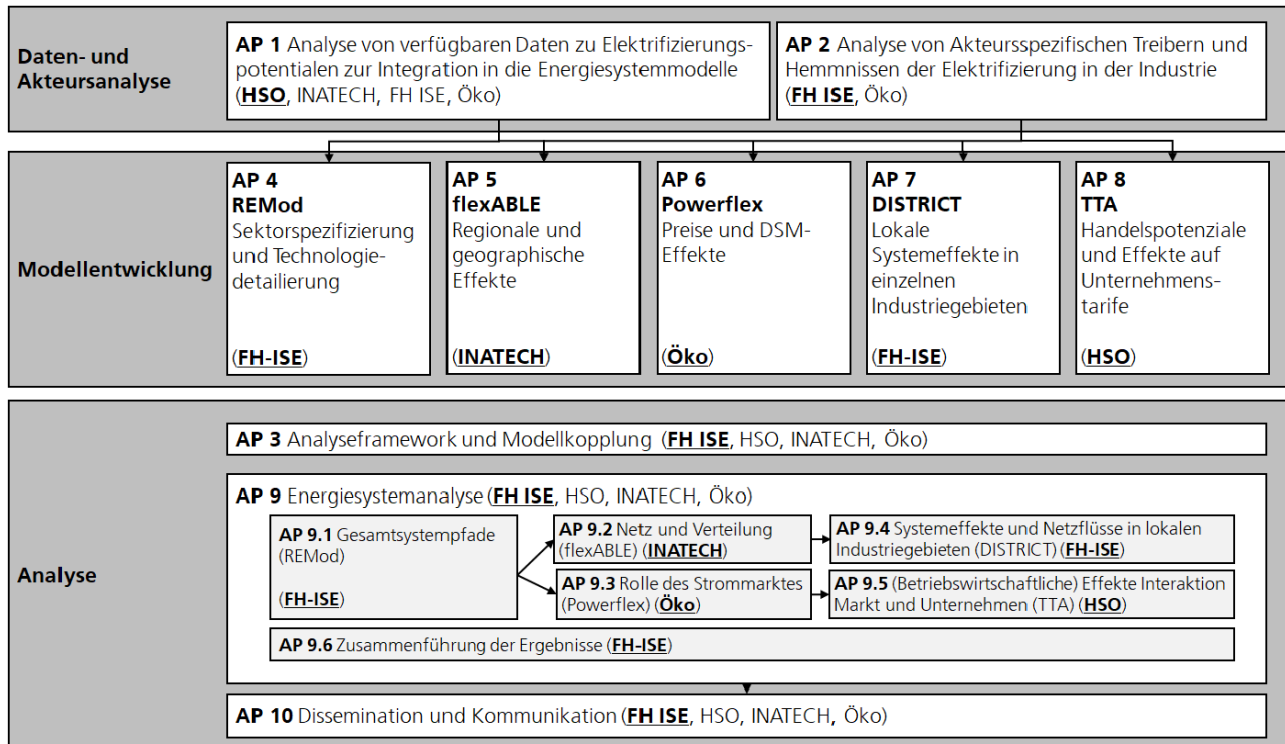
Am Öko-Institut waren folgenden Voraussetzungen essenziell für die Bearbeitung des Projektes:

- Langjährige Entwicklung und Nutzung des Energiesystemmodells PowerFlex.
- Fachwissen im Bereich der Szenarienanalyse.
- Fachwissen im Bereich der Open Source Modellierung mit Python.
- Fachwissen zur energieintensiven Industrie und technischen Prozessen
- Fachwissen zu Stakeholder Interaktion und Datensammlung mittels strukturierter Interviews

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt ist in 10 Arbeitspaketen organisiert, die in der folgenden Abbildung dargestellt sind. Der Arbeitsplan teilt sich in drei Arbeitsbereiche. Die Daten- und Akteursanalyse wird in AP1 und AP2 durchgeführt. AP1 konzentriert sich dabei auf die Erhebung und Analyse branchenspezifischer

Lastprofile sowie der Erhebung von Flexibilitätspotenzialen und wurde von der Hochschule Offenburg geleitet. AP2 analysiert unter Leitung des Fraunhofer ISE aktorenspezifische Hemmnisse der Elektrifizierung und Flexibilisierung der Industrie, sodass diese in der Modellentwicklung berücksichtigt werden können.



Die getätigten Modellentwicklungen befähigen das Projektkonsortium der multidimensionalen Analyse des Industriesektors im Energiesystem. Hierzu wird zunächst in AP 3 unter Leitung des Fraunhofer ISE ein Analyserahmen bestimmt, der zum einen die Schnittstellen und den Datenaustausch zwischen den Modellen sicherstellt und zum anderen gemeinsame Szenarien definiert. Die Szenarien werden dann in AP9 (Energiesystemanalyse) mittels der Modelllandschaft berechnet und analysiert. Zudem werden die Ergebnisse synthetisiert, um Erkenntnisse bezüglich einer Defossilisierung der Industrie zu gewinnen und dabei sowohl die Mikro- als auch die Makro-Ebene sowie Akteursverhalten zu berücksichtigen. In AP 10 werden die gewonnenen Erkenntnisse (methodisch und inhaltlich) wissenschaftlich publiziert und in einer Kurzstudie zusammengefasst und veröffentlicht.

Das Projekt wurde 01.03.2021 bis 31.08.2024 bearbeitet. Der Zeitplan inklusiver aller Änderungen im Projektverlauf ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Das Projekt und der Arbeitsplan wurden während der Projektlaufzeit mehrmals angepasst. Es wurde kostenneutral von ursprünglich 29.02.2024 bis 31.08.2024 verlängert.

	2021				2022				2023				2024					
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>AP 1 Daten zu Elektrifizierungspotentialen zur Integration in die Energiesystemmodelle</b>																		
AP 1.3 Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotentiale																		
<b>AP 2 Analyse von Akteurspezifischen Treibern und Hemmnissen der Elektrifizierung in der Industrie</b>																		
AP 2.2 Regulatorische Hemmnisse und Treiber																		
<b>AP 3 Analyseframework und Modellverbund</b>																		
AP 3.1 Analyseframework																		
AP 3.2 Modellverbund																		
<b>AP 6 Powerflex Preise und DSM-Effekte</b>																		
AP6.1: Modell-Entwicklung Last-Dekomposition																		
AP6.2: Veröffentlichung Modell Last-Dekomposition und Lastkurven																		
AP6.3: Demand Side Management in Powerflex																		
AP6.4: Abbildung des Regelenergiemarktes in einem Open Source Modeling Framework																		
AP6.5: Veröffentlichung der Methodik zur Abbildung des Regelenergiemarktes in einem Open Source Modeling Framework																		
<b>AP 9 Energiesystemanalyse</b>																		
AP 9.3 Rolle des Strommarktes																		
AP 9.6 Synthese der Ergebnisse																		
<b>AP 10 Dissemination und Kommunikation</b>																		
AP 10.1 Kommunikation mit Akteuren																		
AP 10.3 Kurzstudie und Veröffentlichung der Ergebnisse																		
Anpassungen durch kostenneutrale Projektverlängerung in hellblau																		

Im Rahmen des Projektes fand eine virtuelle Auftaktveranstaltung statt, an der der Projektbeirat bestehend aus dem BDI und der DIHK teilnahm. Zudem gab es halbjährliche Präsenztreffen im Rahmen des Projektkonsortiums.

**Das Öko-Institut hat in den folgenden Arbeitspaketen gearbeitet:**

**AP1 – Energienachfrage in Industriebetrieben und Elektrifizierungspotenzial der Wandler**

Zusammen mit den Projektpartnern wurde eine einheitliche Struktur für die Erfassung der Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenziale in der Industrie entwickelt. Dazu werden die Erfordernisse in Bezug auf die Daten aus dem Modell der Öko-Instituts „PowerFlex“ heraus definiert und eingebracht. Zudem hat das Öko-Institut Flexibilisierungspotenziale recherchiert und strukturiert.

**AP2 – Analyse von aktors-spezifischen Treibern und Hemmnissen der Elektrifizierung in der Industrie**

Das Öko-Institut hat eine Übersicht zu regulatorischen Barrieren für die Elektrifizierung der Industrie erstellt. Diese wurde gemeinsam mit Stakeholdern validiert und priorisiert. Die ermittelten Barrieren wurden mit den anderen in AP2 ermittelten Einflussfaktoren (siehe TVB des Fraunhofer ISE) für die Modellierung aufbereitet und in das Analyseframework eingebettet.

**AP3 – Analyseframework und Modellkopplung**

Mit den Projektpartnern wurde erstens, ein einheitlicher Szenariorahmen für die Szenarienanalyse bestimmt und zweitens, die technischen Schnittstellen zwischen den Modellen (z.B. für Börsenstrompreise aus dem Modell PowerFlex) definiert.

**AP6 – Modellentwicklung im Strommarktmodell „PowerFlex“: Preise und DSM Effekte**

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Berücksichtigung von sektor- und technologiespezifischen Lastprofilen, die Abbildung von flexiblen Stromverbrauchern sowie die Abbildung des Regelenergiemarktes in PowerFlex verbessert. Darüber hinaus wurden die Methodiken zur Lastdekomposition und zur Modellierung des Regelenergiemarktes durch Entwicklung entsprechender Module der wissenschaftlichen Community zur Verfügung gestellt.

**AP9 – Energiesystemanalyse**

Die im Modell neu entwickelten Funktionalitäten wurden durch den Einsatz in einem gemeinsamen Szenariorahmen validiert. Dabei wurden Effekte einer Elektrifizierung und Flexibilisierung der

Industrie in Bezug auf Preise (Spotmarktpreise und Regelernergieleistungspreise) sowie weiteren Indikatoren wie beispielsweise CO<sub>2</sub>-Emissionen und EE-Abregelung analysiert.

#### AP10 – Dissemination und Kommunikation

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in einer Kurzstudie zusammen mit den Projektpartnern veröffentlicht.

Grundsätzliche wurde der reibungslose Ablauf des Vorhabens durch den regelmäßigen Austausch sowohl innerhalb des Teams des Öko-Instituts als auch mit den Verbundpartnern sichergestellt:

- Innerhalb des Öko-Instituts fand mit den beteiligten Kollegen und Kolleginnen dreiwöchentlich ein Abstimmungstermin statt. In diesem wurde der Fortschritt der einzelnen Arbeitsschritte besprochen, Entscheidungen diskutiert und getroffen und Termine vorbereitet.
- Mit dem Gesamtkonsortium fand auch dreiwöchentlich ein Jour Fix statt. In diesem Termin wurden Themen der Projektkoordination besprochen als auch inhaltliche Themen vorgestellt und diskutiert.
- In der ersten Hälfte der Projektlaufzeit fand zusätzlich zwei-wöchentlich ein Austauschtermin zum Thema „Industriebranchen“ statt. Um Doppelarbeit zwischen den Instituten zu vermeiden, wurden dort Rechercheergebnisse konkret zu Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenzialen geteilt, diskutiert und Festlegungen getroffen.
- In AP2 fand ein regelmäßiger Austausch zwischen dem Fraunhofer ISE sowie dem Öko-Institut statt. Diese Termine dienten der gegenseitigen Information und der Planung gemeinsamer Arbeiten oder der Präsentation von Ergebnissen.

Für die Durchführung des Projektes hat das Öko-Institut an den folgenden Projekttreffen teilgenommen:

- 30.03.2021 Auftakttreffen | Fraunhofer ISE
- 25.10.2021 Beiratstreffen | online
- 15.11.2021 Projekttreffen | Fraunhofer ISE
- 13.10.2022 Projekttreffen | INATEC
- 02.03.2023 Projekttreffen | Öko-Institut
- 21.11.2023 Projekttreffen | Fraunhofer ISE
- 22.07.2024 Projekttreffen | Fraunhofer ISE

Zudem gab es zahlreich bilaterale Abstimmungen zwischen den Projektbeteiligten am Öko-Institut.

## **1.4 Darstellung von wissenschaftlichem und technischem Stand, an den angeknüpft wurde**

Die Energiewende erfordert neben der Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien auch die Nutzung erneuerbarer Energien in anderen Verbrauchssektoren (Industrie, Wärme,

Verkehr). Die Elektrifizierung von industriellen Prozessen bietet dabei ein großes Potenzial zur Reduktion der THG-Emissionen (Öko-Institut und Fraunhofer ISI 2015). Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Potenzialen und insbesondere den Effekten der Elektrifizierung von Prozessen aber auch anderen Bereichen der Sektorkopplung war zu Beginn des Projektes nach Einschätzung der Antragsteller erst in Anfängen erfolgt. Dabei erfolgt zumeist eine Abbildung lediglich der energieintensivsten Prozesse. Eine Flexibilisierung der Stromnachfrage wird zumeist nicht berücksichtigt. Zudem findet meist eine Fokussierung auf eine bestimmte Sektorkopplungstechnologie statt (Agora Verkehrswende und Agora Energiewende 2018). Es existieren einige Untersuchungen, in denen „Elektrifizierungs-Szenarien“ und sogenannte „Power-to-X-Szenarien“ (die verstärkt auf strombasierte Stoffe zur THG-Minderung setzen) gegenübergestellt werden. Diese Studien bilden jedoch die Elektrifizierung zumeist nur sehr grob ab, um andererseits eine umfängliche Modellierung des Energiesystems zu ermöglichen.

Im Bereich der **Akteursanalyse** gibt es nur wenig Literatur im Bereich sozialwissenschaftlicher Forschung zur Defossilisierung der energie-intensiven Industrie. Bisherige Veröffentlichungen beziehen sich entweder nur auf eine spezifische Branche oder sind erste Überblicksarbeiten bzgl. der Bottlenecks, die eine Defossilisierung hemmen. Hier finden sich Ansätze, die mit individuellen Stakeholdergruppen (bspw. „*Entscheidung für Energieeffizienz: Auswirkungen von Kultur, Verhalten und Technikdiffusion in produzierenden KMU in Baden-Württemberg*“) oder individuellen Technologien: Maßnahmen und Investitionsverhalten von Akteuren im Bereich "Power-to-Gas“) betrachten. Davon grenzt sich die hier dargestellten Untersuchungen insofern ab, als dass ein breiterer Fokus gewählt wird. Hemmnisse sollen nicht nur für eine bestimmte Industriebranche oder eine Sektorkopplungstechnologie erhoben werden. Im Fokus steht vielmehr eine breite Technologiebetrachtung, die strombasiert Wärme oder Energieträger erzeugen oder für Mobilität zum Einsatz kommen.

Im Bereich der **modellgestützte Energiesystemanalyse** gibt es eine große Modelllandschaft. In der eine Vielzahl von Modellen unterschiedliche Fragestellungen beantwortet (Ringkjøb, et al. 2019<sup>1</sup>). Dazu zählen Investitionsmodelle, Dispatchmodelle, Netzmodelle, kombinierte Einsatz- und Aubaumodelle. Der Dokus der Analyse variiert dabei von Modellen, die sich auf einen Sektor fokussieren (z.B. Strom) hin zu Modellen, die alle Sektoren betrachten. Dabei ist der Industriesektor bisher meist nicht unmittelbar im Fokus der Analyse. Das Projekt IND-E setzt genau hier an, die Rolle des Industriesektors in einem Modellverbund multidimensional zu bewerten. Die Dimensionen dabei sind einmal auf der Makro Ebene die Gesamtsystemperspektive, Lastverteilung und Netzflüsse, Regelenergiemarkt und Akteure sowie auf der Mikro Ebene die Abbildung von Investitionsentscheidungen von Einzelindustrien sowie deren Handlungsmöglichkeiten. Diese Art des Modellverbunds gekoppelt mit einer Akteursanalyse im Industriesektor stellt zum Kenntnisstand der Antragsteller eine Neuheit dar. Methodische Weiterentwicklungen werden in mehreren Teilmodellen erzielt und erlauben neuartige Erkenntnisse. Die Attraktivität spiegelt sich außerdem darin wieder, dass sehr unterschiedliche Aspekte im Industriesektor aufgegriffen werden. Dies ist aufgrund der hohen Heterogenität der Unternehmen sowie Differenzierung nach Branchen und Sektoren aber auch Akteuren notwendig. Weiterhin wird durch die Kopplung der unterschiedlichen Modelle ein Analyseframework geschaffen, das die Analyse der unterschiedlichen Perspektiven auf Transformationspfade in der Industrie bzw. einzelner Unternehmen im Zusammenspiel mit dem gesamten Energiesystem ermöglicht.

---

<sup>1</sup> Ringkjøb, Hans-Kristian; Haugan, Peter M.; Solbrekke, Ida Marie (2018): A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 96, S. 440–459. DOI: 10.1016/j.rser.2018.08.002.

#### 1.4.1 Angabe zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Für die Durchführung des Vorhabens wurde das bestehende Strommarktmodell PowerFlex-Grid-EU des Öko-Instituts verwendet und bzgl. der in diesem Vorhaben neu hinzugekommenen Anforderungen weiterentwickelt. Die in diesem Projekt vorgenommene Modellerweiterung fokussiert auf die Abbildung von

- Last-Dekomposition
- Lastmanagementoptionen
- Hybrider Wärmebereitstellung
- Regelenergie

Das Strommarktmodell PowerFlex ist als lineares Optimierungsproblem in der Programmiersprache GAMS1 implementiert und wird von dem Cplex Solver der Firma ILOG gelöst. Für die Modellierungssoftware und den Solver liegt eine Abteilungslizenz für bis zu 20 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Öko-Instituts vor. Die Optimierung wird auf einem Modellserver des Öko-Instituts durchgeführt, der über ausreichend Arbeitsspeicher verfügt, um große lineare Probleme oder auch gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme zu lösen.

Die Open-Source Implementierung der Methodik zur Abbildung der Bereitstellung von Regelenergie wurde in PyPSA durchgeführt, einem offen lizenzierten Framework für die Modellierung von Energiesystemen<sup>2</sup>. Für die interaktive Darstellung der Ergebnisse wurde streamlit verwendet, ein Python-basiertes Framework zum Erstellen von Webapps<sup>3</sup>.

#### 1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Das Öko-Institut verfügt über Zugänge zu den gängigen wissenschaftlichen Publikationsdatenbanken (z.B. Elsevier). Die im Rahmen des Projektes recherchierte relevante Literatur wurde in unser Literaturverwaltungsprogramm CITAVI eingepflegt und ausgewertet.

Die folgende Fachliteratur wurde im Rahmen des Projektes verwendet:

---

<sup>2</sup> <https://pypsa.org/>

<sup>3</sup> <https://streamlit.io/>

- acatech: Optimierungsmodell REMod-D. Online verfügbar unter [https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user\\_upload/Publikationen/PDFs/ESYS\\_Materialien\\_Optimierungsmodell\\_REMod-D.pdf](https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Materialien_Optimierungsmodell_REMod-D.pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2021.
- Adams, William C. (2015): Conducting Semi-Structured Interviews. In: Kathrin E. Newcomer, Harry P. Hatry und Joseph S. Wholey (Hg.): Handbook of Practical Program Evaluation. 4. Aufl. New Jersey: Jossey-Bass, S. 492–505, zuletzt geprüft am 16.01.2024.
- Agora Energiewende und Wuppertal Institut (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin.
- Agora Energiewende (Agora) (2024): EU policies for climate neutrality in the decisive decade. Hg. v. Agora Energiewende, Agora Agriculture, Agora Industrie und Agora Industry. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2023/2023-05\\_EU\\_Big\\_Picture\\_2040/A-EW\\_318\\_EU\\_Big\\_Picture\\_full\\_report\\_2024\\_WEB.pdf](https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projects/2023/2023-05_EU_Big_Picture_2040/A-EW_318_EU_Big_Picture_full_report_2024_WEB.pdf), zuletzt geprüft am 02.10.2024.
- Agora Industrie (Hg.) (2022): Power-2-Heat. Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie. Online verfügbar unter [https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-05\\_IND\\_DE-P4Heat/A-EW\\_269\\_Power-2-Heat\\_WEB.pdf](https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021-05_IND_DE-P4Heat/A-EW_269_Power-2-Heat_WEB.pdf), zuletzt geprüft am 03.04.2023.
- Agora-Industrie (2018): Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. IKEM; BBH; Navigant; Wuppertal Institut. Berlin.
- Aldy, Joseph E.; Bento, Nuno; Gianfrate, Gianfranco (2021): National Climate Policies and Corporate Internal Carbon Pricing. In: *The Energy Journal* 42 (5), S. 87–98.
- Alexander Sauer, Eberhard Abele, Hans Ulrich Buhl (2019): Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Hg. v. FRAUNHOFER VERLAG. Fraunhofer IPA. Stuttgart.
- Andrej Guminski; Tobias Hübner; Dr. Serafin von Roon; [matthias.schimmel@navigant.com](mailto:matthias.schimmel@navigant.com); [christian.achtelik@navigant.com](mailto:christian.achtelik@navigant.com); [jan.martin.rhiemeier@navigant.com](mailto:jan.martin.rhiemeier@navigant.com) et al.: Energiewende in der Industrie.
- Ausfelder, Florian (Hg.) (2015): Diskussionspapier Elektrifizierung chemischer Prozesse. DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie. Frankfurt, Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Bähr, Cornelius; Bothe, David; Brändle, Gregor; Klink, Hilmar; Lichtblau, Karl; Sonnen, Lino; Zink, Benita (2023): Die Zukunft energieintensiver Industrien in Deutschland. Eine Studie von IW Consult und Frontier Economics im Auftrag des Dezernat Zukunft. Hg. v. Dezernat Zukunft. IW Consult; Frontier Economics. Köln. Online verfügbar unter [https://www.dezernatzukunft.org/wp-content/uploads/2023/08/Baehr-et-al.-2023-Die-Zukunft-energieintensiver-Industrien-in-Deutschland\\_v2.pdf](https://www.dezernatzukunft.org/wp-content/uploads/2023/08/Baehr-et-al.-2023-Die-Zukunft-energieintensiver-Industrien-in-Deutschland_v2.pdf), zuletzt geprüft am 31.08.2023.
- Bataille, Chris; Åhman, Max; Neuhoff, Karsten; Nilsson, Lars J.; Fishedick, Manfred; Lechtenböhmer, Stefan et al. (2018): A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. In: *Journal of Cleaner Production* 187, S. 960–973. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.107.
- BBS (2020): BBS-Zahlenspiegel 2020. Daten und Fakten zur Baustoff-Steine-Erden-Industrie. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user\\_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Konjunktur/2020-06-11\\_BBS\\_Zahlenspiegel.pdf](https://www.baustoffindustrie.de/fileadmin/user_upload/bbs/Dateien/Downloadarchiv/Konjunktur/2020-06-11_BBS_Zahlenspiegel.pdf).
- BDI (2022): Umbau von Industrieanlagen für Klimaschutz stärker in Blick nehmen. Sieben Punkte Plan zur Beschleunigung des Planungs- und Genehmigungs-marathons. BDI. Berlin, zuletzt geprüft am 05.12.2022.
- Beucker, Severin; Doderer, Hannes; Koch, Christopher; Kondziella, Hendrik; Hartung, Jörn; Maeding, Sandra et al. (2020): Flexibilität, Markt und Regulierung. Synthesebericht. Hg. v. WindNODE. Online verfügbar unter [https://www.windnode.de/fileadmin/Daten/Downloads/FMR\\_ES.pdf](https://www.windnode.de/fileadmin/Daten/Downloads/FMR_ES.pdf), zuletzt geprüft am 09.08.2021.
- BMWi (2019): Handlungskonzept Stahl. Für eine starke Stahlindustrie in Deutschland und Europa! Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=12](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/handlungskonzept-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=12).
- BMWK (2024): Klimaschutzverträge erklärt. Verträge für den Klimaschutz und den Industriestandort Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter [https://www.klimaschutzvertraege.info/thema/allgemeine\\_informationen\\_ksv](https://www.klimaschutzvertraege.info/thema/allgemeine_informationen_ksv), zuletzt geprüft am 02.08.2024.

- Böhm, Ulrike; Hildebrandt, Alexandra; Kästle, Stefanie (Hg.) (2023): Klimaneutralität in der Industrie. Aktuelle Entwicklungen - Praxisberichte - Handlungsempfehlungen. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=7209167>.
- Boston Consulting Group (Hg.) (2021): Klimapfade 2.0. Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gutachten für den BDI, zuletzt geprüft am 13.04.2022.
- Bruyn, Sander de; Jongsma, Chris; Kampman, Bettina; Görlach, Benjamin; Thie, Jan-Erik (2020): Energy-intensive industries. Challenges and opportunities in energy transition. Hg. v. European Parliament's committee on Industry, Research and Energy. Luxembourg.
- Bundes-Klimaschutzgesetz (15.07.2024). KSG.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (o. D.): Dekarbonisierung der Industrie. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/dekarbonisierung-der-industrie.html>, zuletzt aktualisiert am 12.12.2024, zuletzt geprüft am 12.12.2024.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (Hg.) (2023): Industriepolitik in der Zeitenwende. Industriestandort sicher, Wohlstand erneuern, Wirtschaftssicherheit stärken. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industriepolitik-in-der-zeitenwende.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industriepolitik-in-der-zeitenwende.pdf?__blob=publicationFile&v=10), zuletzt geprüft am 25.10.2023.
- Bundesverband der deutschen Industrie (BDI) (Hg.) (2024): Transformationspfade für das Industrieland Deutschland. Boston Consulting Group (BCG); Institut der deutschen Wirtschaft Köln (IW). Berlin, zuletzt geprüft am 11.09.2024.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (bdew) (2024): BDEW-Strompreisanalyse Februar 2024. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (bdew). Berlin. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, zuletzt aktualisiert am 25.06.2024, zuletzt geprüft am 25.06.2024.
- Chan, Yeen; Petithuguenin, Laurent; Fleiter, Tobias; Herbst, Andres; Arens, Marlene; Stevenson, Paul (2019): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry. Part 1: Technology analysis. Hg. v. ICF Consulting Services Limited. London. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial\\_innovation\\_part\\_1\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial_innovation_part_1_en.pdf), zuletzt geprüft am 09.08.2021.
- Chiappinelli, Olga; Erdmann, Katharina; Gerres, Timo; Haussner, Manuel; Juergens, Ingmar; Neuhoff, Karsten et al. (2020): Industrial Innovation: Pathways to deep decarbonisation of Industry Part 3: Policy implications. Hg. v. DIW. Berlin. Online verfügbar unter [https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial\\_innovation\\_part\\_3\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/strategies/2050/docs/industrial_innovation_part_3_en.pdf).
- Chiappinelli, Olga; Gerres, Timo; Neuhoff, Karsten; Lettow, Frederik; Coninck, Heleen de; Felsmann, Balázs et al. (2021): A green COVID-19 recovery of the EU basic materials sector: identifying potentials, barriers and policy solutions. In: *Climate Policy*, S. 1–19. DOI: 10.1080/14693062.2021.1922340.
- Deason, Jeff; Wei, Max; Leventis, Greg; Smith, Sarah Josephine; Schwarz, Lisa C. (2018): Electrification of buildings and industry in the United States: Drivers, barriers, prospects, and policy approaches. Berkeley Lab.
- DECHEMA (2019): Roadmap Chemie 2050. Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. Berlin. Online verfügbar unter [https://dechema.de/dechema\\_media/Downloads/Positionspapiere/2019\\_Studie\\_Roadmap\\_Chemie\\_2050-p-20005590.PDF](https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Studie_Roadmap_Chemie_2050-p-20005590.PDF).
- Dezernat Zukunft (Hg.) (2023): Die Zukunft der energieintensiven Industrien in Deutschland. Zwischenbericht: Energiekosten energieintensiver Industrien auf dem Weg in die Klimaneutralität – ein internationaler Vergleich. Frontier Economics; IW Consult. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.dezernatzukunft.org/wp-content/uploads/2023/03/Zukunft-der-energieintensiven-Industrien-Zwischenbericht-Maerz-2023-Frontier\\_IW\\_DZ.pdf](https://www.dezernatzukunft.org/wp-content/uploads/2023/03/Zukunft-der-energieintensiven-Industrien-Zwischenbericht-Maerz-2023-Frontier_IW_DZ.pdf), zuletzt geprüft am 19.04.2023.
- Die Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Die Bundesregierung. Berlin.
- Dietmar Schuewer, Clemens Schneider: Electrification of industrial process heat: long-term applications, potentials and impacts. Online verfügbar unter [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7037/file/7037\\_Schuewer.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7037/file/7037_Schuewer.pdf), zuletzt geprüft am 07.07.2021.

- Erbach, Gregor; Foukalová, Nela (2022): Review of the EU ETS. Hg. v. Members Research Service. Online verfügbar unter [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698890/EPRS\\_BRI\(2022\)698890\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698890/EPRS_BRI(2022)698890_EN.pdf), zuletzt geprüft am 17.01.2023.
- Fahl, Ulrich; Hufendiek, Kai; Kittel, Lena; Siegle, Jonathan; Pahle, Michael; dem Moore, Nils aus et al. (2021): Industrierende: Wettbewerbseffekte und Carbon Leakage. Neue Politikmaßnahmen im Zuge des Europäischen Green Deal. Hg. v. PIK. Potsdam. Online verfügbar unter [https://ariadneprojekt.de/media/2021/07/Ariadne\\_Kurzdossier\\_WettbewerbsfaehigkeitCarbonLeakage\\_Juli\\_2021.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2021/07/Ariadne_Kurzdossier_WettbewerbsfaehigkeitCarbonLeakage_Juli_2021.pdf), zuletzt geprüft am 09.08.2021.
- Fleiter, Tobias; Fehrenbach, Daniel; Worrell, Ernst; Eichhammer, Wolfgang (2012): Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. In: *Energy* 40 (1), S. 84–99. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.025.
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias (2022): Instrumente für eine klimaneutrale Industrie - Eine modellgestützte Szenarioanalyse des aktuellen Instrumentenmixes. Hg. v. Kopernikus-Projekt Ariadne. Potsdam. Online verfügbar unter [https://ariadneprojekt.de/media/2022/10/Ariadne-Analyse\\_Politikinstrumente-Industrie\\_Oktober2022.pdf](https://ariadneprojekt.de/media/2022/10/Ariadne-Analyse_Politikinstrumente-Industrie_Oktober2022.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali; Schwotzer, Christian et al. (2023a): CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärmeerzeugung. Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI); Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen University. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161\\_2023\\_texte\\_prozess\\_waermepumpen\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161_2023_texte_prozess_waermepumpen_0.pdf), zuletzt geprüft am 21.12.2023.
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Hirzel, Simon; Neusel, Lisa; Aydemir, Ali; Schwotzer, Christian et al. (2023b): Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Kurztitel: CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärmeerzeugung. Endbericht. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Fraunhofer ISI; Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB) der RWTH Aachen University. Dessau-Roßlau (Texte, 161/2023). Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161\\_2023\\_texte\\_prozess\\_waermepumpen\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161_2023_texte_prozess_waermepumpen_0.pdf), zuletzt geprüft am 22.10.2024.
- Fleiter, Tobias; Rehfeldt, Matthias; Manz, Pia; Neuwirth, Marius; Herbst, Andrea; Lotz, Thurid (2024): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Orientierungsszenarien 2045 - Industriesektoree. Fraunhofer ISI; Aachen; ifeu; TU Berlin. Karlsruhe, Berlin, Heidelberg, Aachen.
- Fleiter, Tobias; Schломann, Barbara (Hg.) (2013): Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen industrieller Prozesstechnologien. Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. (ISI-Schriftenreihe „Innovationspotenziale“). Online verfügbar unter <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-234719.html>.
- Fraunhofer ISI (2024): Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Hg. v. Agora-Industry. Karlsruhe.
- FutureCamp (2021): Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland. Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche bis 2050. Hg. v. Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie. Berlin. Online verfügbar unter [https://ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel\\_24\\_110321\\_Web\\_200dpi\\_1.pdf](https://ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel_24_110321_Web_200dpi_1.pdf), zuletzt geprüft am 05.12.2022.
- Germanwatch (2022): Effektive Stromnetzentgelte für die Transformation. Den Weg zur Klimaneutralität innovativ und sozial gerecht gestalten. Germanwatch. Berlin.
- Gorbach, O. G.; Thomsen, J. (2022): Comparing the Energy System of a Facility with Uncertainty. In: *Energies*, S. 15.
- Grave, Katharina: Strompreise und Stromkosten ausgewählter Industrien. Online verfügbar unter [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2014/Industriestrompreise\\_Stromkosten.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2014/Industriestrompreise_Stromkosten.pdf), zuletzt geprüft am 15.07.2021.
- Griebhammer, Rainer; Brohmann, Bettina (2015): Wie Transformation und gesellschaftliche Innovationen gelingen können. Umweltbundesamt. Dessau.
- Grosse, Benjamin; Werner, Yannick; Held, Dennis; Selinger, Joschka; Schäfer-Stradowsky, Simon; Müller-Kirchenbauer, Joachim (2020): Bewertung regulatorischer Maßnahmen der Sektorenkopplung für den Einsatz von Power-to-Heat. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft* 44, S. 261–274.

- Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2014): A comprehensive model for the German electricity and heat sector in a future energy system with a dominant contribution from renewable energy technologies— Part I: Methodology. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30, S. 1003–1018. DOI: 10.1016/j.rser.2013.09.012.
- Hildingsson, Roger; Kronsell, Annica; Khan, Jamil (2018): The green state and industrial decarbonisation. In: *Environmental Politics* 28 (5).
- IN4climate.NRW (Hg.) (2021a): Industriewärme Klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Gelsenkirchen. Online verfügbar unter [https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse\\_IN4climate.NRW/2021/diskussionspapier-klimaneutrale-waerme-industrie-cr-in4climatenrw.pdf](https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/diskussionspapier-klimaneutrale-waerme-industrie-cr-in4climatenrw.pdf), zuletzt geprüft am 24.10.2022.
- IN4climate.NRW (2021b): Industriewärme Klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme. IN4climate.NRW. Düsseldorf.
- IN4climate.NRW (2022): Prozesswärme für eine klimaneutrale Industrie. Impulspapier der Initiative IN4climate.NRW. IN4climate.NRW. Düsseldorf.
- Jannasch, Anna-Karin; Pihl, Hjalmar; Persson, Mattias; Svensson, Elin; Harvey, Simon; Wiertzema, Holger (2020): Opportunities and barriers for implementation of Power-to-X (P2X) technologies in the West Sweden Chemicals and Materials Cluster’s process industries. Research Institutes of Sweden. Gothenburg.
- Johnstone, P.; Kivimaa, P. (2017): Multiple dimensions of disruption, energy transitions and industrial policy. In: *Energy Research and Social Science*.
- Johnstone, P.; Rogge, Karoline S.; Kivimaa, Paula; Fratini, Chiara Farné; Primmer, Eeva (2017): Disruptive innovation meets industrial policy: insights from energy transitions in Denmark and the UK. University of Sussex. Sussex. Online verfügbar unter <http://smartenergytransition.fi/wp-content/uploads/2017/12/Johnstone-et-al-Industrial-policy-meets-disruption.pdf>, zuletzt geprüft am 10.12.2024.
- Kim, Jinsoo; Sovacool, Benjamin, K.; Bazilian, Morgan; Griffiths, Steve; Junghwan, Lee; Yang, Minyoung; Lee, Jordy (2022): Decarbonizing the iron and steel industry: A systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options. In: *Energy Research & Social Science* 89. Online verfügbar unter <https://drive.google.com/file/d/1THtHj9tlf4xfhhPCypuKtmw729bFCFAh/view>.
- Klaus, Jacob; Graaf, Lisa; Wolff, Franziska; Heyen, Dirk Arne; Brohmann, Bettina; Griebhammer, Rainer (2020): Transformative Umweltpolitik: Ansätze zur Förderung gesellschaftlichen Wandels. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau.
- Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (kei) (Hg.) (2024): Flexibilisierung elektrifizierter Industrieprozesse. Eine Analyse der technischen und ökonomischen Herausforderungen aus Unternehmens- und Systemperspektive. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); RWTH Aachen. Cottbus. Online verfügbar unter [https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916\\_KEI\\_Studie\\_FlexIPro\\_final\\_barrierefrei.pdf](https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916_KEI_Studie_FlexIPro_final_barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 01.10.2024.
- König, Werner (2020): Energy efficiency in industrial organizations – A cultural-institutional framework of decision-making. In: *Energy Research & Social Science* 67, S. 101483. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101483.
- Kronsell, Annica; Bäckstrand, Katrin (2017): The Green State Revisited. In: Katrin Bäckstrand und Annica Kronsell (Hg.): *Rethinking the Green State. Environmental governance towards climate and sustainability transitions*: Routledge.
- Lechtenböhmer, Stefan; Nilsson, Lars J.; Åhman, Max; Schneider, Clemens (2016): Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – Implications for future EU electricity demand. In: *Energy* 115, S. 1623–1631. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.110.
- Lilliestam, Johan; Patt, Anthony; Bersalli, Germán (2021): The effect of carbon pricing on technological change for full energy decarbonization: A review of empirical ex-post evidence. In: *WIREs Climate Change* 12 (1), Artikel e681. DOI: 10.1002/wcc.681.
- Löbbe, Sabine; König, Werner; Büttner, Stefan; Schneider, Christian (2019): Entscheidung für Energieeffizienz : Auswirkungen von Kultur, Verhalten und Technikdiffusion in produzierenden KMU in Baden-Württemberg.
- Madeddu, Silvia; Ueckerdt, Falko; Pehl, Michaja; Peterseim, Juergen; Lord, Michael; Kumar, Karthik Ajith et al. (2020): The CO2 reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat). In: *Environ. Res. Lett.* (15).

- Mallapragada, Dharik S.; Dvorkin, Yury; Modestino, Miguel A.; Esposito, Daniel V.; Smith, Wilson A.; Hodge, Bri-Mathias et al. (2023): Decarbonization of the chemical industry through electrification: Barriers and opportunities. In: *Joule* 7 (1), S. 23–41. DOI: 10.1016/j.joule.2022.12.008.
- Marcu, Andrei; Vangenechten, Domien; Alberola; Emilie; Olsen, Jahn; Schleicher, Stefan et al. (2021): 2021 Bericht zum Stand des EU-ETS. ERCST; Bloomberg NEF; Wegener Center; Uni Graz; ecoact. Online verfügbar unter [https://ercst.org/wp-content/uploads/2021/05/20210506-DE\\_2021-State-of-the-EU-ETS-Report\\_JH61.pdf](https://ercst.org/wp-content/uploads/2021/05/20210506-DE_2021-State-of-the-EU-ETS-Report_JH61.pdf), zuletzt geprüft am 17.01.2023.
- Mazzucato, Mariana (2013): *The Entrepreneurial State: Debunking Public vs. Private Sector Myths*. Hg. v. Anthem Press. London.
- Mazzucato, Mariana (2015): *The Green Entrepreneurial State*. University of Sussex. Sussex (SPRU Working Paper Series).
- Prognos; Boston Consulting Group (BCG); Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI); Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung (Fraunhofer ISI); Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) (2022): Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien. Studie für Stiftung Klimaneutralität (SKN), Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI), Deutsche Energie-Agentur (dena) und Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Berlin. Online verfügbar unter [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/Vergleich\\_der\\_Big\\_5\\_Klimaneutralitaetsszenarien.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2022/Vergleich_der_Big_5_Klimaneutralitaetsszenarien.pdf), zuletzt geprüft am 30.03.2022.
- Rehfeldt, Matthias; Bußmann, Simon; Fleiter, Tobias (2024): Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Agora Industry. Berlin.
- Richardson-Barlow, Clare; Pimm, Andrew J.; Taylor, André D.; Gale (2022): Policy and pricing barriers to steel industry decarbonisation: A UK case study. In: *Energy Policy* 168.
- Rockström, Johan; Steffen, Will; Noone, Kevin; Persson, Asa; Chapin, F. Stuart; Lambin, Eric F. et al. (2009): A safe operating space for humanity. In: *Nature* 461.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2015): 10 Thesen zur Zukunft der Kohle bis 2040. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin.
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (2016): *Vorreiterpolitik für eine ökologische Transformation*. Hg. v. Sachverständigenrat für Umweltfragen. Berlin.
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (2022): *Energiekrise solidarisch bewältigen, neue Realität gestalten. Jahresgutachten. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung*. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/jg202223/JG202223\\_Gesamtausgabe.pdf](https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/jg202223/JG202223_Gesamtausgabe.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Salamone, Juliana; Mattsson, Johanna; Olsson, Marcus; Wisbey, Philippa (2020): Breaking down barriers - a sustainable transition for cement through collaboration with the construction sector. Blekinge Institute of Technology. Karlskrona, Sweden.
- Sovacool, Benjamin, K.; Iskandarova, Marfuga; Hall, Jeremy (2023): Industrializing theories: A thematic analysis of conceptual frameworks and typologies for industrial sociotechnical change in a low-carbon future. In: *Energy Research & Social Science* 91.
- Statistisches Bundesamt (2008): *Klassifikation der Wirtschaftszweige. Mit Erläuterungen*.
- Statistisches Bundesamt (2019): *Energieverbrauch der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Nutzung des Energieverbrauchs, Wirtschaftszweige, Energieträger. Tabelle: 43531-0001*. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, zuletzt aktualisiert am 18.06.2021, zuletzt geprüft am 11.11.2021.
- stephan: DocHdl1OnPTRSERVERtmpTarget. Online verfügbar unter [https://cefic.org/app/uploads/2019/01/Low-carbon-energy-and-feedstock-for-the-chemical-industry-DECHEMA\\_Report-energy\\_climate.pdf](https://cefic.org/app/uploads/2019/01/Low-carbon-energy-and-feedstock-for-the-chemical-industry-DECHEMA_Report-energy_climate.pdf), zuletzt geprüft am 30.06.2021.
- Stiftung 2° (2019): „Ein ambitioniereres Klimaschutzgesetz als Chance für Innovationen und Planungssicherheit“. Positionspapier der Stiftung 2° im Rahmen der „Unternehmerinitiative Klimaschutzgesetz“. Stiftung 2°. Berlin. Online verfügbar unter [https://klimawirtschaft.org/wp-content/uploads/2022/02/190909\\_S2G\\_Positionspapier\\_Unternehmerinitiative\\_KSG.pdf](https://klimawirtschaft.org/wp-content/uploads/2022/02/190909_S2G_Positionspapier_Unternehmerinitiative_KSG.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Stoy, Sebastian Gregor (2022): *Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotentiale in der Industrie für Prozesswärme*. Bachelorarbeit. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg. Institut für Nachhaltige Technische Systeme.

- Thomsen, J.; Fuchs, N.; Meyer R.; Wanapinit, N.; Ulfers, J.; Bavia Bampi, B. et al. (2022): Bottom-Up Studie zu Pfadoptionen einer effizienten und sozialverträglichen Dekarbonisierung des Wärmesektors. Hg. v. Fraunhofer ISE und Fraunhofer IEE. Online verfügbar unter [https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2022/221222\\_Bottom\\_Up\\_Studie\\_final-1.pdf](https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2022/221222_Bottom_Up_Studie_final-1.pdf).
- Thomsen, Jessica (2017): Enhancing operation of decentralized energy systems by a regional economic optimization model DISTRICT. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/article/10.1007/s12667-017-0261-9>.
- Umweltbundesamt (UBA) (2022): Trendtabellen Treibhausgase nach Sektoren. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022\\_03\\_15\\_trendtabellen\\_thg\\_nach\\_sektoren\\_v1.0.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_03_15_trendtabellen_thg_nach_sektoren_v1.0.xlsx).
- United Nations (2015): Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations. New York.
- van Geem, Kevin; Weckhuysen, Bert M. (2021): Toward an e-chemistree: materials for electrification of the chemical industry. In: *MRS Bulletin* 46, S. 1187–1196.
- VCI (2021): Strompreise müssen sinken. Hg. v. VCI. Berlin. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/presse/mediathek/infografiken/strompreise-muessen-sinken.jsp>, zuletzt aktualisiert am 29.11.2022, zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- VDZ (2019): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf. Online verfügbar unter [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie\\_Dekarbonisierung\\_Zement\\_Beton\\_2020.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/VDZ-Studie_Dekarbonisierung_Zement_Beton_2020.pdf).
- VDZ (2022): Zementindustrie im Ueberblick 2021/2022. VDZ. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie\\_ueberblick/VDZ-Zementindustrie\\_im\\_Ueberblick\\_2021\\_2022.pdf](https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ-Zementindustrie_im_Ueberblick_2021_2022.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- Verband der Chemischen Industrie (VCI) (2021): Notwendigkeit und Ausgestaltung eines Industriestrompreises. Verband der Automobilindustrie. Frankfurt. Online verfügbar unter <https://www.vci.de/ergaenzende-downloads/2021-05-06-vci-sn-industriestrompreis-final.pdf>, zuletzt geprüft am 07.03.2023.
- StromNEV, vom 22.12.2023 (2023): Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen.
- Wei, Max; McMillan, Colin A.; Du Lal Rue Can, Stephane de (2019): Electrification of Industry: Potential, Challenges and Outlook. In: *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* (6), S. 140–148. Online verfügbar unter [https://escholarship.org/content/qt5pt1p50g/qt5pt1p50g\\_noSplash\\_c1114e587d82cb6d56f7d32a7c183d37.pdf?t=ruqq6v](https://escholarship.org/content/qt5pt1p50g/qt5pt1p50g_noSplash_c1114e587d82cb6d56f7d32a7c183d37.pdf?t=ruqq6v).
- Wesseling, J. H.; Lechtenböhmer, S.; Åhman, M.; Nilsson, L. J.; Worrell, E.; Coenen, L. (2017): The transition of energy intensive processing industries towards deep decarbonization: Characteristics and implications for future research. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79, S. 1303–1313. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.156.
- who Richardson-Barlow, Clare; Pimm, Andrew J.; Taylor, Peter G.; Gale, William F. (2022): Policy and pricing barriers to steel industry decarbonisation: A UK case study. In: *Energy Policy* 168, S. 113100. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113100.
- Wolff, Franziska; Heyen, Dirk Arne; Brohmann, Bettina; Gießhammer, Rainer; Jacob, Klaus; Graaf, Lisa (2018): Transformative environmental policy. Consistently promote and shape sustainable development. A guide for the BMU's area of responsibility. Umweltbundesamt. Dessau.
- WV Stahl (2021): Ein Transformationsprogramm für die Stahlindustrie in Deutschland. 10 Forderungen an eine neue Bundesregierung für die ersten 100 Tage. WV Stahl. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl\\_Positionspapier\\_Transformationsprogramm\\_2021-RZ\\_Web.pdf](https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/WV-Stahl_Positionspapier_Transformationsprogramm_2021-RZ_Web.pdf), zuletzt geprüft am 29.11.2022.
- WWF (2023): Dirty Thirty. Industrial sector emissions in Germany. Hg. v. WWF und Öko-Institut. Öko-Institut. Berlin.
- Yang, Huiyu; Umair, Muhammad (2024): Polluting industries: Does green industrial policy encourage green innovation? Chinese perspective evidence. In: *Heliyon* 10 (17).

- Zachmann, Georg; Hirth, Lion; Heussaff, Conall; Schlecht, Ingmar; Mühlenpfordt, Jonathan; Eicke, Anselm (2023): The design of the European electricity market. Current proposals and ways ahead. Hg. v. European Parliament's committee on Industry, Research and Energy. Bruegel; Neon. Brussels.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektbearbeitung erfolgte durch die jeweiligen Projektpartner Fraunhofer ISE, Öko-Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH und die Hochschule Offenburg. Das Fraunhofer ISE koordinierte das Gesamtprojekt. Der inhaltliche Schwerpunkt des Fraunhofer ISE lag in der sektorübergreifenden Systemanalyse, der Szenarienerstellung, der lokalen Systemoptimierung einzelner Branchen sowie von Industriezusammenschlüssen, sowie der Akteursanalyse. Der Schwerpunkt des Öko-Instituts lag in der Entwicklung eines Lastdekompositionstools sowie der Analyse von Systemeffekten auf den Strommarkt durch Flexibilitätsbereitstellung. Der Schwerpunkt des INATECH lag in der Identifizierung des Flexibilitätpotenzials sowie der Marktabbildung von Flexibilitätsbereitstellung der Branchen Stahl und Zement sowie der Systemischen Effekte auf Dispatch und Netzausbau. Die Hochschule Offenburg hatte den Fokus auf der Generierung von elektrischen und thermischen Lastprofilen sowie der Bewertung der Total Cost of ownership unterschiedlicher Technologien der Branchen Stahl, Chemie und Zement.

Zusätzlich begleitete das Projekt ein Beirat mit Vertretern aus dem DIHK - Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. sowie dem Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.. Die Arbeiten des Projektes wurden auf den jährlichen Treffen des Forschungsnetzwerks „Systemanalyse“ vorgestellt und mit anderen Vertreter\*innen der Forschung diskutiert.

Das Öko-Institut e.V. hat das Forschungsvorhaben in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, der Universität Freiburg INATEC sowie der Hochschule Offenburg durchgeführt.

Darüber hinaus hat sich das Öko-Institut beim Forschungsnetzwerk Systemanalyse von BMWK und PTJ beteiligt. In diesem Rahmen hat das Öko-Institut Projektergebnisse bei den Präsenztreffen des Forschungsnetzwerks Systemanalyse im Jahr 2024 vorgestellt:

- 03-04 April 2024 | Forschungsnetzwerk Systemanalyse Berlin: Das Öko-Institut hat mit den Verbundpartner zusammen einen Workshop vorbereitet und durchgeführt. Das Öko-Institut hat Vorträge zu den Themen Flexibilitätsoptionen und -potenziale in der Industrie sowie unternehmensseitige Hemmnisse für die Elektrifizierung und Flexibilisierung beigetragen.

Im Rahmen von AP 2 wurde am 23.10.2023 einen interaktiven Workshop zum Thema „Wie können Unternehmen Klimaschutz leisten? Herausforderungen bei der Dekarbonisierung der energieintensiven Industrie“ durchgeführt. Dabei leitete das Öko-Institut eine Break-Out Session zum Thema „Regulatorische und techno-ökonomische Herausforderungen“. Der Workshop wurde im Rahmen der Veranstaltungsreihe der Schader-Stiftung „Dialog zwischen Gesellschaftswissenschaften und Praxis“ durchgeführt.

Das Öko-Institut hat im Rahmen dieses Projekts an folgenden weiteren Konferenzen und Veranstaltungen teilgenommen:

- 07.Juli 2022 Agora Energiewende Webinar „Power-2-Heat: Direkte Elektrifizierung von industrieller Prozesswärme“

- 05. Juni 2024 Agora Industry Webinar „Direct electrification of industrial process heat.
- 2022: 12 Stakeholder-Interviews zum Thema regulatorische und techno-ökonomische Hemmnisse einer Elektrifizierung. Davon 7 Interviews mit Personen von Interessenverbänden, 4 Interviews mit Forschenden sowie 1 Interview mit einer Person eines politischen Entscheidungsträgers
- 2024: ENERDAY 2024 - 18th International Conference on Energy Economics and Technology

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und die erzielten Ergebnisse im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Zuwendung wurde gemäß der Teilvorhabensbeschreibung verwendet. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Forschung dargestellt.

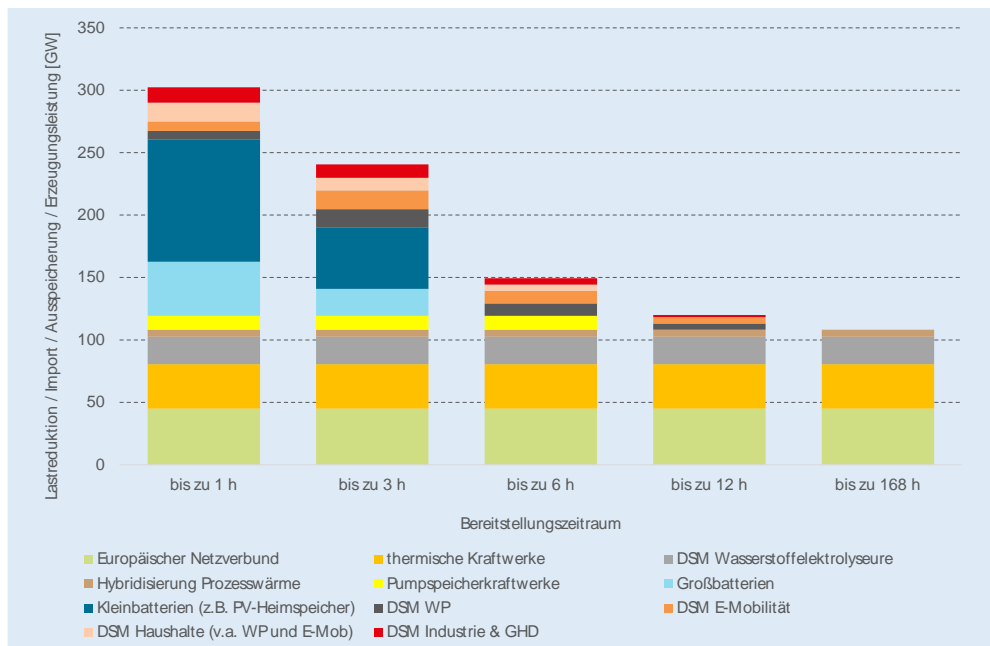
#### AP1

Zusammen mit den Projektpartnern wurde eine einheitliche Struktur zur Erfassung von Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenzialen in der Industrie entwickelt. Die notwendigen Eingangsparameter für das Modell „PowerFlex“ des Öko-Instituts wurden mit dem Fraunhofer ISE abgestimmt, was auch die Grundlage für die Datenschnittstellen in AP3 bildete. Das Öko-Institut führte eine umfassende Literaturlauswertung zu Flexibilisierungspotenzialen durch, deren Ergebnisse im Ergebnisbericht detailliert dargestellt sind.

Die Abbildung 1 zeigt das gesamt positive Flexibilitätspotenzial im Energiesystem für das Jahr 2045, welches durch Lastmanagement, hybride Wärmeerzeugung, Kraftwerke, Speicher und den Netzverbund für einen gewissen Zeitraum zur Verfügung gestellt werden kann<sup>4</sup>. Hierfür wurden Daten aus unterschiedlichen Quellen ausgewertet (FfE; Guidehouse 2021; 50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW 2023). Die einzelnen Potenziale stehen jedoch in einer konkreten Situation des Flexibilitätsbedarfs im Strommarkt nicht zwingend als Gesamtsumme zur Verfügung. Vielmehr ist davon auszugehen, dass einige Optionen (insbesondere PV-Heimspeicher oder zeitvariable Lastmanagementoptionen) zeitlich nicht immer verfügbar sind. Thermische Kraftwerke, Importe über den Europäischen Netzverbund sowie flexible Wasserstoff-Elektrolyseure können verlässlicher und über längere Zeiträume hinweg ein positives Flexibilitätspotenzial (d. h. Stromerzeugung, Stromimporte oder Lastreduktion) bereitstellen.

---

<sup>4</sup> Lastabwurfpotenziale in der Industrie werden gesondert ausgewiesen, weil sie nicht additiv zu den Potenzialen des Lastmanagements sind.

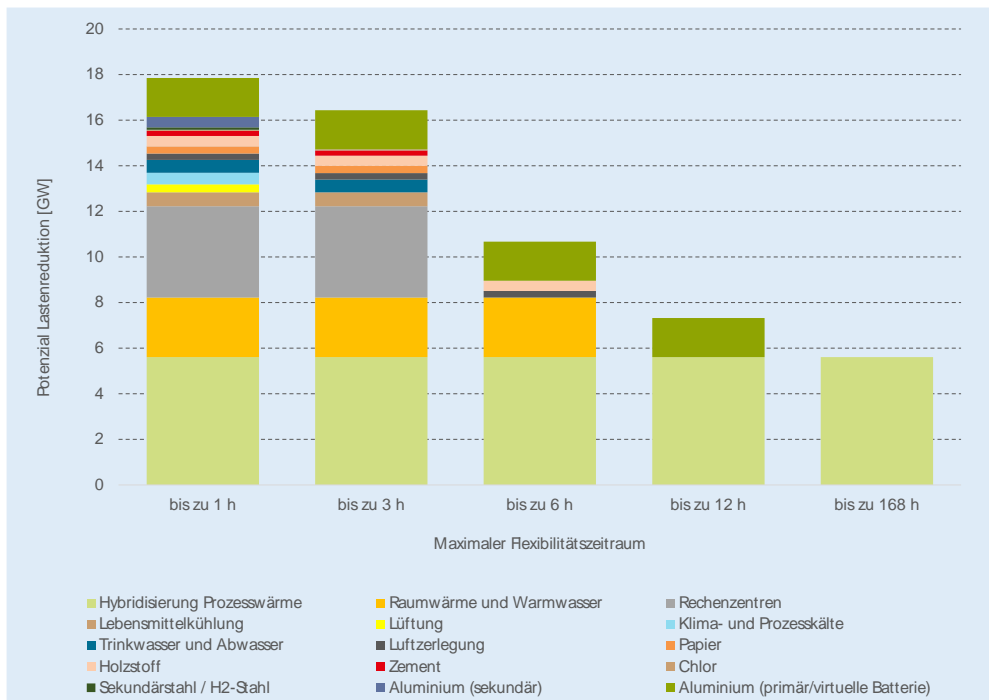
**Abbildung 1: Maximal nutzbares positives Flexibilitätpotenzial im Jahr 2045 – Gesamt**

**Quellen:** Daten für Lastmanagement in der Industrie (FfE; Guidehouse 2021); Thermische Kraftwerke, Pumpspeicherkraftwerke, Batteriespeicher, Wasserstoffelektrolyseure und Anzahl Wärmepumpen (BNetzA 2022, S. 4); Austauschkapazität im europäischen Netzverbund (50 Hertz; Amprion; TenneT; TransnetBW 2023, S. 50); Verfügbarkeitsfaktoren für zeitvariables Lastmanagement (Heitkoetter et al. 2021, Tabelle 3).

Es zeigt sich, dass Lastmanagementpotenziale in der Industrie und im Gewerbe im Vergleich zu den anderen Flexibilitätsoptionen nur geringe Potenziale zur Lastreduktion aufweisen. Der Anteil des Flexibilitätpotenzials der Industrie- und Gewerbe am Gesamtpotenzial liegt bei unter 5 %.

Innerhalb der Potenziale von Industrie- und Gewerbeprozessen stechen das Flexibilitätpotenzial zur Erzeugung von Raumwärme sowie der flexibilisierte Betrieb von Rechenzentren heraus (vergleiche Abbildung 2). Mehr als die Hälfte des Flexibilitätpotenzials in der Industrie und im Gewerbe entfällt auf diese zwei Prozesse. Die Lastmanagementpotenziale in der Industrie und im Gewerbe sind üblicherweise auf nur wenige Stunden begrenzt (Buhl et al. 2024).

**Abbildung 2: Maximal nutzbares positives Flexibilitätpotenzial im Jahr 2045 – Fokus Industrie und Gewerbe**



Quellen: Daten für Lastmanagement (FFE; Guidehouse 2021); eigene Annahmen bzgl. hybrider Prozesswärmebereitstellung

Das Potenzial für die **hybride Prozesswärmebereitstellung** kann nur schwer abgeschätzt werden. Grund dafür ist erstens, dass in Überkapazitäten investiert werden muss. Zum Beispiel muss neben einem Elektrodenkessel zusätzlich eine gasbasierte Option zur Verfügung stehen. Unter welchen Gegebenheiten und in welchem Ausmaß dies wirtschaftlich ist, beeinflusst maßgeblich das mögliche Potenzial. Zweitens bestehen weitere einschränkende Hemmnisse wie beispielsweise der Platzbedarf für zwei Technologien (z. B. Elektrodenheizkessel und Gas-Brenner). Auf der anderen Seite gibt es auch nicht-techno-ökonomisch Anreize für eine Hybridisierung wie beispielsweise die Reduktion von Risiken bzgl. der Energieträgerpreise oder Netzentgelte. Zukünftige Preisrisiken lassen sich durch die Investition in zwei parallele Prozesswärmebereitstellungsoptionen reduzieren.

Neuere Studien zur Flexibilität von Industrieprozessen nehmen zum Teil eine 100 %-ige Überbauung der Kapazitäten an (vgl. kei 2024). Die maximale Wärmelast kann in dem Fall entweder gänzlich von der strombasierten oder komplett von der gasbasierten Technologie gedeckt werden.

In der sektorenübergreifenden Gesamtsystemmodellierung mit REMod im Projekt IND-E ist keine Möglichkeit zur Überbauung von Kapazitäten (hybrider Anlagenpark) abgebildet. Um den Effekt der Hybridisierung in der Szenarioanalyse mit PowerFlex untersuchen zu können, wurden Annahmen zu Überbauung der Kapazitäten getroffen. Als Ergebnis der Investitionsmodellierung mit REMod wird Niedertemperaturwärme hauptsächlich von Wärmepumpen und Hochtemperaturwärme ausschließlich von Elektrodenkesseln bereitgestellt.

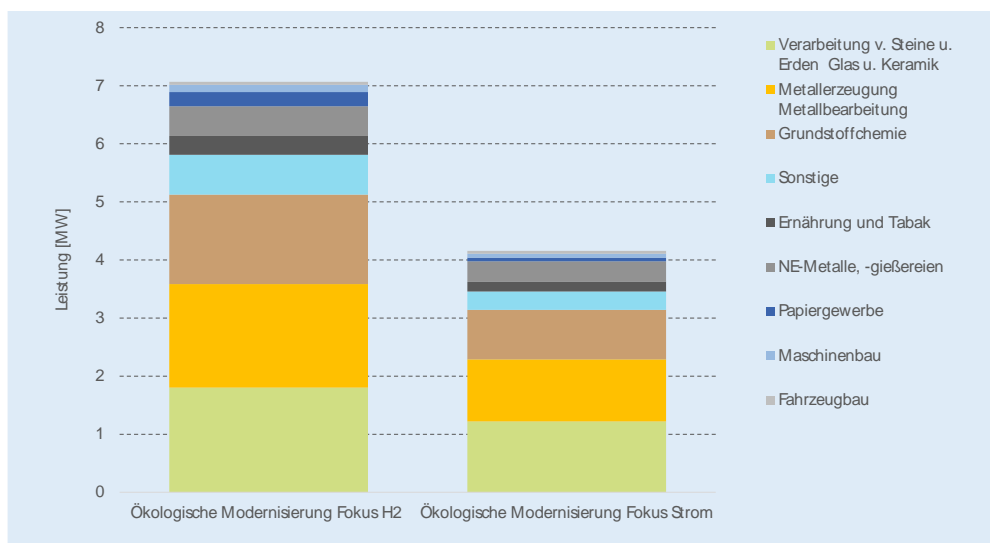
Zudem kommen Wasserstoffkessel und verbleibende Gaskessel zum Einsatz, die mit biogenem oder synthetischem Methan betrieben werden.

Um den Effekt der hybriden Prozesswärmebereitstellung analysieren zu können wurden im Rahmen der Modellierung mit PowerFlex folgende **Annahmen zur Überbauung der Kapazitäten** getroffen:

- Zur hybriden Deckung der Wärmenachfrage im Niedertemperaturbereich wird die Kapazität der **Wärmepumpen** um die Leistung der Wasserstoff- und Gaskessel erhöht. Die Erhöhung der Kapazität der Wärmepumpen beträgt dabei je nach Branche zwischen 2 und 13 Prozentpunkte im Vergleich zu den Ergebnissen der Investitionsmodellierung mit REMod.
- Zur hybriden Deckung der Wärmenachfrage im Hochtemperaturbereich wird die Kapazität der **Elektrodenkessel** um die Leistung der Wasserstoff- und Gaskessel erhöht. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Investitionsmodellierung wird die Kapazität der Elektrodenkessel je nach Branche zwischen 10 und 16 Prozentpunkten erhöht wird die vergleichsweise geringe Kapazität der Wasserstoffkessel verdoppelt.

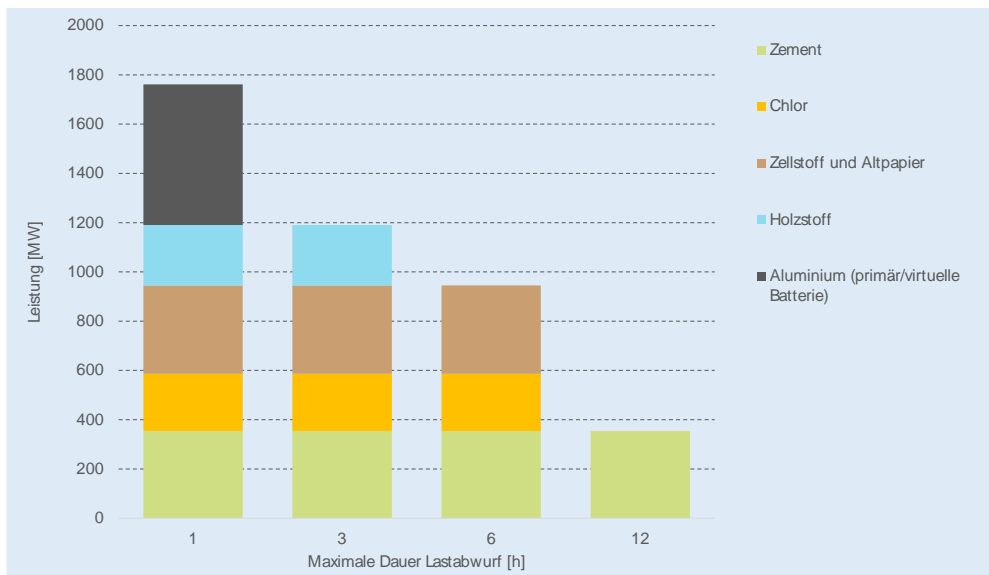
Durch diese Annahmen entsteht in Summe für das Jahr 2045 ein positives elektrisches Flexibilitätspotenzial von ca. 4,2 GW im Szenario direkt (Fokus auf direkte Elektrifizierung) und ca. 7,1 GW im Szenario indirekt (vermehrter Einsatz von strombasierten Gasen) (Abbildung 3). Dieses Potenzial geht in die Modellierung mit PowerFlex ein.

**Abbildung 3: Positives Flexibilitätspotenzial aufgrund von Investition in zusätzliche Wärmeerzeugungskapazitäten (Hybridisierung) für das Jahr 2045**



Neben positiven Lastmanagementpotenzialen besteht zudem im Ausnahmefall die Option des **Lastabwurfs**. Die im Industriesektor vorhandenen Lastabwurfpotenziale bestehen nur für wenige Stunden und belaufen sich in Summe auf knapp 1,8 GW (Abbildung 4). Diese Lastabwurfpotenziale sind jedoch nicht additiv zum Lastmanagementpotenzial zu verstehen: wird beispielsweise die Last einer Chlorelektrolyse ‚abgeworfen‘, so steht dieses Potenzial nicht parallel dem Lastmanagement zur Verfügung. Lastabwurf ist also nur in einzelnen Zeitschritten zusätzlich zur Lastreduktion im Rahmen des Lastmanagements durchführbar. Akteure im Strommarkt würden je nach Vertragssituation, Prozesssituation und möglichen Erlösen entscheiden, ob ein Lastabwurf oder Lastmanagement in Betracht kommt.

**Abbildung 4: Maximal nutzbares Lastabwurfpotenzial im Jahr 2045 – Industrie**



Quellen: Daten für Lastabwurf (FFE; Guidehouse 2021)

## AP2

Eine Übersicht von regulatorischen und techno-ökonomischen Hemmnissen der Elektrifizierung wurde basierend auf Literaturrecherche und Stakeholderinterviews erstellt und priorisiert. Diese Ergebnisse sind ebenfalls im Ergebnisbericht enthalten und werden derzeit in einem Open Access Papier veröffentlicht. Die Ergebnisse von AP 2.2 wurden in den Prozess der modellübergreifenden Szenariendefinition integriert und den Modellierenden vorgestellt.

Im Rahmen von IND-E wurden eine breite Literaturstudie sowie Stakeholder-Interviews durchgeführt, um techno-ökonomische Barrieren und Hemmnisse für eine industrielle Elektrifizierung zu erfassen. Dabei wurden Vertreter\*innen von Interessenverbänden, Forschung und politischen Entscheidungsträger\*innen befragt. Die Befragung dieser Multiplikatoren ergänzte die durchgeführten Interviews auf Unternehmensebene, die ebenso in diesem Kapitel vorgestellt wurden. Dadurch konnten verschiedene Perspektiven auf die Elektrifizierung von Prozessen in Unternehmen aufgegriffen werden. Für die Kontextualisierung der Interviews ist zu nennen, dass diese im Jahr 2022 während der Energiepreiskrise durchgeführt wurden.

Zwischen den beiden Interviewstudien konnten sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede herauskristallisieren und genannte Barrieren wurden bestätigt oder widerlegt. Insbesondere die Hemmnisse hoher Strompreise und eines mangelnden Ausbaus erneuerbarer Energien und der Stromnetze konnte in beiden Untersuchungen bestätigt werden.

Stakeholder nannten eine große Bandbreite zentraler Hemmnisse für die Elektrifizierung der Industrie. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt und können in die Kategorien Betriebskosten, Investitionen und nicht-finanzielle Hemmnisse unterteilt werden. Basierend auf den Erkenntnissen der Interviews wurden die Hemmnisse anhand ihres Schweregrads und der Häufigkeit ihrer Nennung bewertet.

### Abbildung 5: Darstellung der in den Interviews thematisierten und gewichteten Hemmnisse einer Elektrifizierung.

Betriebskosten		Investitionen		Nicht-finanzielle	
Hohe Strompreise	--	Hohe Investitionskosten und lange Amortisationszeiten	-	Verfügbarkeit erneuerbarer Energien	--
Strommarktdesign und Kopplung des Gas und Strompreises	-	Finanzieller Fokus der Berichterstattung	(-)	Begrenzter technologischer Entwicklungsstand	-
Steuern, Abgaben und Umlagen des Strompreises	-	Fehlende Investitionsmittel	(-)	Begrenzte Kapazität des Netzanschlusses	-
Fehlende Lenkungswirkung des EU ETS	(-)	Steuerausnahmen und Förderung von KWK-Anlagen	(-)	Mangelnde Kapazität von BImSchG-Genehmigungsbehörden	(-)
Niedrige und volatile Zertifikatspreise	(-)				
Freie Zuteilung von Zertifikaten	(-)				
Netznutzungskosten	-				
Leistungspreis	-				
§19 (2) Stromnetzentgelteverordnung	-				

Als ein zentrales Hindernis einer Elektrifizierung wird von Stakeholdern die Höhe der Strompreise im Verhältnis zu Erdgaspreisen wahrgenommen. So ist laut Stakeholdern unter heutigen Rahmenbedingungen die Erzeugung von Wärme basierend auf Erdgas kosteneffizienter als der Einsatz von strombasierten Technologien. Zwar seien strombasierte Technologien in der Regel effizienter, die höheren Energiekosten können sie hingegen nicht aufwiegen. Strombasierte Technologien seien daher in vielen Fällen nicht wirtschaftlich im Vergleich zur fossilen Alternative. In diesem Rahmen wurden von Stakeholdern das heutige Strommarktdesign und die zeitweise Kopplung von Erdgas- und Strompreis als Hemmnis bezeichnet.

Als zentrales Instrument wurde von Stakeholdern CCfDs erachtet. Durch CCfDs können sich Unternehmen die Mehrkosten von Investitionen und des Einsatzes strombasierter Technologien von staatlicher Seite fördern lassen, wenn diese zur Emissionsreduktion unter der Verwendung von Grünstrom beitragen. Dazu wurde vereinzelt die Sorge geäußert, dass eine Vergabe der Förderung basierend auf deren Klimaschutzwirksamkeit dazu führen könnte, dass einzelne Unternehmen mit potenziell geringer Emissionseinsparung pro Euro Förderung im Wettbewerb um die Förderung ausscheiden.

Für die energieintensive Industrie wurden Strompreisbestandteile und Stromnetzentgelte als geringes Hemmnis erachtet, da in diesem Bereich verschiedene Ausnahmen für industrielle Verbraucher existieren. Bei Verbrauchern ohne diese Privilegien stellen diese Kosten hingegen sehr wohl ein Hemmnis dar. Insbesondere die Netzentgelte werden als problematisch erachtet. Denn die Netzentgelte können dazu beitragen, dass der Strompreis signifikant erhöht wird, was sich zu Ungunsten einer Elektrifizierung auswirken kann. Die Wirkung des EU-ETS 1 wurde hingegen als ausreichend erachtet, um langfristig einen Wechsel von fossilen Energieträgern hin zu Strom anzustoßen.

Im Bereich der Investitionskosten würden Unternehmen vor den höheren Investitionskosten strombasierter Technologien zurückschrecken. Auch sei problematisch, dass längere Amortisationszeiten strombasierter Technologien den bisherigen gewohnten kurzfristigen Investitionslogiken entgegenlaufen. Um diese Hindernisse zu überwinden, können staatliche Anschubfinanzierungen oder CCfDs helfen und so Investitionen in strombasierte Technologien, wie etwa Wärmepumpen, elektrische Boiler oder Infrarot-Strahler, attraktiver machen.

Darüber hinaus wurden nur wenige Hürden von Stakeholdern benannt. Vereinzelt wurde berichtet, dass die Berichterstattung von Unternehmen auf finanziellen Erfolg fokussieren würde und Nachhaltigkeit nicht berücksichtige. Diese Hürde wurde jedoch auf europäischer Ebene bereits durch die Corporate Sustainability Reporting Directive adressiert. Fehlende Investitionsmittel seitens der Unternehmen wurden ebenso als gering wirkendes Hemmnis bezeichnet, da es im Kapitalmarkt leicht möglich sei ausreichende Finanzierung zu erhalten. Steuerliche Ausnahmen für KWK-Anlagen und damit ein finanzieller Vorteil gegenüber strombasierten Wärmeerzeugungstechnologien wurden nur als geringes Hemmnis beurteilt, da deren Förderung auf lange Sicht abgeschafft würde.

Grundlage für den Einsatz von strombasierten Technologien ist einerseits die ausreichende Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien als auch ein ausreichender Ausbau der Netzinfrastruktur. Denn ohne die zweite ist es nicht möglich eine ausreichende Menge an Strom zu industriellen Betrieben zu übertragen. Es sei zentral, dass ein zügiger Ausbau erneuerbarer Energien erfolgt, der nicht durch einen unzureichenden Netzausbau gebremst würde.

Insbesondere auf Verteilnetzebene, könne ein unzureichend ausgebautes Verteilnetz dazu führen, dass ein Mehrbezug an Strom für industrielle Unternehmen nicht möglich ist.

Neben der Benennung der fehlenden Netzanbindung wurde durch die interviewten Personen als weiteres Hemmnis der technologische Stand im Hochtemperaturbereich genannt. Dieser sei noch nicht ausreichend, um strombasierte Technologien in der Praxis einzusetzen. In diesem Bereich seien weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten notwendig. Als ein weiteres Hemmnis wurden mangelnde Kapazitäten von Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG)-Genehmigungsbehörden bezeichnet. Die Wirkung dieses Hemmnis sei jedoch weniger gravierend einzuschätzen, da auf einen langen Genehmigungsprozess schlussendlich eine Genehmigung erfolge.

Im Bereich der Flexibilisierung von industriellen Prozessen können für die energieintensive Industrie die Regelungen der individuellen Netzentgelte nach §19(2) Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) ein Hindernis darstellen. Diese Regelung reizt einen starren, Bandlast-Stromverbrauch oder einen Verbrauch außerhalb a-priori festgelegter Hochlastzeitfenster an. Denn werden diese Rahmenbedingungen eingehalten, werden die Netzentgelte zu großen Teilen erlassen. Dies ist gleichbedeutend damit, dass eine Anpassung des Stromverbrauchs in Abhängigkeit von erneuerbaren Energien zu einem Verlust dieses Privilegs führen kann. Eine Flexibilisierung der Produktionsprozesse, um etwa einem günstigen Börsenstrompreis zu folgen, wird von Unternehmen somit nicht in Erwägung gezogen, da die durch einen flexiblen Betrieb erwirtschafteten Kostenersparnisse nicht die Kosten eines Privilegienverlusts im Rahmen der Netzentgelte aufwiegen können.

Im Jahr 2024 startete daher die Bundesnetzagentur, die die Gestaltungshoheit im Bereich der Netzentgelte innehat, einen Konsultationsprozess in Bezug auf eine Überarbeitung der individuellen Netzentgelte<sup>5</sup>.

### **AP3**

Ein gemeinsamer Szenariorahmen wurde mit den Projektpartnern entwickelt, einschließlich eines Workshops im Herbst 2022. Die Datenschnittstelle zwischen den Modellen „REMOD“ und „PowerFlex“ wurde definiert, wobei „REMOD“-Ergebnisse als Inputparameter für „PowerFlex“ dienen. Eine weitere Schnittstelle wurde zwischen „PowerFlex“ und dem Modell „District“ bzgl. Strompreise definiert.

### **AP6**

Die Lastmanagement-Module in „PowerFlex“ wurden in ein einheitliches Speicher-Modul integriert, was auch smart charging für Elektrofahrzeuge ermöglicht. Verschiedene DSM-Optionen können nun mit einem einheitlichen Modul modelliert werden. Die Bereitstellung von Regelenergie wurde in pyPSA implementiert, und ein interaktives Dashboard wurde entwickelt. Die Lastdekomposition und die resultierenden Lastprofile wurden als eigenständiges Python-Package implementiert, das offen lizenziert und frei verfügbar ist.

- Tools und Modelle

---

<sup>5</sup> Siehe [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240724\\_IndustrieNE.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2024/20240724_IndustrieNE.html) / (letzter Zugriff am 09.12.2024)

- Beispiel in der pypsa Dokumentation zu Regelenergieimplementierung: <https://pypsa.readthedocs.io/en/latest/examples/reserve-power.html>
- Dashboard für das Regelenergiemarktttool: <https://pypsa-reserves-dashboard.streamlit.app/>
- Package zur Dekomposition und Aggregation von Lastkurven: <https://wingechr.github.io/data-disaggregation/>
- Dashboard mit synthetischen Lastprofilen: <https://ind-e-load-profiles.streamlit.app/>

**AP9**

Die neuen Funktionalitäten und Verbesserungen im Modell „PowerFlex“ wurden in der Szenarienanalyse eingesetzt und funktionieren wie angestrebt. Die Annahmen, Methodiken und Ergebnisse der Modellierung sind in mehreren Publikationen verfügbar, einschließlich eines Ergebnisberichts des Gesamtkonsortiums und zwei Open Access Publikationen (derzeit in Veröffentlichung). Die zentralen Erkenntnisse wurden Anfang 2025 veröffentlicht und in einem Online-Termin im Februar 2025 vorgestellt.

Eine wichtige Einflussgröße für den Einsatz der Flexibilitätsoptionen ist der Strompreis. Bei einem niedrigen Strompreis lohnt es sich, die Stromnachfrage zu erhöhen bzw. Strom einzuspeichern, um danach bei einem hohen Strompreis die Stromnachfrage zu reduzieren bzw. Strom auszuspeichern. Die durch den Preisunterschied erzielte Einsparung bei den Strombezugskosten muss dabei die mit dem Einsatz der Flexibilitätsoption einhergehenden Effizienz- und Speicherverluste sowie die variablen Kosten der Flexibilitätsbereitstellung mit beinhalten.

In Tabelle 2 sind typische Werte für Effizienz- und Speicherverluste sowie variable Kosten bei verschiedenen Flexibilitätsoptionen am Strommarkt dargestellt. Als Flexibilitätsoptionen werden vier Lastmanagement Technologien und zwei Speichertechnologien (Batterien und Pumpspeicherkraftwerke) betrachtet.

**Tabelle 2: Typische Werte für Effizienz- und Speicherverluste sowie variable Kosten bei verschiedenen Flexibilitätsoptionen am Strommarkt**

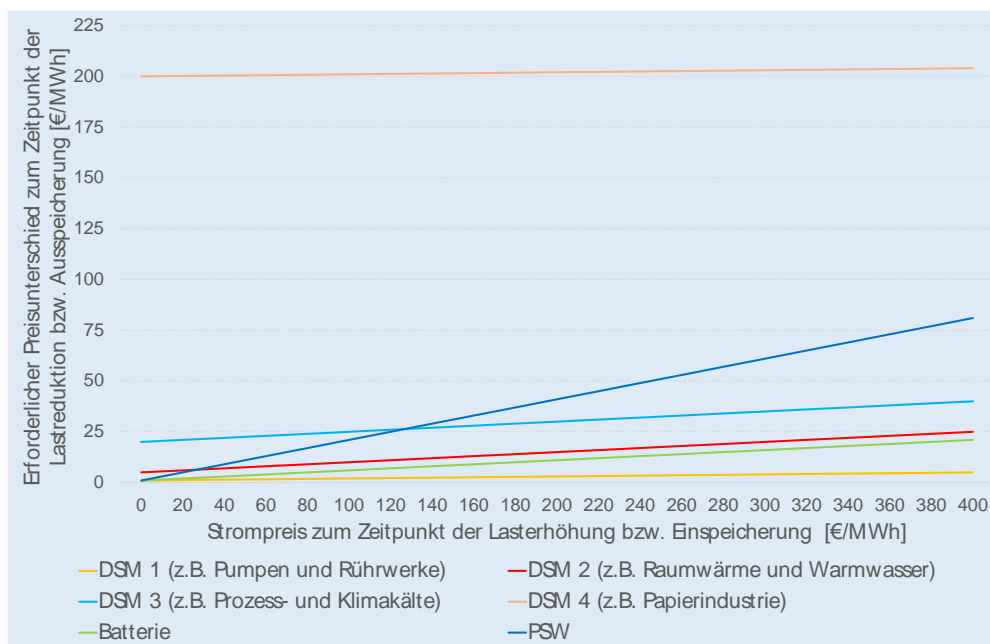
Parameter	Flexibilitätsoption					
	DSM 1	DSM 2	DSM 3	DSM 4	Batterie	PSW
Effizienz- oder Speicherverluste	1 %	5 %	5 %	1 %	5 %	20 %
variable Kosten [€/MWh]	1	5	20	200	1	1

Abbildung 6 zeigt in Abhängigkeit des Strompreises zum Zeitpunkt der Lasterhöhung (bzw. Einspeicherung) den Preisunterschied, den die betrachteten Flexibilitätsoptionen mindestens am Strommarkt zum Zeitpunkt der Lastreduktion (bzw. Ausspeicherung) erzielen müssen, um ihre Effizienz- und Speicherverluste sowie variablen Kosten zu decken. Hohe variable Kosten stellen einen deutlichen Malus im Vergleich zu den konkurrierenden Flexibilitätsoptionen dar. Die Einsatzreihenfolge ist deshalb über weite Strecken des Strompreisbereichs größtenteils klar: »DSM 1 (z.B. Pumpen und Rührwerke)« vor »Batterie« vor »DSM 2 (z.B. Raumwärme und Warmwasser)« vor »Batterie« vor »DSM 3 (z.B. Prozess- und Klimakälte)« vor »Pumpspeicherkraftwerk« vor »DSM 4 (z.B. Papierindustrie)«.

Bei niedrigen Strompreisen tritt der Nachteil von höheren Effizienz- oder Speicherverlusten in den Hintergrund. So ist bei einem Strompreis von kleiner 130 €/MWh die Flexibilitätsoption »Pumpspeicherkraftwerk« ökonomisch im Vorteil gegenüber der Flexibilitätsoption »DSM 3 (z.B. Prozess- und Klimakälte)«. Bei hohen Strompreisen ist es umgekehrt: der Malus von hohen variablen Kosten wird ab einem gewissen Schwellwert durch geringere Effizienzverluste ausgeglichen. Der Strompreis muss allerdings auf über 1.000 €/MWh steigen, damit die Flexibilitätsoption »DSM 4 (z.B. Papierindustrie)« ökonomisch vorteilhafter wird als die Flexibilitätsoption »Pumpspeicherkraftwerk«. Dabei wird deutlich, dass industrielles Lastmanagement mit seinen häufig hohen variablen Kosten am hinteren Ende der Einsatzreihenfolge steht. Industrielles Lastmanagement wird nur dann zum Einsatz kommen, wenn die konkurrierenden Flexibilitätsoptionen bereits eingesetzt wurden und darüber hinaus noch Flexibilitätsbedarf besteht.

Daher ist zu erwarten, dass sich für industrielles Lastmanagement nur geringe Einsatzzeiten in der Strommarktmodellierung ergeben werden. Infolgedessen wird es auch nur in begrenztem Umfang zu Effekten auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Stromsektor und die Integration von erneuerbaren Energien kommen. Bei der Höhe der noch zu deckenden Residuallast kann es jedoch zu einer nennenswerten Kappung in den betroffenen Stunden kommen.

**Abbildung 6: Grenzkosten der Flexibilitätsbereitstellung in Abhängigkeit des Strompreises zum Zeitpunkt der Lasterhöhung bzw. Einspeicherung**



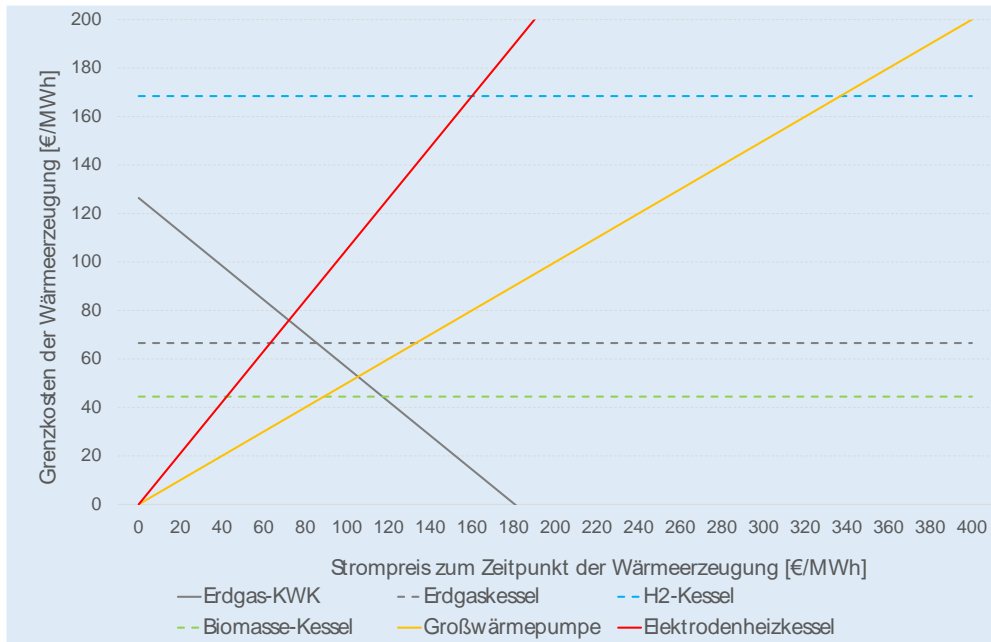
#### Strommarkteffekte durch Hybridisierung der industriellen Prozesswärmeerzeugung

Auch die Einsatzreihenfolge der einzelnen Wärmeerzeugungstechnologien hängt bei einem hybriden Anlagenpark vom jeweiligen Strompreis ab. Bei geringen Strompreisen sind die elektrischen Prozesswärmeerzeuger und bei hohen Strompreisen KWK-Anlagen ökonomisch vorteilhaft. Die Grenzkosten von brennstoffbasierten Kesseln sind unabhängig vom Strompreis.

Flexibilität für den Strommarkt wird von hybriden Anlagenparks zur industriellen Prozesswärmeerzeugung dadurch bereitgestellt, indem bei niedrigen Strompreisen vorrangig

elektrische Wärmeerzeugungstechnologien und bei hohen Strompreisen KWK-Anlagen oder brennstoffbasierte Kessel eingesetzt werden. Die Grenzkosten der Wärmebereitstellung zeigt Abbildung 7 exemplarisch für das Szenario »indirekte Elektrifizierung« im Jahr 2035.

**Abbildung 7: Grenzkosten der Wärmebereitstellung im Szenario »indirekte Elektrifizierung« für das Jahr 2035**

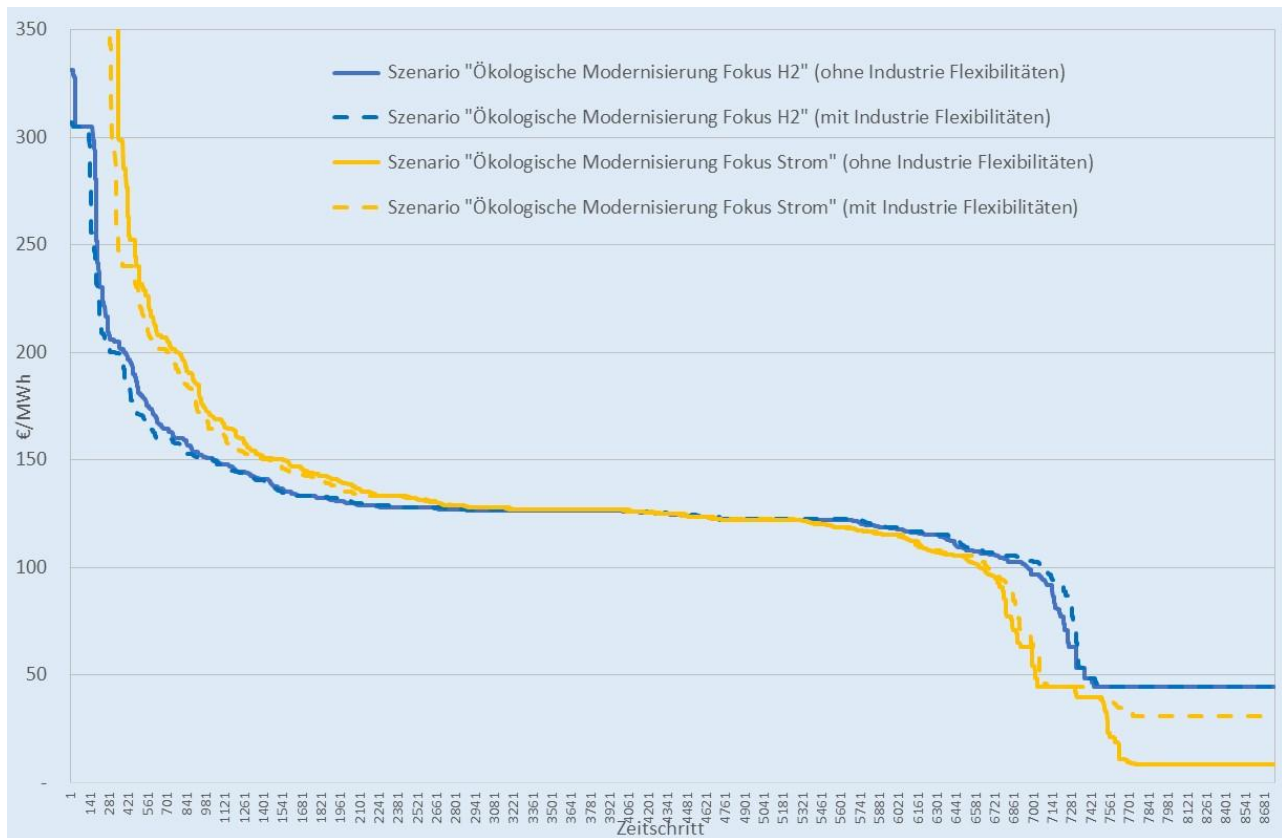


Anders als bei Lastmanagement, wo ein Bereitstellungszyklus für Flexibilität auf wenige Stunden begrenzt ist, kann die Flexibilität von hybriden Anlagenparks zeitlich unbegrenzt bereitgestellt werden. Der limitierende Faktor für das nutzbare Flexibilisierungspotenzial ist einzig die Höhe der Überbauung.

Daher ist zu erwarten, dass sich für die Flexibilitätsoption »hybride Prozesswärmebereitstellung« größere Einsatzzeiten in der Strommarktmodellierung ergeben werden. Die Einsatzprofile können sich dabei auch über einen längeren Zeitraum erstrecken und beispielsweise die Stromnachfrage in einer »Dunkelflaute« dauerhaft reduzieren. Infolgedessen wird es zu sichtbaren Effekten im Stromsektor kommen.

Lastabwurf steht als letzte Option am Ende der Einsatzreihenfolge von Flexibilitätsoptionen und wird deshalb nur punktuell eingesetzt. Die Strommarkteffekte beschränken sich dadurch auf die Verringerung einer eventuellen Kapazitätslücke im thermischen Kraftwerkspark um bis zu zwei Gigawatt.

**Abbildung 8: Resultierende Schattenpreise der Nebenbedingung zur Deckung der Stromnachfrage für das Szenario-Jahr 2035**



In Abbildung 8 sind die aus der Strommarktmodellierung resultierenden Strompreise für Deutschland im Szenario-Jahr 2035 dargestellt. Die Schattenpreise der Nebenbedingung zur Deckung der Stromnachfrage werden dabei als Strompreise interpretiert, wie sie sich nach dem Merit Order Prinzip ergeben. Dabei zeigen sich folgende Effekte durch den Einsatz von Industrie Flexibilitäten:

- In Zeiten mit geringen Strompreisen (rechte Seite der Grafik) steigen durch Lasterhöhung aufgrund von Lastmanagement sowie von Hybridisierung und Überbauung des elektrischen Anlagenparks zur Prozesswärmeerzeugung die Strompreise an.
- In Zeiten mit hohen Strompreisen (linke Seite der Grafik) nehmen durch Lastreduktion aufgrund von Lastmanagement sowie von Hybridisierung und Überbauung des brennstoffbasierten Anlagenparks zur Prozesswärmeerzeugung die Strompreise ab.
- Durch den Einsatz von Flexibilitäten werden die Strompreisprofile geglättet.

**Die erzielten Ergebnisse sind im Detail in den folgenden Produkten dokumentiert:**

- Publikationen
  - Fraunhofer ISE - Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; Öko-Institut; INATECH - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Hochschule Offenburg (2025): Senkpiel, C.; Kaiser, M.; Berneiser, J.; Kucknat, J.; Reuther, T.; Thomsen, J.; Kost, C.; Heinemann, C.; Koch, M.; Vogel, M.; Haller, M.; Qussous, R.; Wulfert, H. et al. Transformationspfade der Industrie: Energiesysteme, Flexibilität und Akteure. Freiburg. Online verfügbar unter

<https://www.oeko.de/publikation/transformationspfade-der-industrie-energiesysteme-flexibilitaet-und-akteure-1/> , zuletzt geprüft am 19.02.2025.

- Koch, M.; Heinemann, C.; Timpe, C.; Bauknecht, D. (2025): Szenarienanalyse zur hybriden Erzeugung von Fernwärme und industrieller Prozesswärme auf dem Weg zur Klimaneutralität, IEWT Wien, 26. - 28. Februar 2025
- Vogel, Moritz, Bauknecht, Dierk (forthcoming), Governing industrial electrification: Barriers for the application of electricity-based technologies in the German industry, Öko-Institut Working Paper.
- Heinemann, C; Koch, M (forthcoming): Effekte der Elektrifizierung und Flexibilisierung der Industrie auf das Stromsystem. Öko-Institut Working Paper.
- Koch, M; Heinemann, C. (forthcoming): Methodik und Parametrisierung zur Abbildung von flexiblen Industrieprozessen im Strommarktmodell Power-Flex im Rahmen des Projekts IND-E. Öko-Institut Working Paper.

Eine **detaillierte Gegenüberstellung** der erzielten Ergebnisse mit den vorgegebenen Zielen in tabellarischer Form ist in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Vorgegebene Ziele	Erzielte Ergebnisse
<p><b>AP1 – Energienachfrage in Industriebetrieben und Elektrifizierungspotenzial der Wandler</b></p> <p>Ziel ist es zusammen mit den Projektpartnern eine einheitliche Struktur für die Erfassung der Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenziale in der Industrie zu entwickeln. Dazu werden die Erfordernisse in Bezug auf die Daten aus dem Modell der Öko-Instituts „PowerFlex“ heraus definiert und eingebracht. Darüber hinaus leistet das Öko-Institut einen inhaltlichen Beitrag zur Recherche von Flexibilisierungspotenzialen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auf Basis der regelmäßigen Austauschtreffen zu den einzelnen Industriebranchen konnte ein einheitliches Verständnis und eine abgestimmte Struktur vereinbart werden, um Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenziale zu erfassen.</li> <li>• Die notwendigen Eingangsparameter für das Modell des Öko-Instituts „PowerFlex“ wurden mit dem Fraunhofer ISE erläutert. Diese Absprachen waren zudem Grundlage für die Datenschnittstellen in AP3.</li> <li>• Das Öko-Institut hat eine aufwändige Literaturlauswertung bzgl. Flexibilisierungspotenzialen in der Industrie durchgeführt. Die Ergebnisse sind detailliert im inhaltlichen Ergebnisbericht<sup>6</sup> dargestellt.</li> </ul>
<p><b>AP2 – Analyse von aktors-spezifischen Treibern und Hemmnissen der Elektrifizierung in der Industrie</b></p> <p>Das Öko-Institut verfolgt in AP2.2 das Ziel eine Übersicht zu regulatorischen Barrieren für die Elektrifizierung der Industrie zu erstellen. Diese wird gemeinsam mit Stakeholdern einer Validierung und Priorisierung unterzogen. Die ermittelten Barrieren sollen mit den anderen in AP2 ermittelten Einflussfaktoren (siehe TVB des Fraunhofer ISE) für die Modellierung aufbereitet werden und in das Analyseframework Eingang finden.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Im Rahmen des Projektes wurde basierend auf einer Literaturrecherche und Stakeholderinterviews eine Übersicht von regulatorischen und techno-ökonomischen Hemmnissen einer Elektrifizierung erarbeitet werden. Diese wurden mit Stakeholdern gemeinsam eingeordnet und priorisiert.</li> <li>• Die Ergebnisse sind detailliert im inhaltlichen Ergebnisbericht<sup>7</sup> dargestellt. Zudem befindet sich derzeit ein Open Access Papier in der Veröffentlichung mit detaillierten Ergebnissen dieses Arbeitsschrittes.</li> <li>• Im Rahmen von gemeinsamen Projekttreffen wurden die Ergebnisse von AP 2.2 in den Prozess der modellübergreifenden Szenariendefinition eingespeist. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse den Modellierenden des Projekts vorgestellt und somit in den Prozess der Modellierung eingespeist.</li> </ul>

<sup>6</sup> [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht\\_Ind-E.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht_Ind-E.pdf) Zugriff vom 13.02.2025

<sup>7</sup> [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht\\_Ind-E.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht_Ind-E.pdf) Zugriff vom 13.02.2025

### AP3 – Analyseframework und Modellkopplung

Ziel ist es mit den Projektpartner erstens, einen einheitlichen Szenariorahmen für die Szenarienana-lyse zu bestimmen und zweitens, die technischen Schnittstellen zwischen den Modellen (z.B. für Börsenstrompreise aus dem Modell PowerFlex) zu bestimmen.

- Zusammen mit den Projektpartnern wurde ein gemeinsamer Szenariorahmen entwickelt. Dazu fand im Herbst 2022 ein ganztägiger Workshop mit mehreren online-Nachfolgeterminen statt. Das Öko-Institut hat insbesondere im Vorfeld des Workshops zu verschiedenen Parameter-Annahmen beigetragen (PTX-Kosten, Brennstoffkosten, PTX-Nachfrage und Importmengen).
- Es wurden mit dem Konsortialpartner Fraunhofer ISE die Datenschnittstelle zwischen den Modellen „REMOD“ vom Fraunhofer ISE und „PowerFlex“ vom Öko-Instituts genauer definiert. Modellergebnisse von „REMOD“ gehen dabei als Inputparameter in das Strommarktmodell „PowerFlex“ ein. Als gemeinsame Datenschnittstelle verwenden wir die Variablen- und Parameterdefinitionen, wie wir sie bereits im Rahmen der AG Szenarien in den Kopernikus-Projekten Ariadne und ENSURE verwendet haben. Basierend auf dieser Datenschnittstelle haben wir eine Liste an Variablen definiert, für die Werte von „REMOD“ an „PowerFlex“ übergeben werden. Diese umfassen die energieträgerspezifischen Kapazitäten zur Strom- und Fernwärmeerzeugung sowie für Speicher und Flexibilitätsoptionen. Zudem sind die sektor- und branchenspezifischen jährlichen Stromnachfragen relevant. Für einzelne Variablen werden zudem stündliche Profile übergeben (z.B. Stromnachfrage gesamt oder Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien).
- Eine weitere Schnittstelle wurden zwischen dem Modell PowerFlex (Öko-Institut) und dem Modell District (Fraunhofer ISE) bzgl. Strompreise definiert.

### AP6 – Modellentwicklung im Strommarktmodell „PowerFlex“: Preise und DSM Effekte

Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll die Berücksichtigung von sektor- und technologiespezifischen Lastprofilen, die Abbildung von flexiblen Stromverbrauchern sowie die Abbildung des Regelenergiemarktes in PowerFlex verbessert werden. Darüber hinaus sollen die Methodiken zur Lastdekomposition und zur Modellierung des Regelenergiemarktes durch Entwicklung entsprechender Module für das Open Source Modelling Framework Oemof2 der wissenschaftlichen Community zur Verfügung gestellt werden.

- Gemäß der TVB wurden die bestehenden Lastmanagement-Module in PowerFlex in ein einheitliches Speicher-Modul integriert und dort zusammengeführt. Dafür mussten sowohl das Management der Inputdaten in der Datenbank überarbeitet als auch Änderungen im Programmcode selbst vorgenommen werden. In diesem Zusammenhang ist es nun auch möglich, smart charging für Elektrofahrzeuge in aggregierter Form als DSM-Technologie zu nutzen. Je nach Fragestellung können nun verschiedene DSM-Optionen mit einem einheitlichen Modul in unterschiedlicher Detailtiefe modelliert werden. Einerseits können bestehende DSM-Optionen weiter in verschiedene Branchen, Technologien oder Prozesse untergliedert werden. Andererseits können ähnliche DSM-Optionen auch zu generischen Aggregaten zusammengefasst werden (z.B. DSM-Optionen mit einem Verschiebezeitraum von 1h, 2h, 4h oder 8h). Dadurch kann die Detailtiefe der betrachteten DSM-Optionen in Einklang mit der verfügbaren Rechenleistung gebracht werden.
- Die vereinfachte Abbildung der Bereitstellung von Regelenergie wurde in pyPSA implementiert. Es wurde ein interaktives Dashboard entwickelt, mit dem erkundet werden kann, wie diese Methodik das Verhalten eines Energiesystemmodells beeinflusst (<https://pypsa-reserves-dashboard.streamlit.app/>). Der Source Code für das Dashboard ist auf GitHub verfügbar (<https://github.com/markushal/pypsa-reserves-dashboard>).
- Abweichend von der ursprünglichen Planung wurde die Lastdekomposition und die resultierenden Lastprofile nicht im Rahmen des oemof-Moduls oemof.demandlib, sondern als eigenständiges Python-Package implementiert. Dies hat den Vorteil, dass der Kreis potenzieller AnwenderInnen nicht auf oemof beschränkt ist, und dass das Tool nicht nur zur Dekomposition von Nachfrageprofilen, sondern auch für andere Anwendungsfälle im Bereich der Aggregation und Disaggregation von Daten verwendet werden kann. Das Tool ist offen lizenziert (MIT License) und ist frei verfügbar (<https://github.com/wingechr/data-disaggregation>). Das Tool wurde mit den ProjektpartnerInnen diskutiert und getestet. Mittels eines Dashboards können User das Tool nun vereinfacht nutzen und entsprechende Lastprofile erstellen. Darüber hinaus wurde ein interaktives Dashboard erstellt, mit dem auf Grundlage technologiespezifischer, synthetischer Lastprofile und Statistiken zur räumlichen Verteilung von Beschäftigten und Unternehmensstandorten regionalisierte Stromnachfrageprofile erstellt werden können (<https://ind-e-load-profiles.streamlit.app/>).

<p><b>AP9 – Energiesystemanalyse</b>                  Technisches Arbeitsziel ist der Einsatz und die Validierung der im Modell neu entwickelten Funktionalitäten in einem gemeinsamen Szenariorahmen.                  Wissenschaftliches Arbeitsziel ist die Analyse der Effekte einer Elektrifizierung und Flexibilisierung der Industrie in Bezug auf Preise (Spotmarktpreise und Regelenergieleistungspreise) sowie weiteren Indikatoren wie beispielsweise CO<sub>2</sub>-Emissionen und EE-Abregelung.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die neuen Funktionalitäten und Verbesserungen im Modell PowerFlex wurden in der Szenarienanalyse eingesetzt und funktionieren so wie angestrebt.</li> <li>• Die Annahmen, Methodiken und Ergebnisse der Modellierung sind in den folgenden Publikationen verfügbar:</li> <li>• Ergebnisbericht des Gesamtkonsortiums<sup>8</sup> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Detaillierte Informationen zur Methodik, Parametrisierung und den Modellierungsergebnissen finden sich in zwei open access Publikationen (derzeit in Veröffentlichung)</li> </ul> </li> </ul>
<p><b>AP10 – Dissemination und Kommunikation</b>                  Ziel ist es, die gewonnen Erkenntnisse in einer Kurzstudie zusammen mit den Projektpartnern zu veröffentlichen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die zentralen Erkenntnisse wurden zusammen mit den ProjektpartnerInnen in einem Ergebnisbericht Anfang des Jahres 2025 veröffentlicht und in einem Online-Termin im Februar 2025 vorgestellt.</li> </ul>

## 2.2 Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises aus der Gesamtvorkalkulation (GVK) gemäß Zuwendungsbescheid sowie des Verwendungsnachweises vom 25.09.2024 sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Der Mehrbedarf an Personalkosten und entsprechende Minderausgaben bei den Sachkosten wurden mit dem PTJ per Email abgestimmt, in den entsprechenden Zwischenberichten dokumentiert und im Verwendungsnachweis dokumentiert.

**Tabelle 2-3: Überblick Kostenpositionen**

	GVK	Verwendungsnachweis (25.09.2024)
Pos 0837 – Personalkosten	525.753,00 €	544.251,50 €
Pos 0838 – Reisekosten	5.400,00 €	809,75 €
Pos 0860 – Verwaltungskosten	6.538,00 €	258,49 €
<b>Summe</b>	<b>537.691,00 €</b>	<b>545.319,74 €</b>

Quelle: Öko-Institut e.V.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Erforschung der Elektrifizierungs- und Flexibilisierungspotenziale in der Industrie hat während der Projektlaufzeit an Bedeutung gewonnen. Das liegt unter anderem an den folgenden Gründen:

- Die Verzögerung des Hochlaufs der Wasserstoff-Wirtschaft zeigt, dass die Nutzung von Wasserstoff keine robuste Fall-back Strategie für technisch elektrifizierbare Prozesse darstellt. Somit steigt das Interesse an der Elektrifizierung und Flexibilisierung in der Industrie.

<sup>8</sup> [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht\\_Ind-E.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/downloads/pdf/Ergebnisbericht_Ind-E.pdf) Zugriff vom 13.02.2025

- Nicht zuletzt aufgrund der gestiegenen Energiekosten in den vergangenen Jahren ist die Politik als auch die Unternehmen auf neue Erkenntnisse aus der Forschung angewiesen.

Das Vorhaben konnte die folgenden Beiträge leisten:

- Die Hemmnisse und regulatorischen Barrieren für die Elektrifizierung und Flexibilisierung wurden erfasst und können von zuständigen Stakeholdern nun adressiert werden.
- Potenziale für die Flexibilisierung von Industrieprozessen können nun mit Potentialen anderer Flexibilitätsoptionen verglichen werden und ihr Nutzen eingeschätzt werden.
- Die Auswirkung von industrieller Flexibilität auf das Energiesystem können eingeschätzt werden.
- Die Modellierungscommunity wurde durch verschiedene Open Source Module bereichert.

## 2.4 Voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der Nutzen und die Verwertung der Ergebnisse stellen sich wie folgt dar:

- Die open source Modellierungs-Community kann die folgenden **Module** nutzen:
  - Das Beispiel-Notebook in der PyPSA-Dokumentation<sup>9</sup> und das interaktive Dashboard<sup>10</sup> zur Abbildung von Regelenergie
  - Das interaktive Dashboard zum Erstellen von regionalisierten, technologiespezifischen Lastprofilen<sup>11</sup>
- **Open Access Veröffentlichung zu regulatorischen Hemmnissen einer Elektrifizierung:** Andere Forschungsprojekt aber auch Umsetzungsprojekte können auf den Sachstand der regulatorischen Hemmnisse aufbauen. Wissenschaftliche Arbeiten können zudem an den dargestellten regulatorischen Forschungsbedarf anknüpfen.
- **Open Access Veröffentlichung zur Modulentwicklung:** In dieser Veröffentlichung wurden zusätzlich die unterschiedlichen Flexibilitätsansätze (Lastverlagerung, Lastabwurf und hybride Prozesswärmebereitstellung) beschrieben. Das Papier wurde als Open Access Papier veröffentlicht. Wissenschaftliche Arbeiten können die Ansätze aufgreifen und weiterentwickeln. Insbesondere das Feld der hybriden Prozesswärmebereitstellung wurde als weiterer Forschungsbedarf identifiziert und Folgeprojekt können auf unseren Arbeiten aufbauen.
- **Open Access Veröffentlichung zu Energiesystemmodellierung:** In diesem Papier wurden die Ergebnisse der Szenarioanalyse dargestellt. Das Papier wurde als Open Access Papier veröffentlicht. Wissenschaftliche Arbeiten können an den dargestellten Ergebnissen aufgreifen und in neue Untersuchungen einfließen lassen. Forschungsprojekte und Umsetzungsprojekte können sich an den Effekten der industriellen Flexibilität im Gesamtsystem orientieren und ihren Fokus auf vielversprechende Potenziale setzen.

---

<sup>9</sup> <https://pypsa.readthedocs.io/en/latest/examples/reserve-power.html>

<sup>10</sup> <https://pypsa-reserves-dashboard.streamlit.app/>

<sup>11</sup> [https://ind-e-load-profiles.streamlit.app/synthetic\\_profiles](https://ind-e-load-profiles.streamlit.app/synthetic_profiles)

## 2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Mit Bezug auf die Elektrifizierung und Flexibilisierung sind in den Jahren 2023 und 2024 zwei zentrale Forschungsergebnisse veröffentlicht worden. Die neuen Erkenntnisse fanden in unseren Arbeiten Berücksichtigung, in dem wir die Hybridisierung der Prozesswärmebereitstellung zusätzlich berücksichtigt haben.

- UBA - Umweltbundesamt (Hg.) (2023): Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Hirzel, S.; Neusel, L.; Aydemir, A.; Schwotzer, C.; Kaiser, F.; Gondorf, C.; Hauch, J.; Hof, J.; Sankowski, L.; Langhorst, M. CO<sub>2</sub>-neutrale Prozesswärmeerzeugung, Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung; Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik der RWTH Aachen University. Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161\\_2023\\_texte\\_prozesswaermepumpen\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/161_2023_texte_prozesswaermepumpen_0.pdf), zuletzt geprüft am 21.12.2023.
- kei - Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (Hg.) (2024). Flexibilisierung elektrifizierter Industrieprozesse, Eine Analyse der technischen und ökonomischen Herausforderungen aus Unternehmens- und Systemperspektive. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; RWTH Aachen. Cottbus. Online verfügbar unter [https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916\\_KEI\\_Studie\\_FlexIPro\\_final\\_barrierefrei.pdf](https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916_KEI_Studie_FlexIPro_final_barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 01.10.2024.

## 2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11

Koch, M.; Heinemann, C.; Timpe, C.; Bauknecht, D. (2025): Szenarienanalyse zur hybriden Erzeugung von Fernwärme und industrieller Prozesswärme auf dem Weg zur Klimaneutralität, IEWT Wien, 26. - 28. Februar 2025

Stoy, S.; Harder, N., Heinemann, C.; Kaiser, M.; Sandhaas, A.; Senkpiel, C.; Weidlich, A. (2022) Dekarbonisierung der deutschen Industrie – Potenziale zur Elektrifizierung und Flexibilisierung der Prozesswärme. Energiewirtschaftliche Tagesfragen.72. Jg. 2022 Heft 11

Vogel, Moritz, Bauknecht, Dierk (forthcoming), Governing industrial electrification: Barriers for the application of electricity-based technologies in the German industry, Öko-Institut Working Paper

Franziska Ossenkopp (2022): A model-based analysis of decarbonization options for the German paper industry. Universität Freiburg, Institut für Nachhaltige Technische Systeme – INATECH

Fraunhofer ISE - Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme; Öko-Institut; INATECH - Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; Hochschule Offenburg (2025): Senkpiel, C.; Kaiser, M.; Berneiser, J.; Kucknat, J.; Reuther, T.; Thomsen, J.; Kost, C.; Heinemann, C.; Koch, M.; Vogel, M.; Haller, M.; Qussous, R.; Wulfert, H. et al. Transformationspfade der Industrie: Energiesysteme, Flexibilität und Akteure. Freiburg. Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/publikation/transformationspfader-industrie-energiesysteme-flexibilitaet-und-akteure-1/> , zuletzt geprüft am 19.02.2025.

Vogel, Moritz, Bauknecht, Dierk (forthcoming), Governing industrial electrification: Barriers for the application of electricity-based technologies in the German industry, Öko-Institut Working Paper.

Heinemann, C; Koch, M (forthcoming): Effekte der Elektrifizierung und Flexibilisierung der Industrie auf das Stromsystem. Öko-Institut Working Paper.

Koch, M; Heinemann, C. (forthcoming): Methodik und Parametrisierung zur Abbildung von flexiblen Industrieprozessen im Strommarktmodell Power-Flex im Rahmen des Projekts IND-E. Öko-Institut Working Paper.

### 3 Literatur

50 Hertz - 50 Hertz Transmission; Amprion; TenneT - TenneT TSO; TransnetBW (Hg.) (2023). Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2037, Zweiter Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber, zuletzt geprüft am 30.11.2023.

AGEB (Hg.) (2024): AGEB. Energiebilanz der Bundesrepublik 2022. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2024/03/EBD22e.xlsx>.

Agora Verkehrswende; Agora Energiewende (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe, Schlussfolgerungen aus Sicht von Agora Verkehrswende und Agora Energiewende. Berlin.

BNetzA - Bundesnetzagentur (Hg.) (2022). Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045 für den Netzentwicklungsplan 2023-2037/2045. Online verfügbar unter [https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-01/Szenariorahmen\\_2037\\_Genehmigung.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/2023-01/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf), zuletzt geprüft am 09.08.2023.

Buhl, H. U.; Pichlmaier, M.; Eble, D.; Förster, R.; Sauer, A.; Kaymakci, C. (2024): Stellungnahme zur Konsultation des Eckpunktepapiers zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich, Kopernikus-Projekt SynErgie, zuletzt geprüft am 26.11.2024.

FfE - Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft; Guidehouse (Hg.) (2021): Jetter, F.; Veitengruber, F.; Schmid, T.; Guminski, A.; Roon, S. von; Hübner, T. Regionale Lastmanagementpotenziale. München, Berlin. Online verfügbar unter [https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2022/01/Regionale\\_Lastmanagementpotenziale\\_DE2.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2022/01/Regionale_Lastmanagementpotenziale_DE2.pdf), zuletzt geprüft am 31.07.2023.

Heitkoetter, W.; Schyska, B. U.; Schmidt, D.; Medjroubi, W.; Vogt, T.; Agert, C. (2021): Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset. In: *Advances in Applied Energy* (1). DOI: 10.1016/j.adapen.2020.100001.

kei - Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (Hg.) (2024). Flexibilisierung elektrifizierter Industrieprozesse, Eine Analyse der technischen und ökonomischen Herausforderungen aus Unternehmens- und Systemperspektive. Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung; RWTH Aachen. Cottbus. Online verfügbar unter [https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916\\_KEI\\_Studie\\_FlexIPro\\_final\\_barrierefrei.pdf](https://www.klimaschutz-industrie.de/fileadmin/kei/Dateien/Publikationen/20240916_KEI_Studie_FlexIPro_final_barrierefrei.pdf), zuletzt geprüft am 01.10.2024.

Öko-Institut; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, zuletzt geprüft am 08.04.2019.

UBA (Hg.) (2024): UBA. Emissionsübersichten KSG-Sektoren 1990-2023. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2024\\_03\\_13\\_em\\_entwicklung\\_in\\_d\\_ksg-sektoren\\_thg\\_v1.0.xlsx](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2024_03_13_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_thg_v1.0.xlsx).