

Klimaneutrale Planung von Brownfield- und Greenfield-Fabriken

Methodisches Vorgehen zur Energiesystemplanung

A. Emde, F. Schnell, A. Sauer

Dieser Beitrag beschreibt ein methodisches Vorgehen zur Energiesystemplanung. Das Anwendungsziel ist die Optimierung der Energiesystemplanung von Brownfield- und Greenfield-Fabriken unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer KPIs wie CO₂-Neutralität, Klimaneutralität und Autarkie. Außerdem werden Methoden zur Erzeugung der Datengrundlage vorgestellt, da repräsentative Lastprofile die wesentliche Grundlage zur sinnhaften Planung von Energiesystemen bilden. Abschließend wird ein Anwendungsfall in einem Unternehmen vorgestellt.

STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Energieeffizienz, Nachhaltigkeit

Methodological approach to energy system planning

This paper describes a methodological approach to energy system planning. Its application aims at optimizing the planning of energy systems for brownfield and greenfield factories, considering company-specific KPIs such as CO₂ neutrality, climate neutrality and self-sufficiency. The paper also presents methods for generating the data basis, since representative load profiles lay the groundwork for sensible energy system planning, and also includes an industry use case.

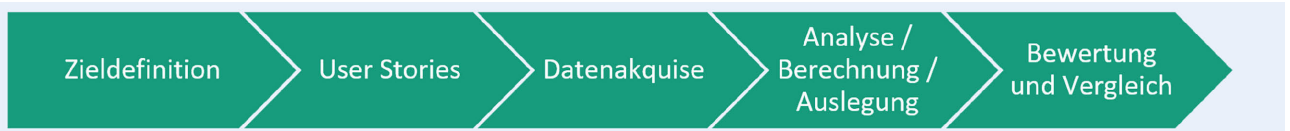


Bild 1. Ablaufplan der Methodik zur Energiesystemplanung. Grafik: Fraunhofer IPA

1 Einleitung

Der Energieverbrauch von Industrie und Gewerbe machte im Jahr 2020 44,2% des Gesamtenergiebedarfs in Deutschland aus [1]. Damit waren die Industrie (23,6%) und die Energiewirtschaft (30,2%) für den Großteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich [2]. Um die Treibhausgase reduzieren und so die Klimaziele erreichen zu können, ist es notwendig, die Energieversorgung innerhalb von Fabriken neu zu denken.

Der vorliegende Beitrag stellt ein methodisches Vorgehen vor, wie die Energieversorgung von Brownfield- und Greenfield-Fabriken unter Berücksichtigung unternehmensspezifischer KPIs (Key Performance Indicators), wie CO₂-Neutralität, Autarkie oder sogar Klimaneutralität (keine Emittierung von Treibhausgasen), geplant werden kann.

2 Methodisches Vorgehen

Bild 1 zeigt das methodische Vorgehen zur Energiesystemplanung. Die Phasen innerhalb der Methodik sind an die Planungsschritte und Planungsaktivitäten nach [3, 4] angelehnt.

2.1 Erste Phase: Zieldefinition

Zu Beginn der Energiesystemplanung müssen die Ziele des Vorhabens festgelegt werden. Die Zieldefinition startet mit der Bestimmung des vorliegenden „Falls“ des Planungsvorhabens. Im Rahmen der Energiesystemplanung ist in Brownfield- und Greenfield-Planungsfälle zu unterscheiden. Die Brownfield-Planung eines Unternehmensstandortes nimmt auf einen bereits bestehenden Standort Bezug, der umgebaut, rückgebaut oder revitalisiert wird. Dadurch sind Daten über den Energiebedarf vorhanden, die zur Planung genutzt werden können. Bei der Greenfield-Planung hingegen existiert der geplante Standort noch nicht, sodass keine Daten über den zu erwartenden Energiebedarf vorliegen. [5]

Im Falle einer Brownfield-Planung ist die momentane Energieversorgung am bestehenden Unternehmensstandort zu analysieren. Bei der Analyse kann der Anwender beispielsweise durch verschiedene Feedbackmethoden, wie die Fünf-Finger-Methode, die Zielscheiben-Methode oder die Ampelmethode unterstützt werden [6, 7]. So lassen sich Anforderungen, welche zukünftig beibehalten oder verbessert werden sollen, identifizieren und festhalten. Aus diesen Erkenntnissen kann das Projektteam die Zielgrößen (KPIs) für die zukünftige Energieversorgung ableiten.

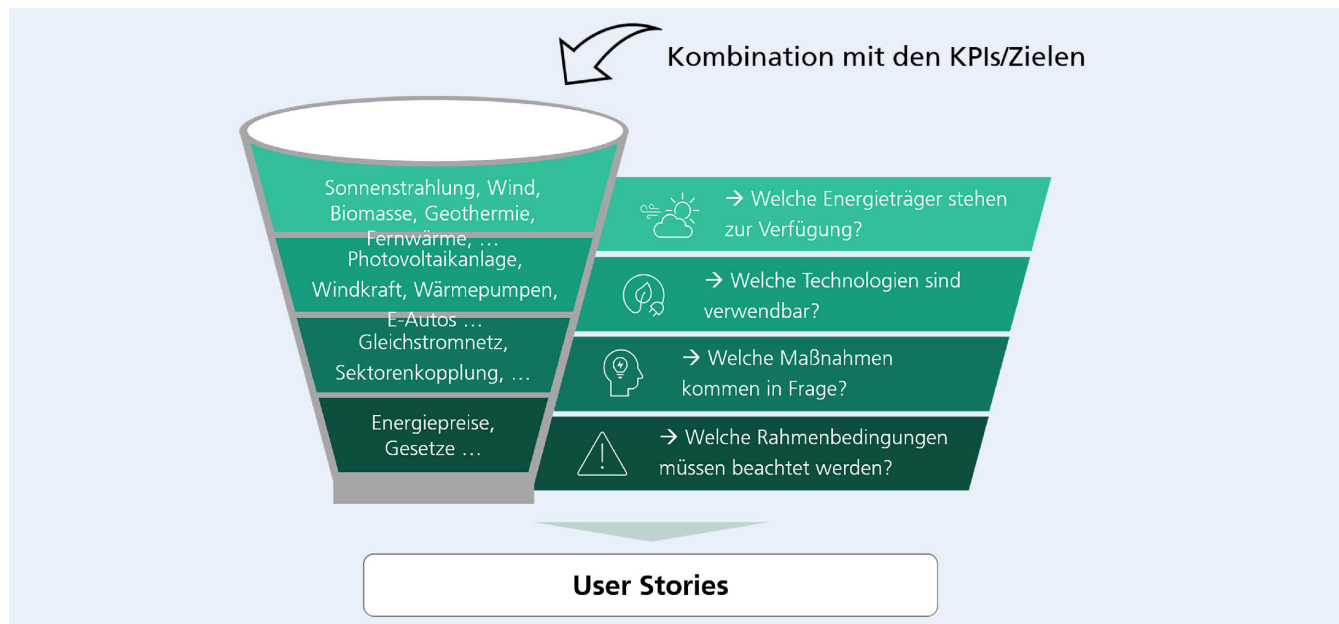


Bild 2. Vorgehen zur Erstellung der User Stories. Grafik: Fraunhofer IPA

Ein beispielhafter KPI wäre, die Reduktion der CO₂-Emissionen um mindestens 60 %.

Bei der Greenfield-Planung existiert der geplante Unternehmensstandort noch nicht. Dennoch besteht die Möglichkeit, einen anderen Unternehmensstandort als Referenz auszuwählen und dessen Energieversorgung nach dem beschriebenen Vorgehen zu analysieren.

2.2 Zweite Phase: Entwicklung der User Stories

Nachdem die Anforderungen an und die Ziele der Energieversorgung in Form von KPIs definiert sind, muss festgelegt werden, wie diese Ziele zu erreichen sind. Hierfür können beispielsweise User Stories verwendet werden. User Stories beschreiben unter Berücksichtigung der am Standort verfügbaren Ressourcen, mit welchen Maßnahmen die festgeschriebenen KPIs erreicht werden sollen. Zur Entwicklung der User Stories wird das Trichtermodell aus Bild 2 verwendet.

Das Trichtermodell umfasst vier Fragestellungen zu den Rahmenbedingungen der Energieversorgung des Unternehmens: Zuerst ist zu klären, welche Energieträger am Unternehmensstandort zur Verfügung stehen. Dann ist festzulegen, welche Technologien zur Energieerzeugung am Standort grundlegend einsetzbar sind. Im nächsten Schritt werden Maßnahmen gesammelt, mit denen die Energieversorgung des Standortes verbessert werden kann. Zuletzt ist zu klären, welche sonstigen Rahmenbedingungen bei der Energieversorgung zu beachten sind.

Nachdem die Fragestellungen des Trichtermodells beantwortet sind, müssen seine Ergebnisse mit den zuvor festgelegten KPIs in Form von User Stories verknüpft werden. Für ihre Erstellung ist es hilfreich, zunächst die Ergebnisse des Trichtermodells mit konkreten KPIs zu gruppieren. Aus den Gruppierungen lassen sich sodann die User Stories ableiten. Folglich geben die User Stories vor, welche Ziele mit den einzelnen Maßnahmen verfolgt werden: Eine beispielhafte User Story ist: „Fotovoltaikanlage auf maximale CO₂-Reduktion auslegen“. Aus dieser User Story geht hervor, dass die Fotovoltaikanlage größtmöglich dimensioniert

werden muss. Folglich ist ihre Wirtschaftlichkeit niedriger priorisiert als die CO₂-Reduktion und spielt somit eine untergeordnete Rolle.

Abschließend werden die entwickelten User Stories nach ihrem Nutzen (wie CO₂-Einsparung, Amortisation) und Aufwand (wie Investition, Umsetzungsdauer) eingeordnet, um sie in Abhängigkeit von den Projektzielen zu priorisieren. Somit ist es möglich bei widersprüchlichen User Stories zu erkennen, auf welchem KPI der Fokus der Energiesystemplanung liegt. Die priorisierten User Stories stellen den Leitfaden für die spätere Analyse, Auslegung und Berechnung der Maßnahmen (Phase 4) dar.

2.3 Dritte Phase: Datenakquise

Um die Energieversorgungstechnologien zu dimensionieren, werden unternehmensspezifische Parameter (wie Energiepreise, Schichtmodell) sowie repräsentative Lastprofile benötigt, die mithilfe eines Fragenkatalogs gesammelt werden können. Sind keine realen Lastprofile für den untersuchten Standort vorhanden, so bieten sich unterschiedliche Ermittlungsmöglichkeiten, die im Folgenden beschrieben werden.

2.3.1 Theoretische Lastprofilermittlung

Die theoretische Lastprofilermittlung nutzt empirische Methoden zur Lastprofilerstellung, ohne reale Messungen an Unternehmensstandorten durchführen zu müssen. Daher sollte diese gewählt werden, wenn die Daten zeitnah benötigt werden oder eine Messung am bestehenden Standort zu aufwendig ist oder kein Referenzstandort existiert. Demnach ist die theoretische Lastprofilermittlung vor allem bei Greenfield-Planungsfällen sinnvoll. Bei der theoretischen Lastprofilermittlung ist im Folgenden in die elektrische und thermische Lastprofilermittlung zu unterscheiden:

1. Theoretische elektrische Lastprofilermittlung

Zur theoretischen elektrischen Lastprofilermittlung können die Standardlastprofile des VDEW (Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.) verwendet werden. Dort werden standardisierte Lastprofile in Abhängigkeit von Gewerbe, Tagestyp und Jahreszeit aneinandergereiht und unter Berücksichtigung des Jahresverbrauchs der Kundengruppe skaliert [8]. Für energieintensive Unternehmen (elektrischer Jahresverbrauch über 100 000 kWh/a) treffen die Standardlastprofile des VDEW nur begrenzt zu, weshalb sie entsprechend angepasst werden müssen [9]. Alternativ kann der elektrische Bedarf über die Anzahl und die Leistungsangaben der Maschinen in Kombination mit den unternehmensspezifischen Gleichzeitigkeitsfaktoren sowie dem Schichtmodell prognostiziert werden. Als weitere Ermittlungsmethode kann der Strombedarf simuliert werden, dies bringt aber einen erheblichen Zeitaufwand mit sich.

2. Theoretische thermische Lastprofilermittlung

Bei der theoretischen Erstellung thermischer Lastprofile gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, unter denen in Abhängigkeit vom konkreten Detaillierungsgrad abzuwägen ist. Anhand der Gebäudeabmessungen, der Raum-/Außentemperatur, der Luftwechselzahl und dem Wärmedurchgangskoeffizient kann überschlägig die benötigte Wärmeleistung des Gebäudes berechnet werden [10]. Eine weitere Möglichkeit zur Prognose des thermischen Energiebedarfs von Gebäuden bietet die DIN V 18599 [11]. Ergänzend stellt der BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft) ein Berechnungstool für „Standardlastprofile Gas“ bereit, die den Gasbedarf abhängig von der Umgebungstemperatur widerspiegeln. Darüber hinaus existieren zahlreiche Methoden zur Prognose des Wärmebedarfs in Abhängigkeit von der Gebäudenutzung (Wärme und Kühlung von Wohngebäuden [12, 13], Profile für Wärme, Kühlung und Strom für kommerziell genutzte Gebäude [14] sowie Wärme und Kühlung verschiedener Gebäudetypen nach EU-Ländern [15]). Für detailliertere thermische Lastprognosen können Simulationsprogramme wie etwa „EnergyPlus“ oder „Trnsys“ genutzt werden, in denen der geplante Unternehmensstandort modelliert und simuliert wird [16]. Der Prozesswärmebedarf kann ähnlich wie der Strombedarf über Simulationen berechnet oder über die Maschinenanzahl und -leistungen mit den Gleichzeitigkeitsfaktoren und dem Schichtmodell prognostiziert werden.

2.3.2 Praktische Lastprofilermittlung

Für die praktische Lastprofilermittlung wird zwangsläufig ein Referenzstandort benötigt. An ihm werden reale Messungen durchgeführt, mit deren Hilfe drei Varianten des Energiebedarfs für den geplanten Unternehmensstandort zu entwickeln sind:

1. Variante: Skalierung über Gesamtfläche

Bei der ersten Variante werden die Energieverbräuche des geplanten Standorts über die Gesamtgrundfläche skaliert. Dafür werden die Energieverbräuche des Referenzstandortes in Relation zu dessen Fläche ermittelt. Durch Extrapolation auf die Gesamtfläche des geplanten Standortes entsteht die erste Lastprofil-Variante.

2. Variante: Skalierung von Lastzonen

Bei der zweiten Variante wird der Referenzstandort in einzelne Lastzonen unterteilt. Alle Lastzonen mit ihren Energiebedarfen werden anschließend in Abhängigkeit vom geplanten Standort einzeln skaliert. Indem die skalierten Lastzonen zu einem

Gesamtenergiebedarf zusammengefasst werden, entsteht die zweite Lastprofil-Variante.

3. Variante: Skalierung von Lastzonen (durch Expertenwissen optimiert)

Die dritte Energieverbrauch-Variante basiert auf dem Lastprofil der zweiten Variante, das anhand Expertenwissen des Betreibers oder der Produktion verfeinert wird. Indem Experten abschätzen, wie der Energiebedarf der einzelnen Lastzonen (aus Variante 2) sich verändern wird, werden Faktoren gebildet, die den Energiebedarf je Lastzone nochmals skalieren. Durch Zusammenfassen der Lastzonen zu einem Gesamtenergiebedarf entsteht die dritte Lastprofil-Variante.

Aus den drei erstellten Varianten ist in Abstimmung mit dem Betreiber das bestgeeignete Lastprofil für das weitere Vorgehen auszuwählen. Die Vorteile dieses Vorgehens (das für die elektrische und thermische Lastprofilermittlung genutzt werden kann) gegenüber der theoretischen Lastprofilermittlung sind seine hohe Genauigkeit und Vergleichbarkeit.

Falls bei einem bestehenden Unternehmensstandort lediglich das Energieversorgungskonzept überarbeitet wird, kann das Lastprofil messtechnisch am Standort erfasst werden und eine Skalierung ist nicht notwendig (3 Varianten).

2.3.3 Wetterdaten

Um die Energieversorgungstechnologien bewerten zu können, werden neben den spezifischen Lastprofilen auch Wetterdaten des Unternehmensstandortes benötigt (Sonnenscheindauer, Sonnenstrahlungsintensität, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit). Während für Deutschland historische Wetterdaten über den Deutschen Wetterdienst bezogen werden können, kann für andere Länder auf kostenpflichtige Portale zurückgegriffen werden [17, 18]. Alternativ besteht die Möglichkeit, vorhandene Wetterdaten von bekannten Standorten auf andere zu übertragen. Als Indikator können die durchschnittliche Sonnenscheindauer, die mittlere Umgebungstemperatur sowie die durchschnittliche Globalstrahlung dienen.

2.4 Vierte Phase: Analyse / Berechnung / Auslegung

Sobald die Datengrundlage vollständig ist, beginnt die quantitative Betrachtung der Energieversorgungsszenarien. Hierfür werden die einzelnen Technologien/Maßnahmen gemäß der User Stories dimensioniert und bewertet. Durch ihre Kombination entstehen verschiedene Energieversorgungsszenarien, die analysiert werden. Gleichermaßen wird eine Baseline erstellt, welche die klassische Deckung des Energiebedarfs (öffentliches Strom- und Gasnetz) darstellt und als Vergleichsszenario dient.

2.5 Fünfte Phase: Bewertung und Vergleich

Für die Bewertung der Energieversorgungsszenarien werden energetische (beispielsweise Strom- und Wärmeproduktion, Autarkiegrad) ökologische (wie CO₂-Emissionen, CO₂-Einsparung) und ökonomische (wie Investitionen, Amortisationsdauer) Bewertungskriterien verwendet, die in Abhängigkeit von den KPIs projektbezogen priorisiert werden. Indem die bewerteten Energieversorgungsszenarien miteinander verglichen werden, kann das geeignetste Szenario für den Unternehmensstandort ausgewählt werden.

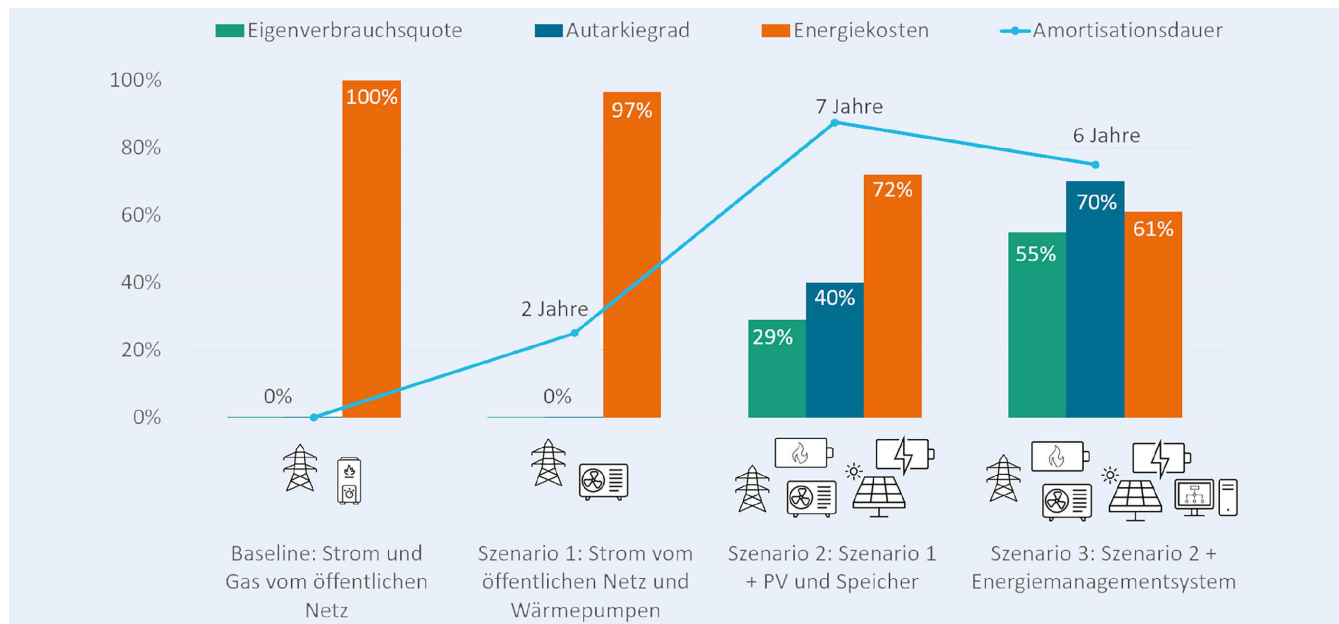


Bild 3. Ergebnisse des Szenarienvergleichs. Grafik: Fraunhofer IPA

3 Praxisbeispiel

Die vorgestellte Methodik wurde bei Industrieunternehmen unterschiedlicher Branchen erfolgreich angewendet. Nachfolgend wird exemplarisch einer der Anwendungsfälle in einem deutschen Unternehmen vorgestellt, dessen Ziel es ist, einen CO₂-freien Fabrikbetrieb zu ermöglichen. Durch den CO₂-intensiven Strommix Deutschlands (420 g CO₂/kWh im Jahr 2021 [19]) bedarf es dazu einer größtmöglichen Autarkie bei maximaler Effizienz. Weitere KPIs sind die Reduktion der Spitzenlast, die Elektrifizierung der kompletten Energieversorgung sowie eine hohe Versorgungssicherheit.

Aus den priorisierten User Stories gingen vier Energieversorgungsszenarien hervor, die auf eine maximale CO₂-Reduktion abzielen und deren Wirtschaftlichkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Die in den Szenarien verwendeten Technologien sind ein thermischer sowie ein elektrischer Speicher, eine Fotovoltaikanlage und Wärmepumpen zur Kälte- und Wärmeversorgung. Außerdem soll das Energiemanagementsystem nach dem „Industrial Smart Grid“-Design [20] optimiert und die Last nach [21] prognostiziert werden. Zur Datenerhebung wurde die praktische Lastprofilermittlung Variante 3 (siehe Abschnitt 2.3.2) genutzt.

Die Simulation der Szenarien ergab, dass ein Autarkiegrad von bis zu 70 % möglich ist. Dadurch kann verglichen mit der Baseline der Strombedarf vom öffentlichen Netz nahezu halbiert und die Spitzenleistung um ein Drittel gesenkt werden. Durch Einbinden eines elektrischen Speichers kann die Eigenverbrauchsquote auf 55 % gehoben werden, wodurch die Energiekosten um 40 % gesenkt werden. Verglichen mit der Energieversorgung über das öffentliche Stromnetz in Kombination mit der thermischen Versorgung über das Gasnetz ist in sechs Jahren mit einer Amortisation der Investition zu rechnen (Bild 3). Ein Vergleich der Energieversorgungsszenarien ergab, dass das dritte Szenario das bestgeeignete ist, welches inzwischen bereits umgesetzt wird.

4 Zusammenfassung

Die vorgestellte Methodik zur Energiesystemplanung begleitet Industrieunternehmen im Planungsprozess der Energieversorgung. Durch die fünf Schritte ist es möglich, zielorientiert und effizient das geeignetste Energieversorgungsszenario auszuwählen. Eine zentrale Rolle spielen dabei die User Stories, welche die Rahmenbedingungen der Energieversorgung (Ergebnisse des Trichtermodells) mit den KPIs verknüpfen.

Um die aus den User Stories hervorgehenden Maßnahmen bewerten zu können, bedarf es einer repräsentativen Datengrundlage. Daher wurden theoretische sowie praktische Ansätze zur Datenakquise fehlender Lastprofile vorgestellt. Auf Basis der Bewertung der Energieversorgungsszenarien kann abschließend die geeignetste Variante ausgewählt werden. Wie das Praxisbeispiel zeigt, wurde die vorgestellte Methodik bereits erfolgreich angewendet.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt: Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Stand: 25.03.2022. Internet: www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren#allgemeine-entwicklung-und-einflussfaktoren. Zugriff am 11.11.2022
- [2] Umweltbundesamt: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2020. Gekürzte Version zur EU-Submission 15.01.2022. Stand: 2022. Internet: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/eu-nir_germany_2022.pdf. Zugriff am 11.11.2022
- [3] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T. et al.: Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Heidelberg: Springer-Verlag 2009
- [4] Emde, A.; Ritter, M.; Sauer, A.: Methode zur Auslegung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern. Bewertung von Anwendungsfällen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 9, S. 613–618
- [5] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Richtlinie 5200 – Blatt 1. Fabrikplanung Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag 2011

- [6] Gregory, P.: Agile Processes in Software Engineering and Extreme Programming – Workshops. XP 2021 Workshops, Virtual Event, June 14–18, 2021, Revised Selected Papers. Cham: Springer International Publishing AG 2021
- [7] Schmid, P.; Wittwer, P.: Im Unterricht braucht es „eine kräftige Portion Feedback“ Die Kunst des Feedbacks. Basler Schulblatt 81 (2020) 4, S. 6–7, dx.doi.org/10.26041/fhnw-3716
- [8] VDEW (Hrsg.): Repräsentative VDEW-Lastprofile. Stand: 1999. Internet: www.bdew.de/media/documents/1999_Repraesentative-VDEW-Last-profile.pdf. Zugriff am 11.11.2022
- [9] Emde, A.; Zimmermann, F.; Feil, M. et al.: Erstellung und Validierung von Lastprofilen für die energieintensive Industrie. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 9, S. 545–549
- [10] Dassler Industrieventilatoren: Wärmebedarfsberechnung. Stand: 28.11.2010. Internet: www.dassler-online.de/wbd.htm. Zugriff am 11.11.2022
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN V 18599:2018–09. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung. Ausgabe 2018
- [12] Bernardi, A.; Carli, M. D.; Galgaro, A. et al. (Hrsg.): Definition of standardized energy profiles for heating and cooling of buildings. Proceedings of the 12th REHVA World Congress; Heiselberg, Per Kvols, Aalborg, Denmark, Heft 6, 2016
- [13] Carnieletto, L.; Badenes, B.; Belliardi, M. et al.: A European Database of Building Energy Profiles to Support the Design of Ground Source Heat Pumps. Energies 12 (2019) 13, p. 2496
- [14] Yilmaz, S.; Murray, P.; Bollinger, A. et al.: Hourly Demand Profiles for Space Heating and Electricity. University of Geneva, EMPA. Zürich: ETH Zurich 2020
- [15] Zangheri, P.; Armani, R.; Pietrobon, M. et al.: Heating and cooling energy demand and loads for building types in different countries of the EU. D2.3. of WP2 of the Entranze Project. Turin: Polytechnic University of Turin 2014
- [16] Dall'O', G.: Green Energy Audit of Buildings. A guide for a sustainable energy audit of buildings. London: Springer 2013
- [17] Deutscher Wetterdienst: Klimadaten Deutschland – Stundenwerte (Archiv). Internet: www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klarchivstunden.html. Zugriff am 11.11.2022
- [18] Meteomatics: Wetter Intelligence. Internet: www.meteomatics.com/de/. Zugriff am 11.11.2022
- [19] Umweltbundesamt: CO₂-Emissionen pro Kilowattstunde Strom steigen 2021 wieder an. Stand: 21.04.2022. Internet: www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen. Zugriff am 11.11.2022
- [20] Tristan, A.; Emde, A.; Reisinger, M. et al.: Energieflexibilität im Industrial Smart Grid. WT Werkstattstechnik Online 109 (2019) 5, S. 301–306. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: VDI Fachmedien
- [21] Emde, A.; Sauer, A.; Märkle, L. et al.: Ermittlung des zukünftigen Energiebedarfs von Industrie-unternehmen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020) 3, S. 153–157



Alexander Emde, M. Eng.

Foto: Fraunhofer IPA

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
Tel. +49 711 / 970-1916
alexander.emde@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Felix Schnell, B. Eng.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Alexander Sauer**
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
Universität Stuttgart
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
felix.schnell@eep.uni-stuttgart.de
www.eep.uni-stuttgart.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)