

# Dekarbonisierungsansätze in der stahlverarbeitende Industrie – eine numerische Studie

Tobias Goschin, Mathias Vogel, Robert Flassig\*

\* Brandenburg University of Applied Sciences, Brandenburg a. d. Havel, BRB 14770  
Germany (Tel: +49 3381 355-377; e-mail: robert.flassig@th-brandenburg.de)

**Kurzfassung:** Diese Studie zeigt Energienutzungsansätze zur Dekarbonisierung der sekundären Stahlroute auf. Dazu werden Energiedaten eines Unternehmens in der Sekundärstahlerzeugung verwendet, um ein zeitaufgelöstes, technoökonomisches Energieprozessmodell zu generieren. Mithilfe des Modells werden das Potential von Abwärmenutzung eines Stoßofens im Sinne der Sektorkopplung und die Verwendung von erneuerbaren Energiewandlungsquellen betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass der jährliche Wärmebedarf einer mittelgroßen Gemeinde bis zu 100 % mittels Abwärme gedeckt werden kann. Das Einkopplungspotential von erneuerbaren Energiequellen ist technisch gut möglich, allerdings durch zumeist lokale Rahmenbedingungen wie Flächenverfügbarkeit, -nutzung und Wirtschaftlichkeit nicht immer nachhaltig umsetzbar.

**Keywords:** Dekarbonisierung, Sektorenkopplung, sekundäre Stahlindustrie, Wärmeintegration, techno-ökonomische Optimierung

## 1 Inhalt

Der Industriesektor hat in Deutschland zusammen mit dem Verkehrssektor den größten Endenergieverbrauch mit einem Anteil von 28.3 %. Das entspricht einem jährlichen Bedarf an 657 TWh<sub>el</sub> (AG Energiebilanzen e.V. 2021). Um diesen hohen Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen in Einklang mit den deutschen Klimazielen zu bringen, ist es notwendig, Einsparpotenziale zu identifizieren. Ein emissionsintensiver Vertreter des Industriesektors ist die Stahlindustrie. Ein großes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial bietet die bereits bekannte Kreislaufwirtschaft und das damit verbundene Recycling von Stahl, der sogenannte Sekundärstahl. Obwohl die Energiemenge im Sekundärstahlweg deutlich geringer ist als im Primärstahlweg, ist diese mit 2 GJ<sub>el</sub> gegenüber 14 GJ<sub>el</sub> pro Tonne Rohstahl nicht vernachlässigbar (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019). Frühere Studien weisen auf, dass die Nutzung von Ökostrom als eine wichtige Option zur Dekarbonisierung von Sekundärstahl hin (Agora Energiewende und Wuppertal Institut 2019; Zhiyuan/Friedmann 2021). Die vorliegende Analyse setzt an diesem Punkt an und betrachtet exemplarisch verschiedene Szenarien der industriellen Abwärmenutzung im Sinne der Sektorenkopplung. Auf Basis dieser Erkenntnisse können kommunale Energieversorgungskonzepte optimiert und CO<sub>2</sub>-arm gestaltet werden. Jedes modellierte Szenario repräsentiert eine spezifische technische Konfiguration der Energienutzung im Prozess der Sekundärstahlerzeugung. Sie werden mithilfe eines zeitdiskreten linearen Optimierungsproblem hinsichtlich der jährlichen

Gesamtkosten numerisch optimiert. Dabei ermöglicht die Verwendung eines zeitdiskreten Modells einzelne Komponenten des Energiesystems, wie erneuerbare Energiequellen oder Energiespeicher, unter Berücksichtigung realistischer Lastprofile von Unternehmen der Stahlindustrie kostenoptimal auszulegen.

## 2 Methode

Die vorliegende Analyse basiert auf einem Industrieunternehmen für Sekundärstahlerzeugung mit hohem Endenergieverbrauch. Die Energieversorgung wird als Energieprozessmodell mittels gemischt-ganzzahliger linearer Programmierung dargestellt und innerhalb der Open-Source Anwendung FINE (Framework for Integrated Energy system assessment) optimiert (Welder et al. 2018). In Abbildung 1 sind Ausgangsszenario A mit Energiequellen und Umwandlungen dargestellt. Abbildung 1B stellt das erweiterte Szenario B durch Abwärmenutzung dar. Als Teil von FINE ist das Optimierungsframework Pyomo (Hart et al. 2011) implementiert, das die kostenminimale Technologieauswahl, -dimensionierung und -betriebszeit innerhalb eines repräsentativen Stahlproduktionsjahres ermöglicht. Die zu minimierende Zielfunktion stellt die jährlichen Gesamtkosten  $TAC$ , Gleichung (1), dar (Knosala et al. 2021).

$$TAC = CAPEX \cdot \left( \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} + OPEX \right). \quad (1)$$

Dazu wird ein kalkulatorischer Zinssatz  $i$  von 5 % bis 8 % über die wirtschaftliche Lebensdauer  $n$  der Komponente angenommen. Capital Expenditures  $CAPEX$ , werden als die Summe der Investitionskosten betrachtet, während die Operational Expenditures  $OPEX$ , die Betriebs- und Wartungskosten ausdrücken. In der Regel werden die  $OPEX$  als ein Bruchteil der Investitionskosten angegeben.

Um die  $TAC$  oder  $CO_2$ -Emissionen zu reduzieren, wird die Ausgangskonfiguration um verschiedene Technologien und Energieversorgungskonzepte erweitert (siehe Abbildung 1). Die implementierten Module, wie erneuerbare Energiequellen, Energieumwandlungseinheiten und Energiesenken sowie Energiespeicher ermöglichen eine realistische Optimierung des Gesamtsystems und werden im Folgenden beschrieben. Wichtige technisch-ökonomische Parameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

### Stromnetz

Das Stromnetz (in Abbildung 1 als "Grid" bezeichnet) liefert in erster Linie Energie für den Betrieb des Lichtbogenofens, wobei das Stromangebot als nicht begrenzt betrachtet wird. Der Strombedarf des Stoßofens ist in der Realität vernachlässigbar klein. Nach Angaben des referenzierten Industrieunternehmens wird ein verbrauchsspezifisches  $CO_2$ -Äquivalent von  $0.651 \text{ kg/kWh}_{el}$  angenommen.

### *Wärmenetz*

Abbildung 1B stellt die Erweiterung um das "Wärmenetz" mit Standardversorgungsmethode zur Abdeckung des vorgegebenen Wärmelastprofils dar. Nach Großklos (2020) beträgt das CO<sub>2</sub>-Äquivalent für die Wärmeversorgung aus einem Fernwärmenetz 0.243 kg/kWh<sub>th</sub>.

### *Photovoltaik (PV)*

Der Einsatz von Photovoltaiktechnologie ist eine weitere Möglichkeit den Strombedarf des Lichtbogenofens zu decken. Sie wird nur bei Szenario A angewendet. Ihre Leistung ist auf maximal 15 MW<sub>el</sub> begrenzt. Die repräsentative, exogene Leistungskurve bezieht sich auf Brandenburg, Deutschland (Kunz et al. 2017) und ist im Anhang Abbildung A1 visualisiert.

### *Lichtbogen- und Stoßofen*

Der Lichtbogenofen ("Arc Furnace") schmilzt hauptsächlich Stahlschrott mittels elektrischer Energie. In weiteren Schritten wird das geschmolzene Metall zu Stahlprodukten verarbeitet. Ein Stoßofen erhitzt die Stahlprodukte durch die Verbrennung von Erdgas und macht diese walzfähig. Nach Angaben des Industrieunternehmens wird ein verbrauchsspezifisches CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 0.202 kg/kWh<sub>th</sub> angenommen. Repräsentative, exogene Lastprofile wurden ebenfalls erstellt. Zusammenfassend werden beide Öfen als "Secondary Steel Process" (kurz: SSP, siehe Abbildung 1) modelliert. Zusätzlich fällt am Stoßofen Abwärme an, die zur weiteren Nutzung zur Verfügung steht. Ein entsprechendes Wärmeleistungsprofil liegt ebenfalls vor<sup>1</sup>.

### *ORC-Modul*

Das ORC-Modul (Organic Rankine Cycle) ist in der Lage, die Abwärme des Stoßofens in elektrische Energie umzuwandeln, die direkt in den Lichtbogenofen eingespeist werden kann. Basierend auf der Leistungsamplitude des Abwärmeprofils wird die Kapazität des ORC-Moduls entsprechend angepasst, ist aber auf eine maximale Kapazität von 15 MW<sub>th</sub> begrenzt.

### *Wärmespeicher*

Der Wärmespeicher (in Abbildung 1B als "Storage" bezeichnet) ist in der Lage, Abwärme zwischen mehreren Zeitschritten dynamisch zu übertragen. Er ermöglicht eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme, wenn sie zur Deckung des Wärmelastprofils benötigt wird.

### *Wärmesenke*

Die Wärmesenke (in Abbildung 1B als "Heat Sink" bezeichnet) ist ein repräsentatives, exogenes Lastprofil aus Berlin, Deutschland (Kunz et al. 2017), das nur in Szenario B verwendet wird. Das Profil ist normiert und so ausgelegt, dass es den Wärmebedarf einer Kommune mit etwa 31.6 GWh<sub>th</sub> beschreibt. Dazu kann die Amplitude des Profils skaliert werden, indem eine Wärmeleistung definiert wird, die in diesem Fall einer Spitzenlast entspricht (die Standard-Spitzenlast für die folgenden Ergebnisse beträgt 10 MW<sub>th</sub>). Das normierte Profil ist im Anhang dargestellt (siehe Abbildung A2).

---

<sup>1</sup> Weitere Informationen können auf Anfrage erteilt werden.

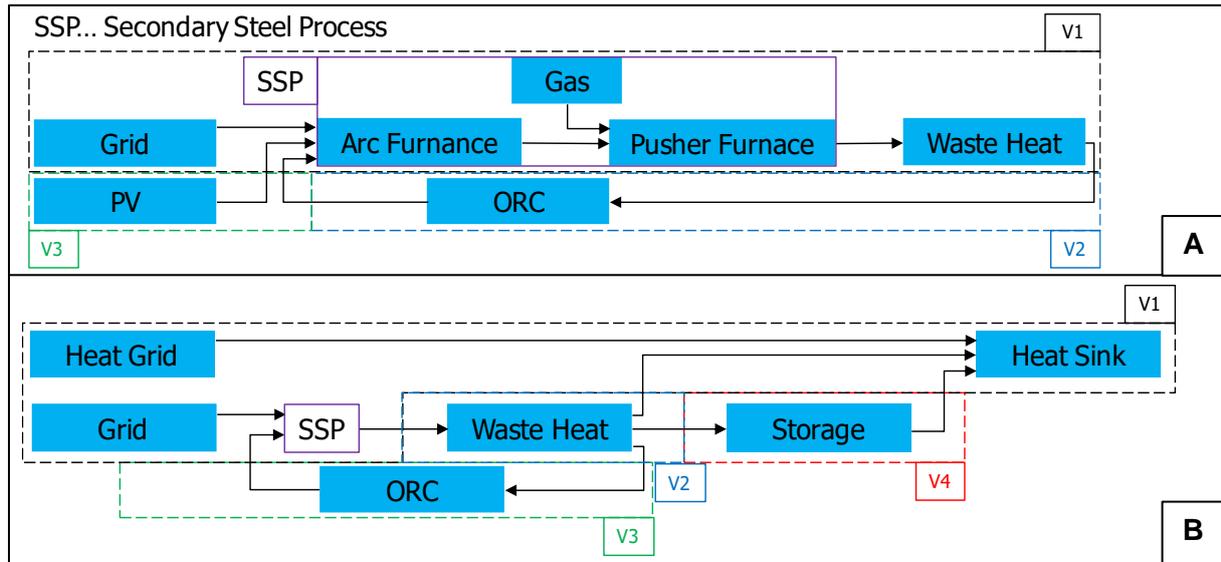


Abbildung 1. Energieflussdiagramme des Sekundärmetallurgieprozesses unter Berücksichtigung der einzelnen Varianten V1 (Referenz), V2 (ORC), V3 (PV) und V4 (Abwärmenutzung) der Energieversorgungstechnologien. Oben (A): Auswertung ohne Wärmelast (Wärmesenke). Unten (B): Auswertung mit Wärmelast (Wärmesenke).

Tabelle 1. Techno-ökonomische Parameter für (erneuerbare) Energiequellen, Energieumwandlungsanlagen und Energiespeicher. Die OPEX werden als Bruchteil der CAPEX angegeben.

Technologie	Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Stromnetz	Bezugskosten	0.1825	€/kWh <sub>el</sub>	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2021)
Wärmenetz	Bezugskosten	0.091	€/kWh <sub>th</sub>	co2online (2021)
Gasbezug	Bezugskosten	0.00278	€/m <sup>3</sup>	Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt (2021)
PV	CAPEX	1350	€/kW <sub>el,p</sub>	Pro Energy Solutions; Kloth
	OPEX	1.5	%	
	Leistungsgrenze	15	MW <sub>el</sub>	
ORC	CAPEX	312.5	€/kW <sub>th</sub>	Orcan Energy AG; Grote, L. et al. (2015); Stockmann, Wagner (2016)
	OPEX	2	%	
	Leistungsgrenze	15	MW <sub>th</sub>	
	Wirkungsgrad (1 kW <sub>th</sub> /9.6kW <sub>el</sub> )	10.4	%	
Stromspeicher	CAPEX	625	€/kWh <sub>el</sub>	WEMAG AG; AE-Tec Alternative Energietechnik (2015); Solaranlage Ratgeber (2021)
	Leistungsgrenze	10	MWh <sub>el</sub>	
	Wirkungsgrad	95	%	
	(Ent-)Ladungsrate	750	kW <sub>el</sub>	
	Selbstentladung	0.5	%/Woche	
Wärmespeicher	CAPEX	2.83	€/kWh <sub>th</sub>	EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH (2018); Elsner, Sauer (2015)
	OPEX	3	%	
	Leistungsgrenze	1.8	GWh <sub>th</sub>	
	Wirkungsgrad	96	%	
	(Ent-)Ladungsrate	40	MW <sub>th</sub>	
	Selbstentladung	55	%/month	

### 3 Ergebnisse

Die Szenarioanalyse, d.h. verschiedene Technologiekombinationen der Energiebereitstellung, -umwandlung und -nutzung, wird anhand der jährlichen Gesamtkosten des Energiesystems (*TAC*, siehe Gleichung (1)) und der errechneten jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen bewertet, die mit 40 €/t ebenfalls die *TAC* beeinflussen (zukünftige Preissteigerungen berücksichtigt, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2020)). Mögliche Subventionen oder Einnahmen sind in der Berechnung nicht enthalten. Die nachfolgenden Abbildungen 2 und 3 zeigen daher für den Fall ohne Wärmelast (blau), dass eine Kombination der Energieversorgung mit V1 (Referenz), V2 (ORC) und V3 (PV) optimal ist (Abb. 2, Versorgungskonzept 4, blau). Für den Fall mit Wärmelast (orange) ist die Kombination der Versorgungsvarianten V1, V2, V3 und V4 (Abwärmenutzung) optimal (Abb. 2, Versorgungskonzept 4, orange). In diesen Fällen ergibt sich das höchste CO<sub>2</sub>-basierte und monetäre Einsparpotenzial, da entweder ein Teil des jährlichen Strombedarfs des Unternehmens oder ein großer Teil des angenommenen jährlichen Wärmebedarfs einer Gemeinde durch die industrielle Abwärme gedeckt werden kann.

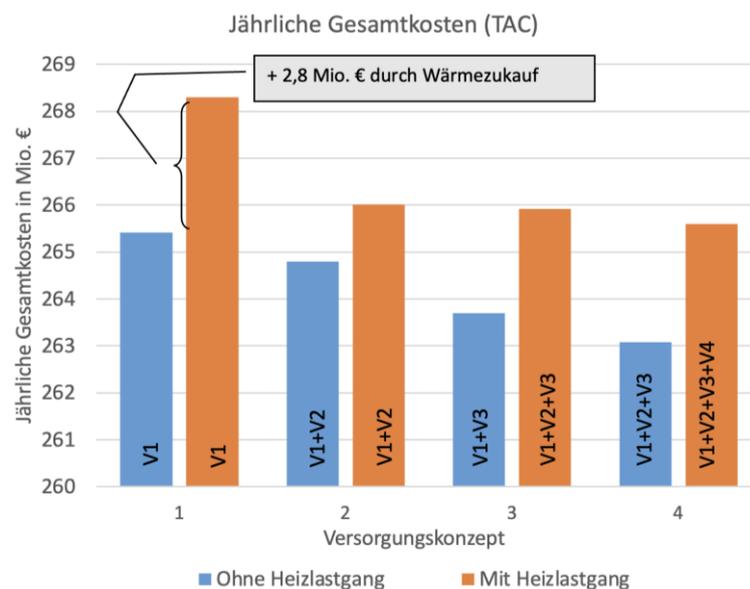


Abbildung 2. Entwicklung der jährlichen Gesamtkosten (*TAC*) der ausgewählten Sekundärstahl-Fallstudie in Abhängigkeit von der kommunalen Wärmeversorgung (Wärmelast) und ausgewählten Energieversorgungstechnologien (Versorgungskonzepte 1, 2, 3, 4).

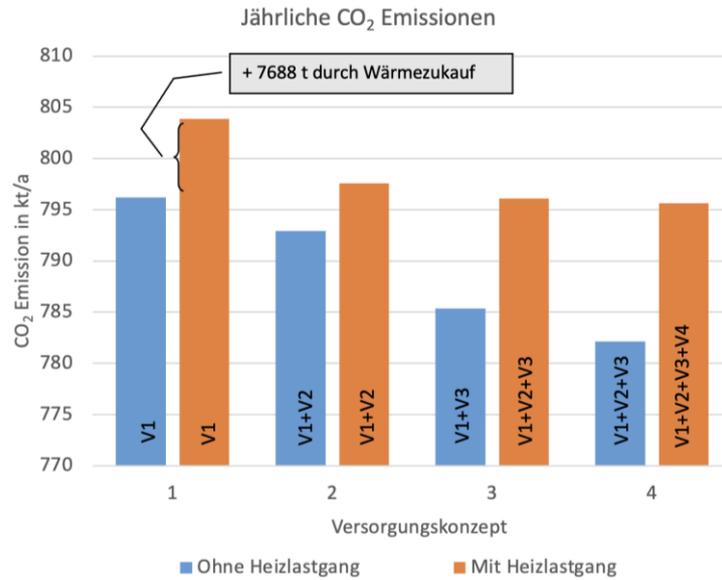


Abbildung 3. Entwicklung der jährlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen der ausgewählten Sekundärstahl-Fallstudie in Abhängigkeit von der kommunalen Wärmeversorgung (Wärmelast) und ausgewählten Energieversorgungstechnologien (Versorgungskonzepte 1, 2, 3, 4).

Die Betrachtung von Versorgungskonzept 4 mit Wärmelast führt (Abb. 3, Versorgungskonzept 4, orange), nach Berechnung mittels der Gleichungen (2) und (3) zu einer Autarkie von 94.5 % und einem Eigenverbrauch von 62.5 %. Das bedeutet, dass die Gemeinde in diesem Szenario nahezu autark mit Abwärme versorgt werden kann.

Die Autarkie kann wie folgt berechnet werden

$$Autarkie = \frac{\text{genutzte Wärme aus Abwärme}}{\text{Gesamtwärmebedarf}}, \quad (2)$$

wobei bei der Abwärmenutzung nur die Wärmemenge für die Deckung des Lastprofils berücksichtigt wird, nicht aber die für den Betrieb des ORC-Moduls.

Der Eigenverbrauch kann wie folgt berechnet werden:

$$Eigenverbrauch = \frac{\text{genutzte Wärme aus Abwärme}}{\text{Gesamtabwärmemenge}}. \quad (3)$$

Mit zunehmender Wärmelast nimmt die Autarkie ab und der Eigenverbrauch zu (siehe Abbildung 4). Hier wird die zeitliche Abhängigkeit der Energieströme gut veranschaulicht. Mit zunehmender Amplitude (Spitzenlast) des Wärmelastprofils nimmt die Überlagerung der beiden Profile zu. Der Einfluss der Zeitverschiebung wird deutlicher. Folglich wird mehr Abwärme aus dem Stoßofen zur Deckung der Wärmelast verwendet, der Überschuss nimmt

ab. Bei der Wärmespeicherung wird die Energie dynamisch zwischen mehreren Zeitschritten übertragen, was sich positiv auf die Autarkie und den Eigenverbrauch auswirkt.

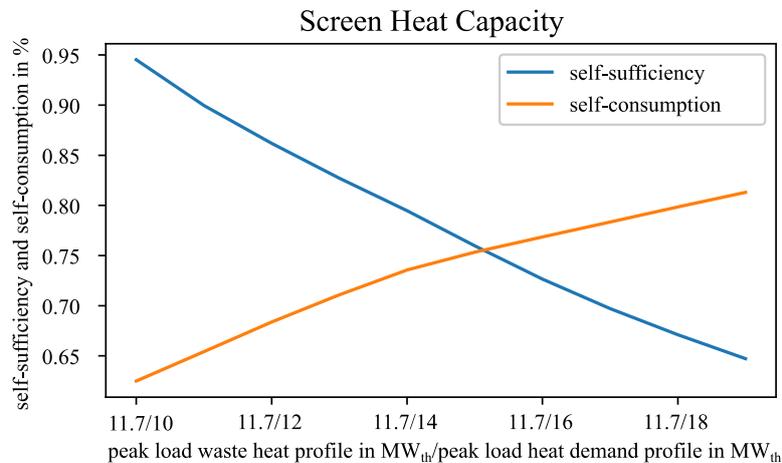


Abbildung 4. Autarkie (blau) und Eigenverbrauch (orange) für verschiedene Wärmeverhältnisse, bestehend aus der Spitzenlast aus dem Abwärmeprofil geteilt durch die Spitzenlast aus dem Wärmebedarfsprofil. Die zweite Spitzenlast wird in Schritten von 1 MW<sub>th</sub> erhöht. Die betrachtete Versorgungsmethode ist Szenario 4.

## 4 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Studie ist es, Ansätze für die Dekarbonisierung der stahlverarbeitenden Industrie zu identifizieren. Als Referenz dienen die Daten eines realen Unternehmens der sekundären Stahlerzeugung. Deren Abwärme aus einem Stoßofen soll im Sinne der Sektorkopplung genutzt werden. Mit dem entwickelten realitätsnahen Prozessmodell der Sekundärstahlerzeugung kann ein Energiesystem dynamisch optimiert werden. Dazu wird es um verschiedene Module (z.B. erneuerbare Energieträger oder Energieumwandlungstechnologien) erweitert, die aus spezifischen techno-ökonomischen Parametern bestehen. Dies erfolgt unter Berücksichtigung des individuellen Bedarfs. Die Integration des Wärmebedarfs einer Kommune zeigt, dass eine nahezu 100%ige Autarkie mit der vorhandenen Abwärme möglich ist. Unter dem Aspekt der Sektorenkopplung ergibt sich daraus ein gesamtes monetäres und CO<sub>2</sub>-basiertes Einsparpotenzial. Ein breiter Einsatz dieser Technologien führt zu einem potenzierten Treibhausgas-Einspareffekt. Dies ist ein wesentlicher Schritt zur Überwindung bestehender Hemmnisse bei der Einführung solcher Technologien.

## 5 Referenzen

- AG Energiebilanzen e.V. (2021). Evaluation Tables of the Energy Balance for Germany. Energy data for the years 1990 to 2020. Berlin.
- Agora Energiewende and Wuppertal Institut (2019). Klimaneutrale Industrie. Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin.
- Bundesnetzagentur, Bundeskartellamt (2021). Gaspreise\* für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020, as cited in de.statista.com, URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/168528/umfrage/gaspreise-fuer-gewerbe--und-industriekunden-seit-2006/>, last accessed 09.12.2021.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2021). Industriestrompreise\* (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2021, as cited in de.statista.com, URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/>, last accessed 09.12.2021.
- co2online (2021). Fernwärme: Technik, Nutzung, Kosten und Alternativen, URL <https://www.co2online.de/modernisieren-und-bauen/heizung/fernwaerme/>, last accessed 16.09.2021.
- EEB ENERKO Energiewirtschaftliche Beratung GmbH (2018). Großwärmespeicher – Bausteine der Energiewende.
- Elsner, P., Sauer, D.U. (2015). Energiespeicher Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech–Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Union der deutschen Akademien der Wissenschaften.
- Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (2020). Bundeskabinett beschließt höheren CO<sub>2</sub>-Preis, Entlastungen bei Strompreisen und für Pendler. Press release, URL <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200520-bundeskabinett-beschliesst-hoeheren-co2-preis.html>, last accessed 14.12.2021.
- Grote, L. et al. (2015). Abwärmenutzung - Potentiale, Hemmnisse und Umsetzungsvorschläge. Institut für ZukunftsEnergieSysteme. Saarbrücken.
- Hart, W.E. et al. (2011). Pyomo: modeling and solving mathematical programs in Python. Mathematical Programming Computation, Volume 3, Article number: 219.
- Großklos, M. (2020). Kumulierter Energieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und –versorgungen. Institut Wohnen und Umwelt.
- Kloth, P. Kosten für Photovoltaik-Anlagen - Preise im Vergleich, URL <https://www.energieheld.de/solaranlage/photovoltaik/kosten>, last accessed 10.12.2021.
- Knosala, K. et al. (2021). Hybrid Hydrogen Home Storage for Decentralized Energy Autonomy. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 46, Issue 42, 21748-21763
- Kunz, F. et al. (2017). Reference Data Set: Electricity, Heat, and Gas Sector Data for Modeling the German System (1.0.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1044463>
- Orcan Energy AG. Datasheet “efficiency PACK eP 150.200”.
- Pro Energy Solutions. Photovoltaik-Großanlagen – Solarenergie sinnvoll nutzen, URL <https://www.pro-energy-solutions.de/photovoltaik-grossanlage/>, last accessed 10.12.2021.
- Solaranlage Ratgeber (2021). Solarstromspeicher Auswahlkriterien, URL <https://www.solaranlage-ratgeber.de/photovoltaik/photovoltaik-technik/energiespeicher-photovoltaikanlagen/solarstromspeicher-auswahlkriterien>, last accessed 10.12.2021.
- Stockmann, F., Wagner, R. (2016). ORC-Technik (Nachverstromung – Wirtschaftlichkeit und Grenzen. C.A.R.M.E.N. e.V. Bösleben.

Welder, L. et al. (2018). Spatio-temporal optimization of a future energy system for power-to-hydrogen applications in Germany. *Energy*, Volume 158, 1130-1149.

WEMAG AG. Datasheet "Solide Speicher-Station. Flexible Anwendungen".

Zhiyuan, F., Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, Volume 5, Issue 4, 829 – 862.

## Anhang

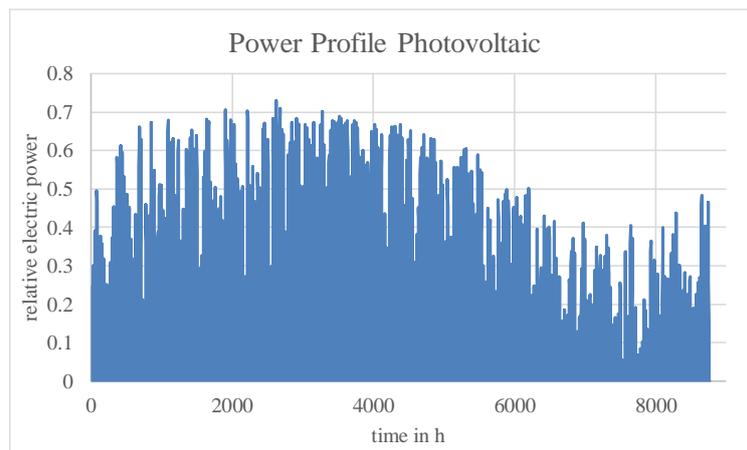


Abbildung A1. Leistungsprofil der Photovoltaik aus Referenzdaten in Deutschland (Kunz et al. 2017). Die y-Achse ist normiert und bezieht sich auf die installierte Leistung in Form der maximal installierten Leistung. Die Zeit auf der x-Achse gibt die Betriebsstunden für ein repräsentatives Jahr an.

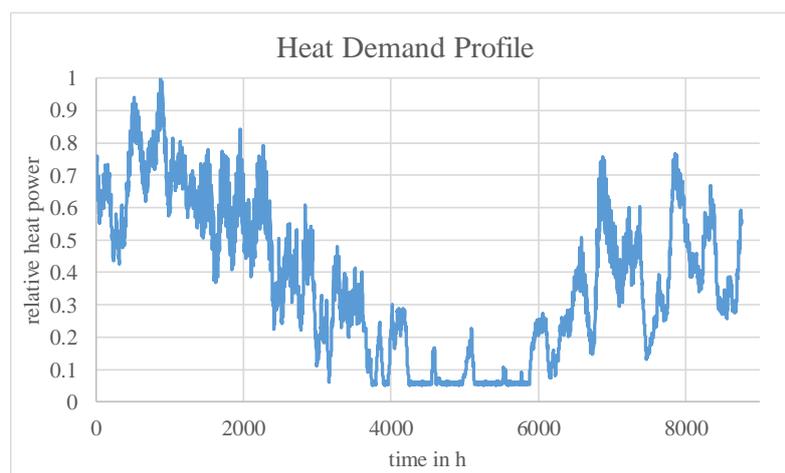


Abbildung A2. Normalisiertes Wärmeprofil basierend auf Kunz et al. (2017). Die Zeit auf der x-Achse ist ein repräsentatives Jahr.