



Alexander Sauer
Hans Ulrich Buhl
Alexander Mitsos
Matthias Weigold

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Band 2: Markt- und Stromsystem,
Managementsysteme und Technologien
energieflexibler Fabriken

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Alexander Sauer
Hans Ulrich Buhl
Alexander Mitsos
Matthias Weigold

ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Band 2: Markt- und Stromsystem, Managementsysteme und
Technologien energieflexibler Fabriken

KOPERNIKUS
SynErgie **PROJEKTE**
Die Zukunft unserer Energie

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird bei Personenbezeichnungen und personenbezogenen Begriffen in diesem Buch das generische Maskulinum verwendet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung grundsätzlich für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform hat nur redaktionelle Gründe und beinhaltet keine Wertung.



Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung

Liebe Leserinnen und Leser,

vollständige Klimaneutralität 2045 und ein möglichst rasches Ende der Abhängigkeit von fossilen Energieimporten – wir stehen vor großen energiepolitischen Herausforderungen.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung versteht sich als Schrittmacher der Energiewende. Bereits im Jahr 2016 haben wir die Kopernikus-Projekte ins Leben gerufen.

Denn: Wer Tempo in der Energiewende will, braucht Spitzenforschung – und einen effektiven Brückenschlag in die Anwendung. Die Kopernikus-Projekte und SynErgie stehen genau hierfür.

Dieser zweite SynErgie-Band zeigt die erfolgreiche Arbeit des Projekts. Neben Lösungen für die großen Energieverbraucher hat SynErgie mit der Betrachtung von Kälte- und Wärmeanlagen die Anwendung von Energieflexibilität auch für kleine und mittlere Unternehmen möglich gemacht. Zudem zeigt der erfolgreiche Test der SynErgie-Energiesynchronisationsplattform, dass der Handel mit Flexibilität binnen kürzester Zeit umgesetzt werden könnte.

In den nächsten Jahren gilt es, die in diesem Buch umfassend dargestellten Konzepte in die breite Anwendung zu bringen und, wo nötig, weiterzuentwickeln. Denn nur mit Lösungen wie denen aus SynErgie lässt sich die Energiewende erfolgreich umsetzen.

Bei angewandter Energieflexibilität profitieren im Idealfall alle:

- Die Umwelt, weil Energieflexibilität die Integration von erneuerbaren Energien im Netz unterstützt.
- Die Bürgerinnen und Bürger, weil wir durch Energieflexibilisierung weniger Netzausbau benötigen.
- Die Netzbetreiber, weil ihnen die Flexibilitäten bei der Stabilisierung der Stromnetze helfen.
- Und die Unternehmen, die ihre Stromnachfrage an das Stromangebot anpassen, weil sie ihre Flexibilität als Dienstleistung verkaufen können und von niedrigeren Stromkosten profitieren.

Die Ergebnisse des SynErgie-Projekts zeigen eindrücklich, was Forschung bewirken kann, wenn Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft von Anfang an zusammenarbeiten. Ich bin beeindruckt und stolz, dass der Plan unserer Kopernikus-Initiative so erfolgreich aufgegangen ist: SynErgie ist Forschung, die Wirkung zeigt. Dafür vielen Dank an alle Projektpartner und allen Leserinnen und Lesern eine anregende Lektüre.

Herzlichst,

Ihr Christoph Rövekamp

Leiter des Referats »Energie; Wasserstofftechnologien« im Bundesministerium für Bildung und Forschung

Vorwort der Herausgeber

Liebe Leserinnen und Leser,

seit der Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 sehen sich alle Länder mit der Frage konfrontiert, wie die Zukunft der Energieversorgung gestaltet werden kann und wie klimafreundliche Technologien mit dem Ziel der Klimaneutralität etabliert werden können (United Nations, 2015; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2018). Mit dem Green Deal hat sich die Europäische Union verpflichtet, bis 2050 keine Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen (Europäische Kommission, 2019). Die deutsche Bundesregierung möchte dieses Ziel bereits im Jahr 2045 erreichen (Bundes-Klimaschutzgesetz, 2019).

Eine wichtige Säule hierfür ist das Vorantreiben des Ausbaus erneuerbarer Energien. Deutschland ist in diesem Bereich Technologie- und Innovationstreiber und konnte im Jahr 2020 bereits 47,4 Prozent des deutschen Bruttostromverbrauchs durch erneuerbare Energien abdecken. 2021 gab es wegen schlechterer Wetterbedingungen und eines stark steigenden Stromverbrauchs einen Rückgang auf 42,6 Prozent (Bundesnetzagentur, 2021a; Bundesnetzagentur, 2022). Die deutsche Bundesregierung strebt an, bis 2030 einen Anteil der erneuerbaren Energien von 65 Prozent am Bruttostromverbrauch zu erreichen, und das bei weiterhin steigendem Stromverbrauch (Erneuerbare-Energien-Gesetz EEG, 2021). Die neue deutsche Bundesregierung hat sich diesbezüglich im Dezember 2021 vorgenommen, »neues Tempo in die Energiewende [zu bringen], indem wir Hürden für den Ausbau der Erneuerbaren Energien aus dem Weg räumen« (SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, 2021). Auch global ist ein stark ansteigender Ausbau erneuerbarer Energie mit einem Rekordwert an neu installierter Leistung von 290 GW im Jahr 2021 zu erkennen (International Energy Agency, 2021).

Für eine erfolgreiche Umsetzung solch hoher Anteile erneuerbarer Energien muss ein Energiesystem geschaffen werden, das mit der zunehmend fluktuierenden Stromeinspeisung als Folge des steigenden Anteils erneuerbarer Energien umgehen kann (Fell, 2020; Papaefthymiou et al., 2018). Wie relevant dies ist, zeigt sich auch an der zunehmenden Anzahl von Stunden mit negativen Strompreisen am Day-Ahead-Markt: Diese Stunden mit einem Überschuss erneuerbarer Energien im Stromsystem stiegen von 126 Stunden im Jahr 2015 auf 298 Stunden im Jahr 2020 (Bundesnetzagentur, 2021a).

Für die erfolgreiche Gestaltung der Energiewende rief das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2015 die Kopernikus-Projekte ins Leben und initiierte die bis dahin größte nationale Forschungsinitiative zur Energiewende. Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft entwickeln gemeinsam technologische und wirtschaftliche Lösungen für den Umbau hin zu einem klimaneutralen Energiesystem (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2021). Die Kopernikus-Projekte verfolgen vier große Forschungsvorhaben:

- Ariadne – Politische Maßnahmen für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende
- ENSURE – Weiterentwicklung der Stromnetze



- P2X – Umwandlung erneuerbarer Energie in stoffliche Energieträger
- SynErgie – Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung

Eine der großen Herausforderungen bei der Etablierung einer nachhaltigen Versorgung durch erneuerbare Energien liegt in deren fluktuierender Stromerzeugung. Die Leistung aus Windkraft und Photovoltaik schwankt kurzfristig über die Tageszeit sowie langfristig im Jahresverlauf, z. B. durch untertägige, mehrtägige oder saisonale Wetterveränderungen. Um das Stromsystem bei einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien jederzeit im notwendigen Gleichgewicht von Erzeugung und Verbrauch zu halten, bedarf es großer Mengen an Energiespeicherkapazitäten, Netzausbau und Sektorenkopplung sowie Flexibilität auf der Verbraucherseite (Babatunde et al., 2020). Solange dies nicht erreicht ist, müssen auf der Erzeugerseite kostenintensive Regeleingriffe erfolgen. Im Jahr 2020 wurden hierfür 1,4 Milliarden Euro aufgewendet und durch die Netzentgelte u. a. von allen Bürgern bezahlt (Bundesnetzagentur, 2021b).

Die aus heutiger Sicht erforderlichen Investitionen in die Energieversorgungs- und Netzinfrastruktur können reduziert werden, wenn sich die Entwicklung weg von einer zentralen, verbrauchsorientierten Erzeugung hin zu einer dezentralen, erzeugungsorientierten Verbrauchssteuerung bewegt (Raquet und Liotta, 2013; Deutsche Energie-Agentur, 2017). Innerhalb dieses Paradigmenwechsels wird die Industrie, die in Deutschland einen Anteil von etwa 44 Prozent am Stromverbrauch hat, mehr und mehr dazu übergehen müssen, sich dem Energieangebot flexibel anzupassen (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021). Der Faktor Energie wird somit zu einer variablen Planungs- und Steuerungsgröße im Produktionsbetrieb.

Hier setzt das Kopernikus-Projekt SynErgie mit über 90 Projektpartnern aus Industrie, Wissenschaft, Verbänden und Zivilgesellschaft an. Industrielle Prozesse werden weiterentwickelt, elektrifiziert und flexibilisiert mit dem Ziel, Strom vermehrt dann zu nutzen, wenn er reichlich vorhanden und damit kostengünstig ist, sowie entsprechend weniger, wenn das Gegenteil der Fall ist. Seit September 2016 forscht im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie deutschlandweit eine ganze Generation an hochmotivierten Wissenschaftlern, um den Technologievorsprung deutscher Unternehmen zu sichern und den Grundstein für eine bessere und klimaneutrale Zukunft zu legen. Die Umstellung des deutschen Energiesystems auf volatile erneuerbare Energien soll dadurch ermöglicht und unterstützt werden.

Wichtige Ergebnisse zum Flexibilitätspotenzial der deutschen Industrie, zu konkreten Anwendungen in der industriellen Produktion sowie zur automatisierten Vermarktung der Flexibilität hatten wir bereits im ersten Band unseres Fachbuchs »Energieflexibilität in der deutschen Industrie« dargestellt (Sauer, Abele und Buhl, 2019). Mit dem vorliegenden zweiten Band greifen wir die Thematik erneut auf und geben Ihnen einen Einblick in zwischenzeitlich zusätzlich erarbeitete, wichtige Ergebnisse. Wir wünschen Ihnen viel Freude beim Lesen!

Es grüßen Sie herzlichst,

Ihr Alexander Sauer, Hans Ulrich Buhl, Alexander Mitsos und Matthias Weigold

Im Januar 2022

Die Herausgeber



© Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. **Alexander Sauer**, Jahrgang 1976, ist Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart sowie Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung IPA.

Er hat an der RWTH Aachen Maschinenbau und Betriebswirtschaftslehre studiert, am WZL der RWTH Aachen promoviert und dort verschiedene nationale und internationale Forschungs- und Industrieprojekte geleitet. Anschließend war er verantwortliches Mitglied der Geschäftsleitung eines internationalen Automobilzuliefererunternehmens für den Bereich Operations. Alexander Sauer folgte vor seinem Wechsel nach Stuttgart einem Ruf an die Hochschule München, der mit der Leitung des

Labors für angewandte Fertigungstechnik verbunden war. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des Produktionsmanagements sowie der energie- und ressourceneffizienten Produktion.

Prof. Sauer ist Autor zahlreicher Publikationen und national sowie international in verschiedenen Beiratsfunktionen und Gutachtergremien engagiert. Gemeinsam mit Prof. Abele leitete Prof. Sauer die erste dreijährige Förderphase des Kopernikus-Projekts SynErgie. Mit der Verabschiedung von Prof. Abele in den Ruhestand und dem Beginn der zweiten Förderphase hat er die alleinige Leitung übernommen.



© Björn Seitz – kontender.Fotografie

Dr. **Hans Ulrich Buhl**, 1955 in Esslingen geboren, ist Professor für BWL, Wirtschaftsinformatik, Finanz- & Informationsmanagement. Seit 2002 baute er als wissenschaftlicher Leiter das von der bayerischen Staatskanzlei eingerichtete Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement und zusätzlich seit 2011 die Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik FIT in Augsburg und Bayreuth auf. Er ist beiden Einrichtungen weiterhin eng verbunden.

Prof. Buhl studierte von 1976 bis 1981 Wirtschaftsingenieurwesen an der Universität Karlsruhe sowie Industrial Engineering and Operations Research an der University of California in Berkeley, USA. 1980 erfolgte der Abschluss als Master of Science in Berkeley und 1981 die Prüfung zum Diplom-Wirtschaftsingenieur (Informatik/OR) in Karlsruhe. Dort promovierte er 1982 und habilitierte sich 1985 mit Arbeiten über Anwendungen der dynamischen Optimierung auf volks- und betriebswirtschaftliche Problemstellungen. Nach sieben Jahren in der Praxis bei IBM und einem ersten Lehrstuhl in Gießen hatte er von August 1994 bis September 2021 einen Lehrstuhl an der



Universität Augsburg inne. Daneben war Hans Ulrich Buhl von 2004 bis 2021 federführender Wissenschaftler und Vorsitzender des Boards des vom Elitenetzwerk Bayern und zehn renommierten Praxispartnern (darunter Allianz, Hilti, Infineon, KPMG, Kuka, MAN Energy Solutions, Oetker-Gruppe und ZEISS) geförderten Elitenetzwerk-Studiengangs »Finanz- & Informationsmanagement« der TU München, Universität Augsburg und Universität Bayreuth. Das CHE-Ranking zeichnete dieses Programm wiederholt als besten Masterstudiengang aus.

Im Verband der Hochschullehrerinnen und Hochschullehrer für Betriebswirtschaft (VHB) wurde er 2017 bzw. 2018 jeweils einstimmig in den Gesamtvorstand bzw. zum stellvertretenden Vorsitzenden und 2020 einstimmig zum Vorsitzenden des Gesamtvorstandes des VHB gewählt. Er ist Mitglied der wissenschaftlichen Kommission Wirtschaftsinformatik (WKWI), des Fachkollegiums für Betriebswirtschaftslehre der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und des Kuratoriums der Bayerischen EliteAkademie. Seine Forschung konzentriert er aktuell insbesondere auf die Bereiche Digital Energy & Smart Districts.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie verantwortet Prof. Buhl das Cluster »Markt- und Stromsystem« und ist stellvertretender Leiter des Clusters »Energieflexible Modellregion Augsburg«.



© alexlevay

Alexander Mitsos ist Professor am Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik der Aachener Verfahrenstechnik (AVT) an der RWTH Aachen University sowie Direktor des IEK-10 (Energy Systems Engineering) am Forschungszentrum Jülich. Seit 2018 ist er Associate Editor des Elsevier Journals »Computers & Chemical Engineering« und Teil des Editorial Boards des »AAAS Science Advances«, und seit 2020 Programming Chair der AIChE CAST Division.

Prof. Mitsos erhielt 1999 das Diplom für Chemieingenieurwesen an der Universität Karlsruhe und promovierte 2006 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) auf dem Gebiet der Systemverfahrenstechnik. Nach Positionen als Senior Engineer in der RES Group Inc. (2006 bis 2007) und als Junior Research Group Leader am AICES, RWTH Aachen University (2008) war Prof. Mitsos von 2009 bis 2012 Assistant Professor am Department of Mechanical Engineering des MIT.

Die Forschungsschwerpunkte von Alexander Mitsos sind einerseits optimale Entwicklung und Betriebsführung von chemischen und biotechnologischen Prozessen und Energiesystemen sowie andererseits Theorie und Algorithmen für deterministische globale Optimierung. Dazu werden Methoden aus Data Science und Machine Learning eingesetzt und weiterentwickelt.

Im Rahmen des Kopernikus-Projekts SynErgie verantwortet Prof. Mitsos diverse Teilprojekte im Cluster »Schlüsselproduktionsprozesse«. Zudem ist er Projektverantwortlicher für die Nachwuchsförderung der Promovierenden.



©PTW/S. Scheibner

Prof. Dr.-Ing. **Matthias Weigold**, Jahrgang 1977, hat Maschinenbau an der TU Darmstadt studiert. Während seiner Promotion am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt forschte er in den Bereichen Automatisierungstechnik und Fertigungstechnologieentwicklung u. a. an der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern.

Heute ist Prof. Weigold Leiter des PTW. Zuvor war er bei der Heidelberger Druckmaschinen AG und bei der SAP SE im Bereich Digital Manufacturing in führenden Funktionen tätig. Seit der Übernahme der Institutsleitung von Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele hat Matthias Weigold die Forschungsaktivitäten auf

Digitalisierung, künstliche Intelligenz und klimaneutrale Produktion ausgerichtet. Er verantwortet die Aktivitäten der ETA-Fabrik (Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion) sowie des Fertigungstechnologiebereichs des PTW.

Prof. Weigold engagiert sich in unterschiedlichen nationalen und internationalen Gutachtergremien und ist Autor zahlreicher Publikationen, u. a. im Bereich der energieflexiblen und energetisch optimierten Produktion. Im Kopernikus-Projekt SynErgie leitet er das Cluster »Produktionsinfrastruktur«.

Literatur

2019. BUNDES-KLIMASCHUTZGESETZ. KSG [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/>

2021. ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ – EEG 2021 (Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien). EEG [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/

BABATUNDE, O.M., J.L. MUNDA und Y. Hamam, 2020. Power system flexibility: A review. Energy Reports 6, 101–106. ISSN 23524847. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.egy.2019.11.048

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2021. Kopernikus-Projekt für die Energiewende [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende_node.html

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT, 2018. Atomkraftwerke in Deutschland. Abschaltung der noch betriebenen Reaktoren gemäß Atomgesetz (AtG) [Zugriff am: 16. Februar 2018]. Verfügbar unter: <http://www.bmub.bund.de/themen/atomenergie-strahlenschutz/nukleare-sicherheit/aufsicht-ueber-kernkraftwerke/kernkraftwerke-in-deutschland/>



- BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ, 2021. Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2021 [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-entwicklungen-und-trends-in-deutschland-2021.pdf?__blob=publicationFile&v=6
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2021a. Das Jahr 2020 – Stromerzeugung und Stromhandel im Überblick [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/204970/202398>
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2021b. Quartalsbericht Netz- und Systemsicherheit – Gesamtes Jahr 2020 [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.html
-
- BUNDESNETZAGENTUR, 2022. Der Strommarkt im Jahr 2021 [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/206664>
-
- DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR, 2017. dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess. Zwischenfazit. Berlin: Deutsche Energie-Agentur [Zugriff am: 12. März 2018]. Verfügbar unter: https://shop.dena.de/fileadmin/denashop/media/Downloads_Dateien/esd/9214_dena-Leitstudie-Integrierte-Energiewende_Zwischenfazit.pdf
-
- EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2019. Der europäische Grüne Deal [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1576150542719&uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
-
- FELL, M.J., 2020. Just flexibility? Nature Energy 5(1), 6–7. Nature Energy. Verfügbar unter: doi:10.1038/s41560-019-0510-3
-
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021. Renewables 2021. Analysis and forecast to 2026 [Zugriff am: 3. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>
-
- PAPAEFTHYMIU, G., E. HAESSEN und T. SACH, 2018. Power System Flexibility Tracker: Indicators to track flexibility progress towards high-RES systems. Renewable Energy 127, 1026–1035. ISSN 09601481. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.renene.2018.04.094
-
- RAQUET, C. und G. LIOTTA, 2013. Datenübertragungstechnologien in Smart Metering und Smart Grids. In: C. Aichele und O.D. Doleski, Hg. Smart Meter Rollout. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 389-402. ISBN 978-3-8348-2439-4.
-
- SAUER, A., E. ABELE und H.U. BUHL, Hg., 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). Stuttgart: Fraunhofer Verlag. ISBN 978-3-8396-1479-2.
-
- SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP, 2021. Koalitionsvertrag: Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit [Zugriff am: 18. Januar 2022]. Verfügbar unter: https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf
-
- UNITED NATIONS, 2015. Paris Agreement [Zugriff am: 20. Oktober 2021]. Verfügbar unter: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
-

Inhalt

	Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung	3
	Vorwort der Herausgeber	4
<hr/>		
A	Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem	25
<hr/>		
A.1	Gestaltung des aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystems	29
	Management Summary	30
	Autoren	30
1	Motivation	32
2	Herausforderungen der Energieflexibilitätsvermarktung und (Weiter-) Entwicklung von kurzfristigen Anreizen für Energieflexibilität	32
2.1	Gegenwärtige Hemmnisse der Energieflexibilitätsvermarktung	32
2.2	Energieflexibilitätsvermarktung profitabel gestalten	35
3	Ein Strommarktdesign 2030–2050 zur Schaffung von langfristigen Anreizen für Energieflexibilität	46
3.1	Strommärkte und Systemdienstleistungen	46
3.2	Ziele und Erfolgsfaktoren eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns	48
3.3	Gestaltungsoptionen für ein zukunftsfähiges Strommarktdesign	49
3.4	Strategische Gesichtspunkte eines zukünftigen Strommarktdesigns	53
3.5	Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050	55
3.6	Ausgestaltung des Übergangs in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign 2030–2050	57
4	Energieflexibilität in einem zukunftsfähigen europäischen Strommarktdesign	64
5	Literatur	64
<hr/>		
A.2	Potenzialanalyse und systemische Betrachtung	73
	Management Summary	74
	Autoren	74
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	76
2	Energieflexibilitätsaudits	76
2.1	Methodische Anforderungen und allgemeine Struktur des Energieflexibilitätsaudits	77



2.2	Phase I: Identifizierung und Charakterisierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen	78
2.3	Phase II: Bewertung des EFM-Katalogs	82
3	Analyse der Energieflexibilitätspotenziale	83
3.1	Energieflexibilitätspotenziale der deutschen Industrie	83
3.2	Regionalisierung der Energieflexibilitätspotenziale	88
3.3	Internationales Energieflexibilitätspotenzial	90
4	Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und CO ₂ -Emissionen	93
4.1	Abschätzung der CO ₂ -Reduzierung beim Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen	93
4.2	Auswirkungen von industriellen CO ₂ -Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien	97
4.3	Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei ausgewählten, disruptiv dekarbonisierten Produktionstechniken	104
5	Systemische Kosten-Nutzen-Abschätzung	106
5.1	Methodik zur systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung	106
5.2	Auswahl, Charakterisierung und Matching der Einsatz- und Flexibilitätsoptionen	107
5.3	Systemisches Kosten-Nutzen-Verhältnis von Flexibilitätsoptionen für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen	109
6	Fazit	113
7	Literatur	114
<hr/>		
A.3	Energieflexible Modellregion Augsburg	117
	Management Summary	118
	Autoren	118
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	121
2	Lösungsbausteine der regionalen Vermarktung von industrieller Energieflexibilität	122
2.1	Ökonomischer Lösungsbaustein: Lokaler Flexibilitätshandel	123
2.2	Technische Lösungsbausteine: IKT-Lösungen für regionale Nachfrageflexibilität	124
2.3	Gesellschaftliche Lösungsbausteine	125
3	Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Region Augsburg	128
3.1	Beschreibung des angewandten Vorgehens in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	128

3.2	Themenfelder der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	130
3.3	Anwendungsfälle in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	133
3.4	Konzeptioneller Testbetrieb der Anwendungsfälle	146
4	Weiterentwicklung und Übertragung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg	148
4.1	Energieflexibilitätpotenzial und CO ₂ -Einsparung	148
4.2	Technische Übertragbarkeit auf weitere Regionen	148
4.3	Gesellschaftliche Perspektive zur erfolgreichen Weiterentwicklung	152
5	Fazit und Ausblick	155
6	Literatur	156
<hr/>		
B	Managementsysteme für energieflexible Fabriken	159
<hr/>		
B.1	Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung	163
	Management Summary	164
	Formelverzeichnis	164
	Autoren	164
1	Einleitung	166
2	Werkzeuge zur Energieflexibilitätpotenzialanalyse	167
2.1	Grundlagen	167
2.2	Schnell-Check-Tool	168
2.3	Energieflexibilitätsaudit	168
2.4	E-Flex-Scanner	168
2.5	Flexibilitätseinsatzplanungstool	169
3	Werkzeuge zur Konzeption und Planung	170
3.1	Grundlagen und Anwendungsbeispiel	170
3.2	Technische Umsetzung	171
3.3	Beispielhafte Demonstration der Anwendung	173
3.4	Zusammenfassung	175
4	Umsetzung und Implementierung am Beispiel von Speicher-Wandler-Systemen	176
4.1	Digitaler Retrofit für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen	176
4.2	Anwendungsbeispiel	179
4.3	Zusammenfassung	181



5	Operative Energieflexibilitätsvermarktung	181
5.1	Die Plattform »Flexys« zur Vermarktung von Energieflexibilität	181
5.2	Forschungs- und Vermarktungsansätze	182
5.3	Plattform-Konzept zur Vermarktung von Energieflexibilität	182
5.4	Funktionsweise und Einsatz von »Flexys«	183
6	Controlling und Monitoring am Beispiel Last- und Flexibilitätsmanagement	184
6.1	Grundlagen	184
6.2	Last- und Flexibilitätsmanagement in der Kunststoffproduktion	185
6.3	Last- und Flexibilitätsmanagement in der Automobilindustrie	190
6.4	Zusammenfassung	193
7	Betriebsoptimierung	194
7.1	Grundlagen	194
7.2	Anwendungsfall	199
7.3	Zusammenfassung	204
8	Zusammenfassung und Ausblick	205
9	Literatur	206
<hr/>		
B.2	Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung	211
	Management Summary	212
	Formelverzeichnis	212
	Autoren	213
1	Einleitung	214
1.1	Betrieb des Elektrostahlwerks	214
1.2	Fluktuation des Energiebedarfs	215
2	Vorhandene Planungsinstrumente	217
2.1	Monatlicher Produktions- und Energieplan	217
2.2	Ablaufplanung im Stahlwerk	219
2.3	Monatlicher Instandhaltungsbericht	220
2.4	Lastmanagement	222
3	Entwicklung einer neuen Planungsplattform	224
3.1	Vorbemerkungen und Zielsetzungen	224
3.2	Erneuerung der Ablauf- und Energieplanung im Stahlwerk	225
3.3	Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs	229

3.4	Nutzung von Energieflexibilität	230
3.5	Ermittlung des 15-Minuten-Forecasts	232
4	Decision-Support-Tool zur Prüfung von Energieflexibilitätsmaßnahmen	233
5	Literatur	235
<hr/>		
B.3	Integration der Flexibilitätsvermarktung	237
	Management Summary	238
	Autoren	238
1	Einleitung	240
1.1	Einordnung und Motivation	240
1.2	Ziele der Energiesynchronisationsplattform	241
2	Referenzarchitektur	242
2.1	Energiesynchronisationsplattform	242
2.2	Marktplattform	243
2.3	Marktplattformseitige Services	246
2.4	Unternehmensplattform	246
2.5	Unternehmensplattformseitige Kernkomponenten und Services	248
3	Energieflexibilitätsdatenmodell	249
3.1	Notwendigkeit des Datenmodells	249
3.2	Ziel und Zweck des Datenmodells	250
3.3	Klassen des Datenmodells	250
3.4	Exemplarische Beschreibung	253
4	Prozesse und Informationsflüsse	255
4.1	Prozessmodell der Energiesynchronisationsplattform	255
4.2	Umsetzung von Prozessen	257
5	Informationstechnische Sicherheit	261
5.1	Maßnahmen des Security-Prozesses	261
5.2	Umsetzungsmaßnahmen	266
6	Demonstratoren	269
6.1	Übersicht der Demonstratoren	269
6.2	Wichtigste Erkenntnisse	271
7	Fazit und Ausblick	271
8	Literatur	272



C	Technologien für energieflexible Fabriken	277
C.1	Chlor-Alkali-Elektrolyse	281
	Management Summary	282
	Formelverzeichnis	282
	Autoren	283
1	Grundlagen und Potenziale der Chlor-Alkali-Elektrolyse	284
1.1	Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse	284
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Chlor-Alkali-Elektrolyse	286
1.3	Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse bei der Covestro Deutschland AG	288
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	289
2	Technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	290
2.1	Auswirkung flexibler Fahrweise auf die Langzeitstabilität	290
2.2	Spülverhalten einer Chlor-Alkali-Elektrolysezelle	291
3	Wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	293
3.1	Energieflexibilitätsoptionen und ihre Auswirkungen auf den Gesamtprozess	293
3.2	LCA-Studie der Energieflexibilitätsmaßnahmen	293
4	Literatur	295
C.2	Lastflexible Extraktion biobasierter Carbonsäuren	297
	Management Summary	298
	Formelverzeichnis	298
	Autoren	298
1	Grundlagen und Potenziale der elektrifizierten Carbonsäureherstellung	299
1.1	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	304
2	Technische Umsetzung	307
3	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	313
4	Literatur	315

C.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen	319
Management Summary	320
Autoren	321
1 Grundlagen und Potenziale von energieflexiblen Luftzerlegungsanlagen	322
1.1 Energieflexible Luftzerlegungsanlagen	322
1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen	323
1.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen bei Linde Engineering	324
1.4 Flexible Kompressoren bei MAN Energy Solutions	324
1.5 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	325
2 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	327
2.1 Robustifizierung des Hauptwärmeübertragers	327
2.2 Erweiterter Lastbereich der Kompressoren	330
2.3 Flexible Betriebsstrategien und Digitale Zwillinge	336
3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	341
4 Literatur	341
C.4 Papierherstellung	345
Management Summary	346
Autoren	347
1 Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Papierherstellung	348
1.1 Energieflexible Papierherstellung	348
1.2 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieflexiblen Papierherstellung	350
1.3 Energieflexible Papierherstellung bei UPM	351
1.4 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	352
2 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	355
2.1 Standort Plattling: Energieflexibilität unter Desinvestitionsbedingungen »DesFlex«	356
2.2 Standort Schongau: Energieflexibilität in der Halbstofffertigung »FlexPulp«	357
2.3 Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Skalierbare energieflexibilitätsfördernde IT-Architektur »EnFlex«	358
3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	359
3.1 Standort Plattling: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360



3.2	Standort Schongau: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360
3.3	Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Wirtschaftlichkeit der IT-seitigen Energieflexibilitätsmaßnahmen	363
4	Literatur	363
<hr/>		
C.5	Aluminiumelektrolyse	367
	Management Summary	368
	Formelverzeichnis	368
	Autoren	369
1	Grundlagen und Potenziale der flexiblen Aluminiumelektrolyse	370
1.1	Energieflexible Aluminiumelektrolyse	370
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse	371
1.3	Energieflexible Aluminiumelektrolyse bei der TRIMET Aluminium SE	371
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	372
2	Technische Umsetzung des Digitalen Zwillings	372
2.1	Prozessvorhersagemodell	372
2.2	Magnetohydrodynamik-Modell	379
2.3	Prozessüberwachung: Anodenstrommessung	382
2.4	Digitaler Zwilling zur Steuerung energieflexibler Aluminiumelektrolysezellen	386
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	388
4	Literatur	389
<hr/>		
C.6	Klimatisierungs- und Raumluftechnik	393
	Management Summary	394
	Autoren	395
1	Grundlagen und Potenziale der branchenübergreifenden Klimatisierungs- und Raumluftechnik	396
1.1	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik	396
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen von branchenübergreifender Klimatisierungs- und Raumluftechnik	397
1.3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei der B+T Oberflächentechnik GmbH	398

1.4	Energieflexible Technologie für klimatisierte Räume und Gebäude in der Industrie am Beispiel eines Kühllagers (Intercool GmbH, Dr. Oetker)	398
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials	400
2	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik in der ETA-Fabrik	402
2.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	402
2.2	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	410
3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei B+T GmbH	412
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme	412
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme	413
4	Literatur	414
<hr/>		
C.7	Prozesskälte	417
	Management Summary	418
	Autoren	419
1	Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung	420
1.1	Energieflexible Prozesskältebereitstellung	420
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung	420
1.3	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der DMK Group	421
1.4	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei Mercedes-Benz	421
1.5	Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der Badischen Staatsbrauerei Rothaus	422
2	Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials	423
3	Prozesskälteversorgung im milchverarbeitenden Gewerbe	424
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	424
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	426
4	Energieflexible Prozesskälteversorgung in der Automobilindustrie	427
4.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	428
4.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	429
5	Energieflexible Prozesskälteversorgung im Brauereigewerbe	431
5.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	432



5.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	435
6	Literatur	437
<hr/>		
C.8	Prozesswärme	439
	Management Summary	440
	Autoren	440
1	Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesswärmebereitstellung	441
1.1	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung	441
1.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung	441
1.3	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Evonik	442
1.4	Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Schaeffler	442
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	443
2	Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der chemischen Industrie	444
2.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	444
2.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	448
3	Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der metallverarbeitenden Industrie	449
3.1	Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	449
3.2	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	455
4	Literatur	457
<hr/>		
C.9	Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss	459
	Management Summary	460
	Autoren	460
1	Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Technologien im Nichteisenmetalldruckguss	461
2	Energieflexibler Nichteisenmetalldruckguss	462
2.1	Schmelzofen	463
2.2	Beschichtungsprozesses	464
2.3	Recyclingofen	464
2.4	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im Nichteisenmetalldruckguss	466

2.5	Energieflexibilitätsmaßnahmen des Nichteisenmetalldruckgusses bei der Torun Bark Magnesium GmbH	466
2.6	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	467
3	Technische Umsetzung eines bivalenten Ofens	467
3.1	Vorauswahl des Brennersystems	468
3.2	Steuerung und Regelung	468
3.3	Konstruktion	469
3.4	Numerische Simulation	471
4	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahme	476
5	Literatur	478
<hr/>		
C.10	Bivalente Wärmebehandlung in der Massivumformung	481
	Management Summary	482
	Autoren	482
1	Grundlagen und Potenziale in der Massivumformung	483
1.1	Wärmebehandlung in der Massivumformung	483
1.2	Energieflexibilitätsmaßnahmen bei Hirschvogel Group	483
1.3	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	485
2	Technische Umsetzung der bivalenten Wärmebehandlung in der Massivumformung	486
2.1	Wärmebehandlungsöfen	486
2.2	Konzept zur bivalenten Wärmeversorgung	487
2.3	Simulationsbasierte Untersuchung der Anlage	488
2.4	Ergebnisse der Simulation	490
2.5	Umsetzung der bivalenten Anlage	493
2.6	Fazit der technischen Umsetzung	495
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	497
4	Literatur	498
<hr/>		
C.11	Hybride Beheizung in der Stahlindustrie	501
	Management Summary	502
	Autoren	502
1	Grundlagen und Potenziale einer hybriden Beheizung in der Stahlindustrie	503
1.1	Energieflexible Beheizung in der Stahlindustrie	503



1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahme der Wärmebereitstellung eines hybriden Strahlrohrs	504
1.3	Projektpartner	505
1.4	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	506
2	Technische Umsetzung der hybriden Beheizung	506
2.1	Anforderungen	506
2.2	Konzeptentwicklung	507
2.3	Konstruktion des Prototyps	507
2.4	Test der elektrischen Beheizung	508
2.5	Komplettmontage	509
2.6	Test der Gasbeheizung	510
2.7	Betriebsnahe Untersuchungen	511
3	Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	513
4	Literatur	514
<hr/>		
C.12	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicher	517
	Management Summary	518
	Autoren	518
1	Grundlagen und Potenziale von Energiespeichertechnologien in der Automobilindustrie	519
1.1	Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher	519
1.2	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung bei Mercedes-Benz	519
1.3	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	520
2	Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung in der Automobilindustrie	521
3	Technische Umsetzung der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher	522
3.1	Anwendungsfälle für (hybride) Energiespeicher	523
3.2	Prognosetool für thermische und elektrische Energieverbräuche zum Betrieb hybrider Energiespeichersysteme	526
3.3	Auslegung und Bewertung eines hybriden Energiespeichers im Automobilwerk	528
3.4	Umsetzung des methodischen Vorgehens über ein Simulations- und Analysetool	530

4	Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von hybriden Energiespeichern für ein Automobilwerk	531
	4.1 Fazit und Ausblick	534
5	Literatur	534



Managementsysteme für energieflexible Fabriken

- B.1 Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung
- B.2 Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung
- B.3 Integration der Flexibilitätsvermarktung







B.1

Werkzeuge für die energetische
Flexibilisierung

Management Summary

Das Kapitel zeigt Möglichkeiten und Anwendungsfälle aus Forschung und Industrie zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken anhand der sechsstufigen Methodik nach VDI (2021). Dazu werden für jeden einzelnen der sechs sequenziell zu durchlaufenden Schritte der Methodik – Potenzialanalyse, Konzeption & Planung, Umsetzung & Implementierung, Operative Energieflexibilitätsvermarktung, Controlling & Monitoring sowie Betriebsoptimierung – entsprechende Werkzeuge vorgestellt. Deren Funktionsweise und Anwendung wird anhand mehrerer Anwendungsfälle aus Forschung und Industrie demonstriert. Es werden Handlungsempfehlungen für die praktische Umsetzung der energetischen Flexibilisierung von Fabriken abgeleitet und ein Bezug der Forschungsergebnisse zur Praxis hergestellt.

Formelverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
f_{Netz}	Netzfrequenz	Hz
f_{MG}	vom Messgerät erfasste Netzfrequenz	Hz
P	Leistung	kW
P_{el}	Elektrische Leistung	kW
n	Anzahl der Prognosewerte	–
Y_i	Beobachtungswerte	–
\hat{Y}_i	Prognosewerte	–

Autoren

Bauer, Dennis
 dennis.bauer@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Benedik, Felix
 felix.benedik@campus-schwarzwald.de
 Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit
 Schwarzwald gGmbH
 Herzog -Eberhard-Straße 56, 72250 Freudenstadt

Bianchini, Isabella
 isabella.bianchini@eep.uni-stuttgart.de
 Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
 Universität Stuttgart
 Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Borst, Fabian
 f.borst@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

da Silva, Carina
 dasilva@ismd.tu-darmstadt.de
 Institut für Statik und Konstruktion (ISM+D), Technische
 Universität Darmstadt
 Franziska-Braun-Str. 3, 64287 Darmstadt

Dietrich, Bastian
 b.dietrich@ptw.tu-darmstadt.de
 Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
 Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
 Darmstadt
 Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Emde, Alexander
alexander.emde@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Fuhrländer-Völker, Daniel
d.fuhrlaender-voelker@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Hofmann, Philipp
philipp.hofmann@daimler.com
Mercedes-Benz AG
Benzstraße Tor 7, 71059 Sindelfingen

Ilieva-König, Svetlina
svetlina.ilieva-koenig@trimet.de
TRIMET Aluminium SE
Aluminiumallee 1, 45356 Essen

Kaymakci, Can
can.kaymakci@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Lindner, Martin
m.lindner@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Moog, Daniel
d.moog@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Retzlaff, Jan
jan.retzlaff@de.kaercher.com
Alfred Kärcher SE & Co. KG
Eberhard-Herzog-Straße 12–20, 74423 Obersontheim

Riethmüller, Tobias
tobias.riethmueller@campus-schwarzwald.de
Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit
Schwarzwald gGmbH
Herzog -Eberhard-Straße 56, 72250 Freudenstadt

Sauer, Alexander
alexander.sauer@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Schillinger, Christof
christof.schillinger@campus-schwarzwald.de
Centrum für Digitalisierung, Führung und Nachhaltigkeit
Schwarzwald gGmbH
Herzog -Eberhard-Straße 56, 72250 Freudenstadt

Seyed Sadjjadi, Bijan
bijan.seyed.sadjjadi@eep.uni-stuttgart.de
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP),
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Sossenheimer, Johannes
j.sossenheimer@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

van Stiphoudt, Christine
christine.vanstiphoudt@uni.lu
SnT – Interdisciplinary Centre for Security, Reliability and
Trust, University of Luxembourg
Av. John F. Kennedy 29, 1855 Luxemburg

Weber, Thomas
t.weber@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Weigold, Matthias
weigold@ptw.tu-darmstadt.de
Institut für Produktionsmanagement, Technologie und
Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität
Darmstadt
Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt

Wenninger, Simon
simon.wenninger@fim-rc.de
Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informations-
management (FIM) und Projektgruppe Wirtschafts-
informatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)
Alter Postweg 101, 86159 Augsburg

1 Einleitung

Autoren: Lindner · Sossenheimer · Wenninger · Bauer · Kaymakci · Weigold

Energieflexible Fabriken bieten große Potenziale bei der Realisierung einer flexiblen Energienachfrage auf der Verbrauchsseite. Die erfolgreiche Umsetzung industrieller Energieflexibilitätsmaßnahmen kann damit einen zentralen Beitrag zur zukünftigen Stabilität und Dekarbonisierung des Stromsystems leisten (Seifermann et al., 2019). Daher gilt es, schnellstmöglich einen großen Anteil der gesamten Industrie zu einem energieflexiblen Fabrikbetrieb zu befähigen. Ein methodisches Vorgehen zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken wird in der Handlungsempfehlung VDI (2021) aufgezeigt, wonach die sechs Schritte Potenzialanalyse, Konzeption & Planung, Umsetzung & Implementierung, Operative Energieflexibilitätsvermarktung, Controlling & Monitoring sowie Betriebsoptimierung sequenziell durchlaufen werden (Abbildung 1).

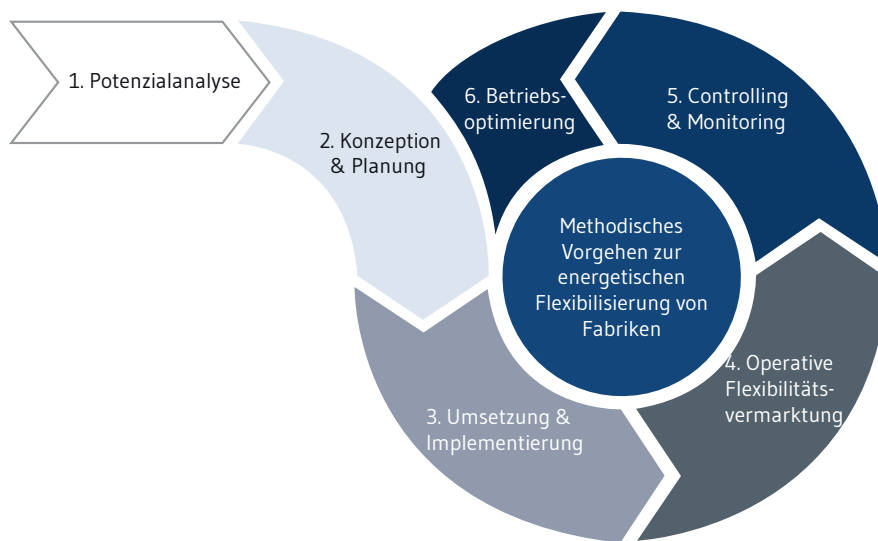


Abb. 1 Methodisches Vorgehen zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken (nach VDI, 2021)

- Zur Befähigung eines Industrieunternehmens zum energieflexiblen Betrieb ist im ersten Schritt die Identifikation und Bewertung vorhandener Energieflexibilitätspotenziale und damit möglicher Energieflexibilitätsmaßnahmen erforderlich.
- Im zweiten Schritt wird die Umsetzung der zuvor priorisierten Energieflexibilitätsmaßnahmen konzipiert und geplant. Diese Konzeption und Planung kann sich auf einzelne Anlagen, aber auch ganze Systeme wie die Kälte- und Wärmeversorgung beziehen.

- Wurden Energieflexibilitätspotenziale identifiziert und konzeptionell geplant, müssen diese für einen automatisierten energieflexiblen Fabrikbetrieb an die IT-Infrastruktur angeschlossen werden. Dies ermöglicht schließlich die Vermarktung der Energieflexibilität.
- Nach erfolgreicher Implementierung der Energieflexibilitätsmaßnahmen kann das Controlling und Monitoring zum Beispiel durch ein Last- und Flexibilitätsmanagement durchgeführt werden.
- Für übergreifende Systeme kann zudem eine kosten- und energieeffiziente Betriebsoptimierung der flexibilisierten Anlagen auf Basis eines umfassenden Monitorings umgesetzt werden.

Mit der dargestellten Methodik nach VDI (2021) werden Unternehmen schnell und zielführend bei der individuellen Energieflexibilitätsbefähigung von Fabriken unterstützt. Im Folgenden werden die im Kopernikus-Projekt SynErgie entwickelten Werkzeuge vorgestellt, die die sechs Schritte nach VDI (2021) unterstützen. Die Werkzeuge wurden in der Praxis auf Anwendbarkeit erprobt und können Industrieunternehmen bereits heute und in Zukunft bei der erfolgreichen Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unterstützen.

2 Werkzeuge zur Energieflexibilitätspotenzialanalyse

Autoren: Sossenheimer · Lindner · van Stiphoudt · Weigold

2.1 Grundlagen

Ziel des ersten Schritts der Methodik nach VDI (2021) ist, Energieflexibilitätspotenziale zu identifizieren und zu bewerten. Hierzu wurden die Werkzeuge Schnell-Check-Tool, Energieflexibilitätsaudit, E-Flex-Scanner sowie das Flexibilitätseinsatzplanungstool entwickelt. Diese vier Werkzeuge sind praktische Hilfsmittel, um Industrieunternehmen grundlegende Informationen über Energieflexibilität bereitzustellen, Energieflexibilitätspotenziale bzw. -maßnahmen zu identifizieren und diese technisch und ökonomisch zu bewerten.

- Das Schnell-Check-Tool bietet Industrieunternehmen die Möglichkeit, sich grundlegend über Energieflexibilität und deren Einsatzmöglichkeiten zu informieren.
- Das Energieflexibilitätsaudit unterstützt Industrieunternehmen dabei, Energieflexibilitätsmaßnahmen für Produktionsmaschinen und -anlagen zu identifizieren, zu charakterisieren und zu bewerten.
- Zur Bewertung von Produktionsinfrastrukturanlagen empfiehlt sich der E-Flex-Scanner, welcher eine simulierte Betriebsoptimierung durchführt, um das technische und wirtschaftliche Energieflexibilitätspotenzial zu bestimmen.
- Mithilfe des Flexibilitätseinsatzplanungstools können abschließend, basierend auf historischer Energiepreisdaten, die Einsatzmöglichkeiten und wirtschaftlichen Vermarktungsoptionen quantifiziert und bewertet werden.

2.2 Schnell-Check-Tool

Das Schnell-Check-Tool bietet sowohl Unternehmen als auch der Öffentlichkeit eine erste Anlaufstelle, um sich über das Thema industrielle Energieflexibilität zu informieren. Neben einer Einführung in die Grundlagen der Energieflexibilität werden Vermarktungsmöglichkeiten für Energieflexibilität in Deutschland aufgezeigt. Nutzer des Schnell-Check-Tools haben darüber hinaus die Möglichkeit, grundlegende Potenzialabschätzungen über die Umsetzung möglicher Energieflexibilitätsmaßnahmen zu erhalten. Dazu werden verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Energieflexibilität aufgezeigt. Diese beinhalten die Netzentgeltoptimierung, die Nutzung von Preisunterschieden am Spotmarkt, die Eigenerzeugung sowie das Anbieten von Systemdienstleistungen (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2022b).

2.3 Energieflexibilitätsaudit

Das Energieflexibilitätsaudit ist eine Methodik zur Identifikation und zur techno-ökonomischen Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen eines Industrieunternehmens oder -standorts und wird ausführlich in *Kapitel A.2* sowie in Tristán, Heuberger und Sauer (2020) beschrieben. Das Energieflexibilitätsaudit analysiert alle relevanten industriellen Systeme eines Unternehmens oder des jeweiligen Standorts und identifiziert systematisch Energieflexibilitätsmaßnahmen und deren Energieflexibilitätspotenziale.

Die Ergebnisse des Energieflexibilitätsaudits werden im Energieflexibilitätsmaßnahmen-Katalog (EFM-Katalog) und in der Energieflexibilitätsmaßnahmen-Scorecard (EFM-Scorecard) zusammengestellt. Der EFM-Katalog gruppiert alle identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen und ihre Charakterisierungsparameter inkl. der jeweiligen Energieflexibilitätspotenziale. Die EFM-Scorecard vergleicht die technische und wirtschaftliche Eignung der identifizierten Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Verfolgung der einzelnen industriellen Energieflexibilitätsziele sowie deren Umsetzungs- und Nutzungsrisiken.

2.4 E-Flex-Scanner

Der E-Flex-Scanner unterstützt Energieverantwortliche in Industrieunternehmen dabei, Energieflexibilitätspotenziale in der Produktionsinfrastruktur zu nutzen. Der E-Flex-Scanner kann über eine Webapplikation aufgerufen werden, die von jedem internetfähigen Endgerät erreichbar ist. Angelehnt an das Vorgehen der VDI 5207-2:2021 (2021) unterstützt der E-Flex-Scanner bei der Bestandsaufnahme, Potenzialanalyse und Bewertung des Energieflexibilitätspotenzials auf Anlagenebene.

In einem ersten Schritt hilft der E-Flex-Scanner bei der Festlegung von unternehmensseitigen Energieflexibilitätszielen, die in VDI 5207-1:2020 (2020) näher beschrieben werden. In den folgenden Schritten ermittelt der E-Flex-Scanner das technische Potenzial vielversprechender Anlagen und ermöglicht zudem die Abschätzung wirtschaftlicher Erlöspotenziale. Hierfür werden die zugrundeliegenden Speicher-Wandler-Systeme und bivalenten Anlagen wie in *Abbildung 2* dargestellt vereinfacht, sodass

bereits mit wenigen verfügbaren Systeminformationen eine simulierte Betriebsoptimierung, basierend auf historischen Spotmarktdaten (Day-Ahead-Strompreise) der vergangenen Jahre, durchgeführt werden kann. Neben den wirtschaftlichen Erlospotenzialen der letzten Jahre kann auch der Aufwand für die Befähigung zum energieflexiblen Betrieb der Anlagen abgeschätzt werden, was die Berechnung der statischen Amortisationsdauer ermöglicht.

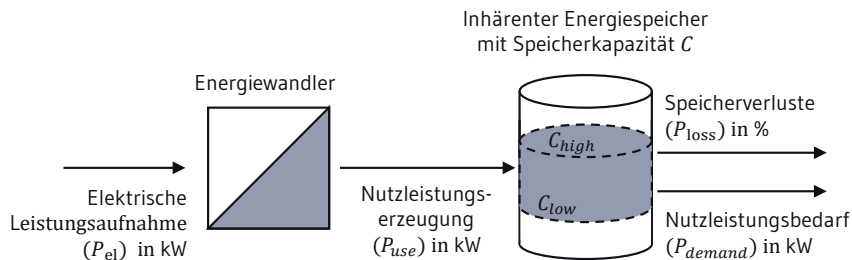


Abb. 2 Vereinfachte Darstellung eines Speicher-Wandler-Systems, bestehend aus dem Energiewandler, der Strom in die vom Produktionsprozess benötigte Nutzenergieform umwandelt, und dem Nutzenergiespeicher, über den der Nutzenergiebedarf der Produktionsprozesse gedeckt wird (nach Strobel et al., 2020)

Die Deutsches Milchkontor (DMK) Group, die Badische Staatsbrauerei Rothaus und die Evonik Industries AG nutzen den E-Flex-Scanner bereits, um die eigenen Energieflexibilitätspotenziale zu bewerten. Alle Unternehmen verwenden die vorhandenen prozessinternen Temperatur- bzw. Drucktoleranzen, um einen virtuellen Nutzenergiebedarfspeicher zu erstellen (Abbildung 2). Dieser kann abhängig von den schwankenden Strompreisen energieflexibel geladen werden. Konkret bedeutet dies, dass die Kältespeicher heruntergekühlt werden oder der Druck des Dampfnetzes erhöhet wird, wenn der Strom gerade günstig ist (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2021). Die Ergebnisse der Potenzialanalysen mit dem E-Flex-Scanner für die genannten Anwendungsfälle werden detailliert in Kapitel C.7 beschrieben.

2.5 Flexibilitatseinsatzplanungstool

Das Flexibilitatseinsatzplanungstool (Flex-Tool) unterstützt Unternehmen bei der Vermarktungsentscheidung ihrer Energieflexibilität. Als Input können beispielweise die mit dem Energieflexibilitätsaudit oder dem E-Flex-Scanner identifizierten Energieflexibilitätspotenziale genutzt werden. Das Ziel des Flexibilitatseinsatzplanungstools ist es, aus verschiedenen Energieflexibilitatsoptionen die Energieflexibilitätsmaßnahme auszuwählen, mit der die größten Erlöse bzw. ein kostenminimaler Einsatz erreicht werden können. Dazu wird mithilfe einer Optimierung der Energieflexibilitatseinsatz auf die schwankenden Strompreise an den Spot- und Systemdienstleistungsmarkten ausgerichtet. Das Flex-Tool wird ausführlich in Kapitel A.1 vorgestellt (Kopernikus-Projekt SynErgie, 2022a).

3 Werkzeuge zur Konzeption und Planung

Autoren: Moog · Borst · da Silva · Weigold

3.1 Grundlagen und Anwendungsbeispiel

Eine zunehmend immer wichtiger werdende Aufgabe in der Fabrikplanung liegt in der optimierten und übergreifenden Gestaltung der Energiesysteme, da die im Betrieb bestehenden Erlöspotenziale maßgeblich durch die vorausgelagerte Planung determiniert werden. Aufgrund der zunehmenden Volatilität der Energiepreise wird die Energieflexibilität künftig einen entscheidenden Faktor im Planungsprozess industrieller Energiesysteme darstellen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei Wärme- und Kälteversorgungssysteme, welche nach Panten (2019) zehn bis 40 Prozent des gesamten Energiebedarfs einer Fabrik ausmachen. Verschiedenen Studien zufolge weisen industrielle Systeme zur Kälte- und Wärmeversorgung signifikante Potenziale zur Energieflexibilitätsbereitstellung auf (Gruber, 2017; Steurer, 2017; Kleinertz et al., 2019). Die Planung solcher Systeme erfolgt in der Praxis als Teil der Fabrikplanung anhand bereits etablierter Richtlinien und Vorgehensmodelle, wie beispielsweise der VDI 5200:2011 (2011) und der Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI) nach Bundesgesetzblatt I (2013). Diese weisen jedoch bislang keinen Bezug zur Energieflexibilität auf.

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel ein digitales Werkzeug zur energieflexiblen Planung industrieller Wärme- und Kälteversorgungssysteme vorgestellt, im folgenden Planungsplattform genannt. Diese Webapplikation ermöglicht die Bewertung technischer (thermische Leistung und Temperaturniveaus) und ökonomischer Kriterien (Investitionen und energiegebundene Betriebskosten) verschiedener Designvarianten unter Berücksichtigung von Energieflexibilität.

Die Planungsplattform erfüllt die folgenden Kernanforderungen nach Flum et al. (2020):

- Möglichkeit zur Entwicklung verschiedener Gestaltungsalternativen ohne vertiefte Simulationskenntnisse
- Intuitive Bedienbarkeit
- Einfache Erweiterbarkeit hinsichtlich verschiedener Wärme- und Kälteerzeugungstechnologien
- Methodische Kompatibilität zu etablierten Planungsprozessen
- Kompatibilität zu gängigen Modellierungs- und Simulationsumgebungen

Nachfolgend wird zunächst die technische Umsetzung beschrieben. Anschließend erfolgt die Darstellung erster Umsetzungsergebnisse. Die Ausführungen enden mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf geplante Erweiterungen.

3.2 Technische Umsetzung

Der Aufbau der Planungsplattform und deren technische Umsetzung ist in *Abbildung 3* schematisch dargestellt. Die zentralen Elemente der Planungsplattform sind eine grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) im Frontend sowie modulare Simulationsmodelle industrieller Kälte- und Wärmeversorgungstechnologien, ein Programmkern und verschiedene Datenquellen im Backend. Im Folgenden werden die einzelnen Elemente sowie deren Zusammenspiel näher erläutert.



Abb. 3 Schematische Darstellung der zentralen Elemente der Planungsplattform und der Nutzerschnittstellen

Die Planungsplattform umfasst einen vierstufigen Planungsprozess. Der Nutzer spezifiziert im ersten Schritt verschiedene Rahmenbedingungen des Planungsprojekts (z. B. Lastdaten wie Volumenströme, Vorlauftemperaturen etc.). Im zweiten Schritt werden mögliche technische Varianten konfiguriert. Im dritten Schritt erfolgt die Parametrierung der Designvarianten und die Festlegung der Berechnungseinstellungen (z. B. zeitlicher Betrachtungshorizont). Im vierten und letzten Schritt erfolgt die Berechnung und Visualisierung relevanter technischer (z. B. Massenströme und Temperaturen) und wirtschaftlicher Ergebnisse (z. B. Annuität, betriebsgebundene Energiekosten, Investitionen). Im Backend verfügt die Planungsplattform über Simulationsmodelle von Technologiemodulen zur Kälte- und Wärmeversorgung. Ein Technologiemodul ist ein Subsystem, das aus einer Erzeuger- bzw. Verbrauchereinheit und Hydraulikkomponenten (Pumpen, Ventile etc.) besteht. Die Modellierung erfolgt dabei mit der Software Dymola.

Ein ähnliches Konzept wurde erstmals im Bereich der Gebäudesimulation von Matthes et al. (2019) verfolgt. In Anlehnung an VDI 2073:2014 (2014) sowie VDI 6018:2018 (2018) wurden die Technologiemodule in die Funktionsbereiche Erzeugung, Rückkühlung, Entkopplung, Verbraucher und Wärmerückgewinnung strukturiert. Bei der Modellierung wurde auf die Modellbasis der freien Modelica Standard Library sowie der ETA Factory Simulation Library nach Panten et al. (2020) zurückgegriffen und letztere entsprechend erweitert. *Abbildung 4* verdeutlicht das modulare Konzept und zeigt beispielhaft den schematischen Aufbau eines Moduls zur Kälteerzeugung.

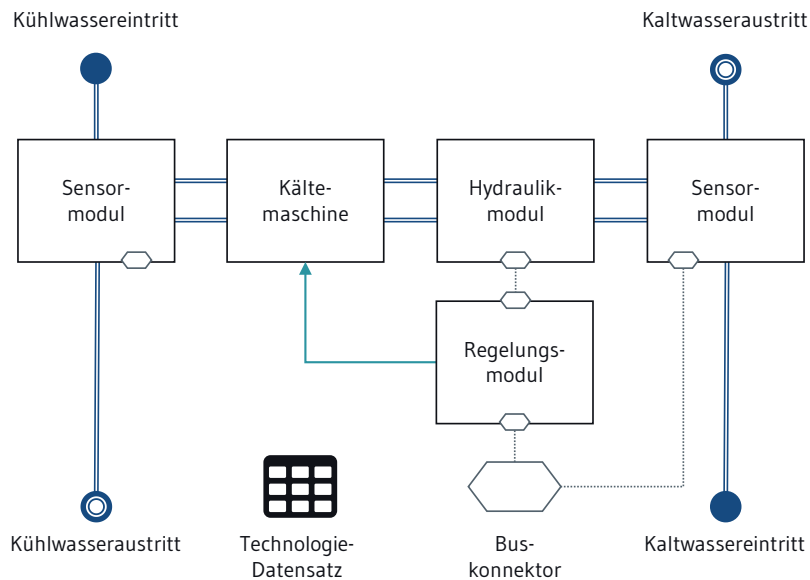


Abb. 4 Schematische Ansicht eines thermohydraulischen Moduls zur Kälteerzeugung (nach Moog et al., 2021)

Die Kompatibilität der Planungsplattform zu gängigen Modellierungs- und Simulationsumgebungen wurde durch das Aufgreifen des zunehmend etablierten Functional Mock-up Interface (FMI)-Standards zum softwareübergreifenden Modellaustausch nach Modelica Association (2020) realisiert. Die Technologie bietet großes Potenzial zur Vereinfachung simulationsgestützter Planungsprozesse mit unterschiedlichen Softwarewerkzeugen und verschiedenen Planungsbeteiligten (Réhault et al., 2017). Die originären Modelica-Module wurden mittels spezieller Schnittstellen in das Functional Mock-up (FMU)-Modellformat gemäß FMI-Standard 2.0 überführt und im Backend der Planungsplattform gekoppelt. Die Beschreibung der Systemtopologie zur Modellkopplung erfolgt mithilfe eines struktur-basierten Ansatzes (nach XML-Datenschema) zur teilautomatisierten Systemmodellerstellung. Die Simulation der zusammengesetzten FMU-Verbundmodelle erfolgt als Co-Simulation. Hierdurch wird die Kompatibilität bei der Modellierung in unterschiedlichen Simulationsumgebungen sichergestellt, was einen kollaborativen Planungsprozess verschiedener Fachplaner ermöglicht. Für detaillierte Ausführungen hierzu sei auf Moog, Borst und Weigold (2021) verwiesen. Die Parametrierung der

Modelle erfolgt anhand standardisierter Datensätze. Die Datensätze enthalten Technologieparameter wie elektrische und thermische Nennleistungen, Nennmassenströme, Betriebsgrenzen und thermische Kennfelder zur Modellierung des Betriebsverhaltens der Technologien. Weiterhin wurden Kostenfunktionen zur Abschätzung der Investitionshöhen basierend auf Gebhardt et al. (2002) ergänzt. Darüber hinaus sind Funktionalitäten zum Einlesen und Verarbeiten verschiedener Nutzereingaben (z. B. thermische Lastprofile im Tabellenformat), zur Ausgabe interaktiver Ergebnisdarstellungen sowie die Dokumentation des Programmcodes für Entwickler implementiert.

3.3 Beispielhafte Demonstration der Anwendung

Die Demonstration der Planungsplattform erfolgt anhand eines zentralen Kälteversorgungssystems mit reduzierter Komplexität. Dieses besteht aus einer zentralen Kälteerzeugungseinheit, einem Rückkühlmodul mit Freikühloption, einem Pufferspeicher und einem Verbrauchermodul. Optional kann eine Wärmerückgewinnung ergänzt werden. Dabei werden zwei Varianten mit Pufferspeichern unterschiedlicher Dimension verglichen. Nach Spezifikationen der Randbedingungen (Wetterprofile, Strompreiszeitreihen, zulässige Betriebstemperaturen und thermische Lastprofile) werden verschiedene Designvarianten des zu planenden Systems entwickelt (Abbildung 5). Zur Festlegung der Systemtopologie können die Modulverbindungen in der Weboberfläche flexibel gesetzt werden, oder es kann eine Systembeschreibung über die XML-Schnittstelle eingelesen werden.

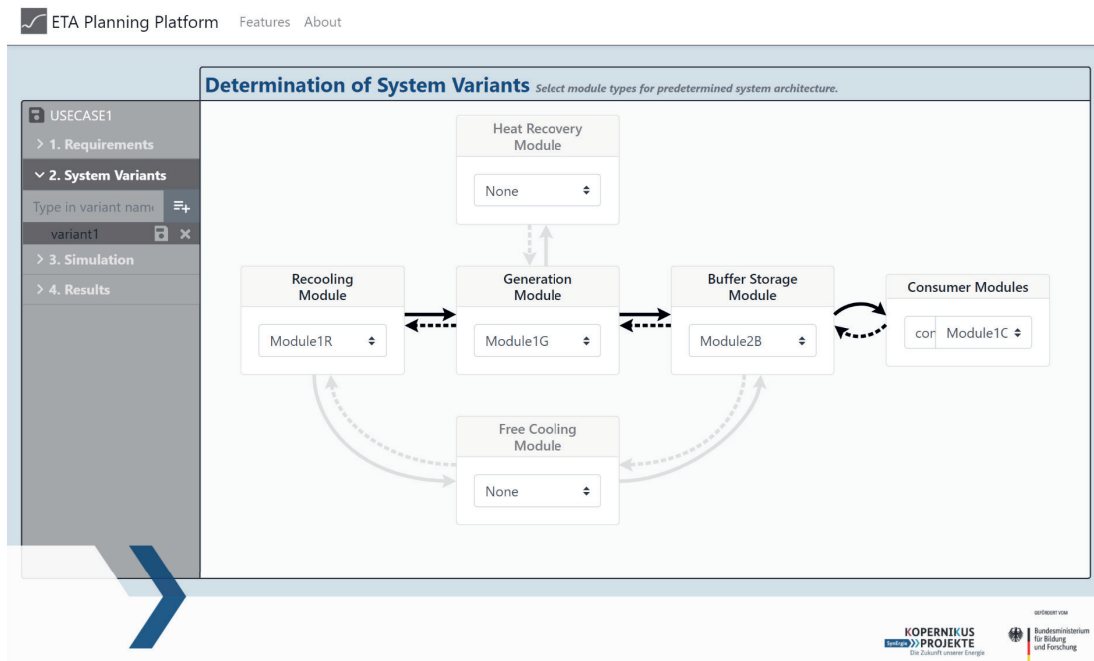


Abb. 5 Auswahl-Oberfläche zur Entwicklung von Designvarianten

Anschließend werden die Einstellungen für die Berechnung festgelegt und die Designvarianten parametrisiert, woran sich die Berechnung sowie die Darstellung der technischen und ökonomischen Zielgrößen anschließt (Abbildung 6 bzw. Abbildung 7). Hierbei lässt sich anhand der technischen Zielgrößen für jede Systemvariante bewerten, ob und über welchen Zeitraum hinweg ausreichend Kälteleistung im zulässigen Temperaturbereich bereitgestellt werden kann. Sofern diese technischen Randbedingungen erfüllt sind, ermöglicht die Visualisierung der ökonomischen Zielgrößen die Variantenbewertung anhand volatiler Energiepreise. Hierbei werden sowohl Investitionen als auch betriebsgebundene Energiekosten betrachtet. Für das vorliegende Beispiel zeigen die Ergebnisse, dass die Betriebskostenreduktion, die mit der Vergrößerung des Speichers einhergeht, die Investition nicht kompensieren kann.

ETA Planning Platform Features About

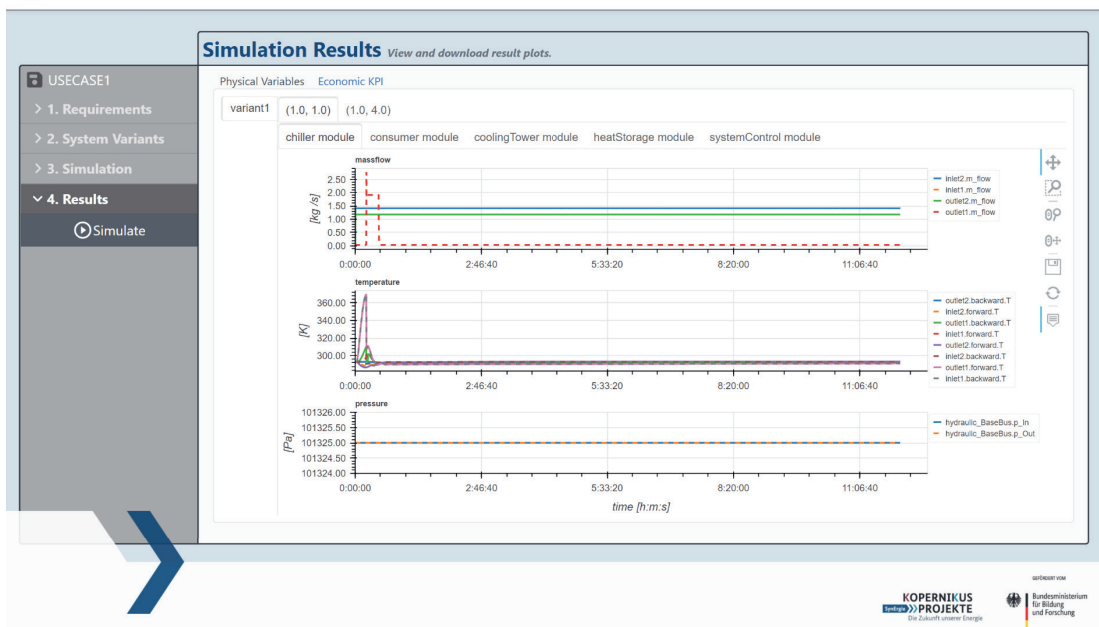


Abb. 6 Visualisierung der strömungsmechanischen Ergebnisse (Massenstrom, Temperatur und Druck)

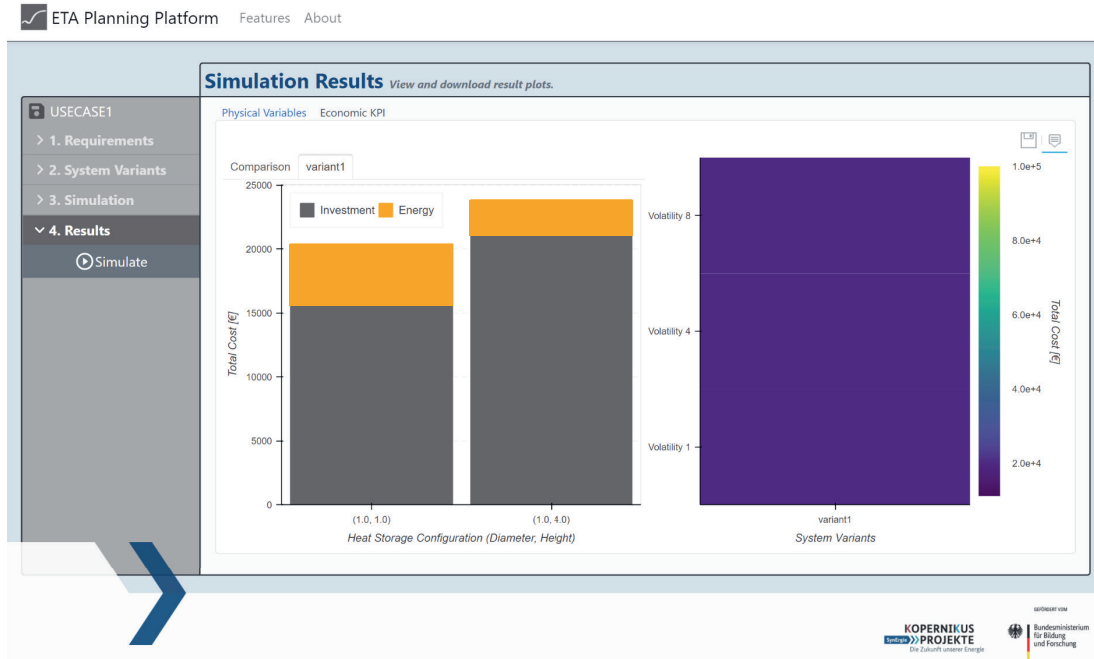


Abb. 7 Visualisierung der ökonomischen Zielgrößen (Investitionen und energiegebundene Betriebskosten)

3.4 Zusammenfassung

Die entwickelte Planungsplattform stellt ein webbasiertes Werkzeug zur Unterstützung der Planung energieflexibler Kälte- und Wärmeversorgungssysteme in Industrieunternehmen dar. Die Zielgruppe der Planungsplattform sind Fachexperten wie Planungsingenieure oder Energieberater. Die Benutzeroberfläche umfasst einen vereinfachten Planungsprozess, der zu etablierten Vorgehensmodellen der Fabrikplanung kompatibel ist. Da die Bewertung zeitabhängiger Energieflexibilitätsmaßnahmen den Einsatz dynamischer Simulationen erfordert, ermöglicht deren Integration in ein webfähiges digitales Werkzeug die techno-ökonomische Bewertung verschiedener Designvarianten in der Planungsphase.

4 Umsetzung und Implementierung am Beispiel von Speicher-Wandler-Systemen

Autoren: Fuhrländer-Völker · Lindner · Weigold

4.1 Digitaler Retrofit für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen

Kälteanlagen werden häufig über Proportional-Integral-Differenzial-Regler (PID-Regler) auf eine vorgegebene Zieltemperatur geregelt, um die passende Kälteleistung für Kälteverbraucher zu erzeugen. Dabei wird Strom in Kälteleistung umgewandelt; ein energieflexibler Betrieb ist nicht möglich. Eine Erweiterung des Kühlsystems um einen thermischen Kältespeicher schafft die thermohydraulischen Voraussetzungen und ermöglicht somit einen energieflexiblen Betrieb. Je nach Betriebsstrategie kann abhängig von Strombereitstellung oder Strompreis der Speicher durch die Kälteanlage geladen, der Verbraucher direkt versorgt oder der Verbrauch über den geladenen Speicher gedeckt werden, sodass die Kälteanlage im letzten Betriebsmodus ausgeschaltet bleiben kann. Durch die intelligente Ansteuerung dieses Aufbaus entsteht ein smartes Speicher-Wandler-System. Es besteht aus einem thermischen Speicher, dem Wandler (Kältemaschine), einem thermischen Speicher und einer kommunikationsfähigen Industriesteuerung, mit der eine anlagennahe energieflexible Regelung (basierend auf Optimierungs- und Prognosealgorithmen) realisierbar ist.

4.1.1 Grundlagen

Für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen ist die Nutzung einer modellprädiktiven Regelung sinnvoll (VDI, 2021; Kohne et al., 2020). Für die Regelung wird ein mathematisches Optimierungsproblem aufgestellt mit der Zielfunktion, die zukünftigen Energiekosten zu minimieren. Dabei wird der Betriebspunkt der Kältemaschine in den nächsten Zeitschritten als Optimierungsvariable modelliert. Aus dem Stromverbrauch der Anlage, der aus dem Betriebspunkt resultiert, sowie dem zukünftigen Strompreis werden die prognostizierten Energiekosten ermittelt. Diese gilt es für einen festgelegten Zeitbereich in die Zukunft, zum Beispiel für die nächsten 24 Stunden, zu minimieren. Als Randbedingung muss der Kältebedarf der Produktion immer gedeckt sein. Die Optimierung wird zyklisch ausgeführt, zum Beispiel viertelstündlich. Bei jedem Zyklus wird nur der zeitlich erste Wert der Optimierungsvariablen für die Ansteuerung übernommen und die Maschine entsprechend geschaltet. Die anderen Zeitschritte werden verworfen. Durch das zyklische Ausführen wird der Regelkreis geschlossen, da in jedem Zyklus die Ist-Werte der Anlage sowie Strompreise und Verbrauchsprognosen aktualisiert werden.

Für die Regelung wird eine Prognose des Kältebedarfs benötigt, um zu garantieren, dass immer der benötigte Kältebedarf gedeckt werden kann. Mithilfe dieser Prognose ist eine Optimierung, abhängig von Strompreis, Kältebedarf und Speicherladestand, möglich. Die Algorithmen zur Prognose und Optimierung werden in *Kapitel B.1.7* im Detail erläutert. Der Fokus dieses Abschnitts besteht darin, die technischen Voraussetzungen für die Ausführung der Programme und der nötigen Interaktion mit der Maschine zu beschreiben.

Das Ausführen von Kältebedarfsprognose und Regelung kann auf einer von drei Ebenen erfolgen. Die Programme werden als Edge-Anwendung direkt auf einem Industrie-PC (IPC) ausgeführt. Die Ausführung erfolgt auf einem mit dem Netzwerk verbundenen PC innerhalb des Unternehmens (Edge-Cloud) oder auf einer unternehmensexternen Cloud, zu der eine Internetverbindung besteht. Für die letzten beiden Varianten können ein IPC oder eine einfachere, aber kommunikationsfähige Industriesteuerung eingesetzt werden. Beide Hardware-Varianten werden nachfolgend als Internet-of-Things-Steuerung (IoT-Steuerung) bezeichnet.

Bei der Entscheidung zwischen Edge-, Edge-Cloud- oder Cloud-Lösung sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen. Bei einer Implementierung auf der Edge entsteht keine größere Belastung des Fabriknetzwerks, da über das Netzwerk lediglich der Strompreis zwischen der IoT-Steuerung und dem Energieanbieter oder einem Dienstleister ausgetauscht wird. Außerdem besteht in diesem Fall die Möglichkeit, dass der Anlagenhersteller die Algorithmen direkt auf der Maschine bereitstellt. Dies vereinfacht den Anschluss durch Anwender. Dem steht entgegen, dass für die Edge-Variante die Algorithmen auf die niedrigere Leistungsfähigkeit eines IPC anzupassen sind. Bei der Edge- und der Edge-Cloud-Variante verbleiben die Daten der Algorithmen im Unternehmen, während sie bei der Cloud-Variante mit der externen Cloud ausgetauscht werden müssen. Da die Cloud-Variante eine ständige Kommunikation über das Internet erfordert, ist diese Lösung aufgrund der Anfälligkeit für Cyberangriffe am sicherheitskritischsten. Des Weiteren führt ein Ausfall der Konnektivität dazu, dass keine Regelung des Systems mehr möglich ist. Dem steht gegenüber, dass bei der Edge-Cloud und der Cloud-Variante aufwändige Rechenprozesse einfacher umsetzbar sind, da hier leistungsfähigere Hardware zum Einsatz kommen kann. Außerdem ist es bei diesen beiden Varianten möglich, mehrere Speicher-Wandler-Systeme von einem PC aus zu steuern.

Alle drei Lösungsvarianten setzen im ersten Schritt die Ansteuerbarkeit der Kälteanlage durch eine IoT-Steuerung voraus. Die in *Kapitel 4.1* erwähnten PID-Regler sind meist auf einfachen und kostengünstigen Mikrocontrollern implementiert, die nicht für den aufwändigen Einsatz der modellprädiktiven Regelung oder von Kältebedarfsprognosen geeignet sind. Für das Lösen des beschriebenen mathematischen Optimierungsproblems werden meist aufwändige numerische Lösungsansätze genutzt. Ebenso können Verbrauchsprognosen größere Rechenleistungen beanspruchen, z. B. solche auf der Grundlage neuronaler Netze. Außerdem sind zugehörige Anwendungen meist in Hochsprachen der Informationstechnologie geschrieben (z. B. Python, C++), die den Einsatz eines Betriebssystems wie Windows oder Linux erfordern (Fuhrländer-Völker et al., 2021). Dies ist als Edge-Anwendung auf modernen IPCs möglich, die aus einem Operational-Technology-Teil (OT-Teil) für die Funktionalität als speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) mit harter Echtzeitanforderung und einem IT-Teil, der die Ausführung der beschriebenen Anwendungen in Hochsprachen auf dem Betriebssystem ermöglicht, bestehen. Alternativ besteht die Möglichkeit, den IT-Teil auf einen über das Netzwerk verbundenen Server-PC (Edge-Cloud) oder über das Internet an einen externen Cloud-PC auszulagern. Dann ist eine kommunikationsfähige Industriesteuerung einsetzbar, welchen den OT-Teil übernimmt und die Kommunikation zwischen OT und IT über Netzwerkkommunikation ermöglicht.

Der zweite Schritt besteht in der Bereitstellung der Datenpunkte aus dem OT-Teil an den IT-Teil. Im OT-Teil erfolgt die Anbindung der Kältemaschine über analoge (z. B. Stromimpulse) oder digitale Datenkommunikation. Diese Daten müssen den Algorithmen zur Regelung und Prognose des Kälte-

bedarfs zur Verfügung gestellt werden. Außerdem muss das Schreiben von Stellsignalen durch die Algorithmen ermöglicht werden. Dabei sind die Datenpunkte im OT-Teil so zu strukturieren und freizugeben, dass sie von den Algorithmen im IT-Teil nutzbar sind. Die Kommunikation zwischen OT und IT kann beispielsweise auf der Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) oder Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) basieren.

Als letzter Schritt müssen die Prognose- und Optimierungsalgorithmen an die (von klassischen PCs abweichenden) Hardwarevoraussetzungen von IPCs angepasst werden, damit sie auf dem IPC ausführbar sind. Erst dann kann die Installation und Ausführung auf dem IPC erfolgen. Dieser Schritt ist nur erforderlich, wenn das System als Edge-Variante umgesetzt wird.

4.1.2 Technische Anforderungen

Für die Umsetzung des smarten Speicher-Wandler-Systems müssen die folgenden technischen Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Neben der Kälteanlage zur Versorgung eines Systems muss ein Kältespeicher und somit ein Speicher-Wandler-System vorhanden sein.
2. Die Anbindung der Kälteanlage an eine IoT-Steuerung ist technisch realisierbar. Entweder muss die bestehende Steuerung der Kälteanlage hierfür eine industrielle Kommunikationsschnittstelle zur IoT-Steuerung besitzen, oder es muss die Möglichkeit geben, die bisherige Steuerung durch eine IoT-Steuerung zu ersetzen. Für beide Lösungsvarianten müssen elektrische Installationsarbeiten vorgenommen werden.
3. Es müssen Temperaturdatenpunkte des Kälteverbrauchers, im Kältespeicher und in der Kälteleitung zur Prognose des Kältebedarfs vorhanden sein. Hierfür sind Temperatursensoren entweder bereits installiert oder können nachgerüstet werden. Außerdem müssen die Temperaturdaten von der neuen IoT-Steuerung erreichbar sein. Das heißt, dass die Datenwerte über eine Kommunikationsschnittstelle von der bestehenden Steuerung weitergegeben werden oder dass die Temperatursensoren direkt an die IoT-Steuerung angeschlossen werden.
4. Ein IPC, Server-PC oder ein Cloud-PC (mit einem aktuellen Betriebssystem Windows oder Linux) wird benötigt, auf dem in Hochsprache geschriebene Programme und Machine-Learning-Algorithmen ausführbar sind. Dieser PC muss die Hardwarevoraussetzungen zur Ausführung dieser Programme erfüllen, um die modellprädiktive Regelung und Kälteprognose zu ermöglichen.

Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann mit der Umsetzung und dem Umbau zu einem smarten Speicher-Wandler-System begonnen werden.

4.2 Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel für eine erfolgreiche Implementierung von Maßnahmen zur Befähigung von Energieflexibilitätpotenzialen dient die Kälteversorgung des Klimaraums in der ETA-Fabrik der TU Darmstadt.

4.2.1 Aufbau des Anwendungsbeispiels

Das Anwendungsbeispiel besteht aus einer Kälteanlage des Herstellers BKW als Kälteerzeuger, dem Klimaraum als Kälteverbraucher, einem Kältespeicher, der zwischen Erzeuger und Verbraucher geschaltet ist, und einem IPC zur Ansteuerung des Speicher-Wandler-Systems als Edge-Lösung.

Die Kälteanlage besteht aus den Teilkomponenten Verdichter, Frequenzumrichter, Wärmetauscher, einer Pumpe zur Bereitstellung des nötigen Volumenstroms des Mediums und Umschaltventilen. Der Frequenzumrichter wird über einen ab Werk installierten PID-Regler gesteuert, der auf einem Mikrocontroller implementiert ist. Die hydraulischen Verbindungen zwischen den einzelnen Teilkomponenten sowie die Position von Sensoren und Aktoren im hydraulischen System ist in dem R&I-Fließschema in *Abbildung 8* dargestellt.

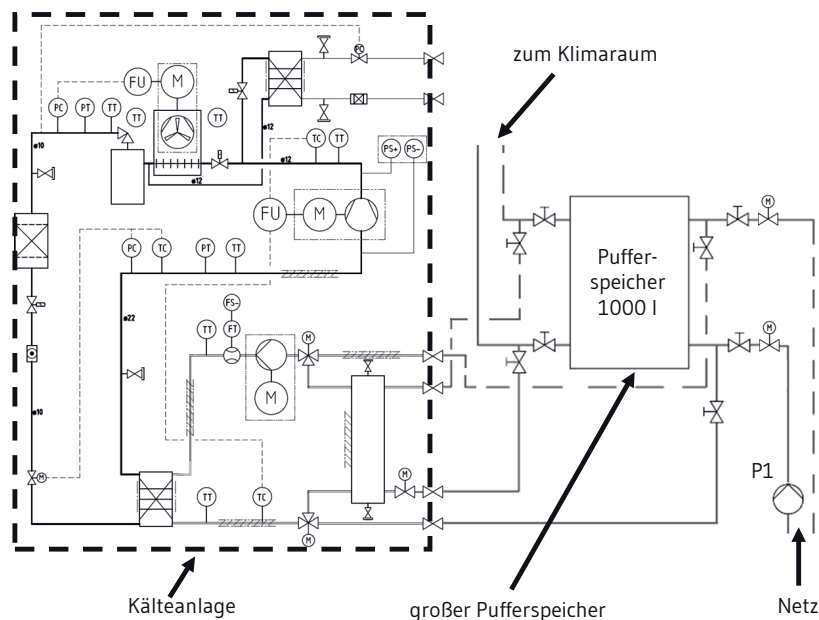


Abb. 8 R&I-Fließschema des smarten Speicher-Wandler-Systems, bestehend aus dem Wandler (Kälteanlage, schwarz umrahmt), einem thermischen Pufferspeicher und dem zu versorgenden System (Klimaraum)

Die Kälteanlage ist mit einem 1000-l-Wasserspeicher als Kältespeicher und mit dem Klimaraum als Verbraucher selbst verbunden. Der Kältespeicher ermöglicht den energieflexiblen Betrieb des Systems. Mit Umschaltventilen kann zwischen zwei Betriebsmodi umgeschaltet werden: (1) Direktbetrieb, das direkte Kühlen des Klimaraums durch die Kältemaschine und (2) Speicherladen, das Kühlen des Speichers und die Versorgung des Klimaraums aus dem Kältespeicher.

Ziel war es zu untersuchen, welche Anpassungen vorgenommen werden müssen, um bestehende Prognose- und Optimierungsalgorithmen auf einem IPC ausführen zu können. Im Anwendungsfall wurde die Implementierung als Edge-Lösung ausgewählt. In einem nächsten Schritt wurde der IPC an das Netzwerk angebunden, sodass auch eine Ansteuerung des Speicher-Wandler-Systems über das Netzwerk als Edge-Cloud-Lösung möglich ist. Der IPC kommuniziert mit der Mikrocontroller-Steuerung der Kälteanlage über Modbus RTU. Die Temperatursensoren für die Kälteprognose sind über analoge Inputklemmen direkt mit dem IPC verbunden. Der Anschluss des IPCs zur informationstechnischen Anbindung des Systems und für die Bereitstellung der Optimierungs- und Prognosealgorithmen ist in *Abbildung 9* dargestellt. Die Grafik zeigt das Zusammenspiel des OT-Teils des IPCs mit dem IT-Teil über eine OPC UA Server-Client Architektur. Die Installation eines OPC UA Servers auf dem OT-Teil des IPC ermöglicht auch die einfache Netzwerkanbindung externer PCs über TCP/IP und digitalen bzw. analogen Input/Output (DI/O bzw. AI/O) Schnittstellen.

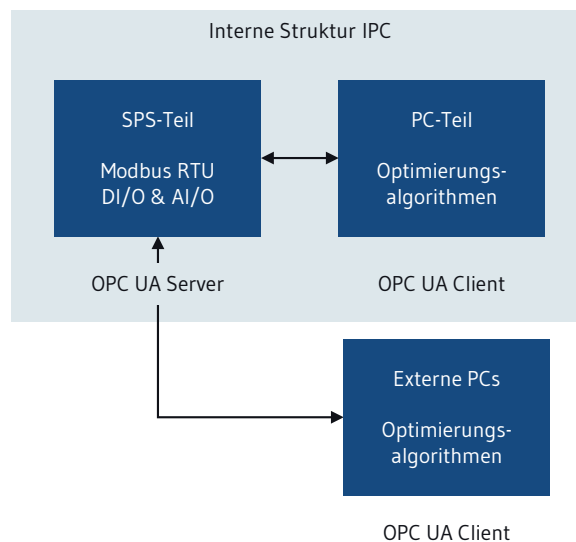


Abb. 9 Aufbau der IT/OT-Kommunikation des smarten Speicher-Wandler-Systems

4.2.2 Implementierung der Algorithmen

Um eine Implementierung und spätere Ausführung (*Kapitel B.1.7*) der bestehenden Optimierungs- und Prognosealgorithmen zu ermöglichen, werden die Algorithmen angepasst. Die Struktur für die Implementierung ist wie folgt:

Für beide Optimierungs- und Prognosealgorithmen wird das Python-Paket TensorFlow verwendet. Das Trainieren des neuronalen Netzes, auf dem die Kälteprognose basiert, erfolgt mit historischen Daten auf einem normalen PC. Die Datenerfassung für die historischen Daten in eine Datenbank erfolgt als Edge-Cloud-Lösung über das Netzwerk. Das trainierte Modell wird dann als Datei auf den IPC übertragen und dort nur noch ausgeführt, sodass die Optimierung das Prognosemodell zur Ermittlung des Kältebedarfs unter Berücksichtigung aktueller Temperaturwerte nutzen kann. Für die Übertragung und Ausführung des Modells wurden die Formate ONNX und TensorFlow Lite getestet. Die Laufzeitumgebungen zum Ausführen der beiden Formate sind speziell an die geringere Leistung von IPCs angepasst und somit dort ausführbar. Beide Formate sind geeignet für den Einsatz im smarten Speicher-Wandler-System. Mit dem gewählten Setup kann im Schritt »Betriebsoptimierung« der VDI-Methodik die energieflexible Regelung des Speicher-Wandler-Systems erfolgen.

4.3 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde dargestellt, wie ein Speicher-Wandler-System zu einem smarten Speicher-Wandler-System erweitert werden kann. Als Anwendungsfall wurde die Kältemaschine der ETA-Fabrik verwendet, die mit einem Pufferspeicher verbunden ist und einen Klimaraum als Kälteverbraucher versorgt. Es wurde beschrieben, welche Schritte nötig sind, um ein Standard-Kälteversorgungssystem durch Installation zusätzlicher Hardware und der Implementierung von Kälteprognose- und energieflexiblen Regelungsalgorithmen zu einem smarten Speicher-Wandler-System zu erweitern. Die Anpassung hin zu einem smarten Speicher-Wandler-System stellt einen wichtigen Schritt bei der Energieflexibilitätsbefähigung von industriellen Versorgungssystemen dar.

5 Operative Energieflexibilitätsvermarktung

Autoren: Ilieva-König · Lindner · Weigold

5.1 Die Plattform »Flexys« zur Vermarktung von Energieflexibilität

Der im Rahmen der Energiewende entstandene Paradigmenwechsel in der deutschen Energieversorgung stellt insbesondere die energieintensive Industrie vor neue Herausforderungen. Strom – als essenzielle Inputgröße vieler Herstellungsprozesse, z. B. der Aluminiumelektrolyse – wird zunehmend aus nachhaltigen Energiequellen gewonnen. Für das weltweit einzige Verfahren zur Herstellung von Primäraluminium, den Hall-Héroult-Prozess, stellt die Nutzung der Energie aus volatilen erneuerbaren Energiequellen die bislang größte Herausforderung dar. Nachfolgend wird dargestellt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen eine energieflexible Herstellung von Primäraluminium möglich ist.

Dafür wurde durch die Firma TRIMET eine Universal-Plattform zur Vermarktung von Energieflexibilitäten mit dem Namen »Flexys« entwickelt, die es ermöglicht, die Stromabnahme der Elektrolyse um den Arbeitspunkt herum von ± 25 Prozent jeweils bis zu 48 Stunden zu variieren.

5.2 Forschungs- und Vermarktungsansätze

Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen, der Bundesrepublik Deutschland und der Europäischen Union ist am TRIMET-Standort Essen im laufenden Betrieb eine Aluminiumelektrolyse mit einer Lastverschiebekapazität von $\pm 22,5$ MW und einer virtuellen Speicherkapazität von 2.160 MWh entstanden. Dies entspricht ungefähr der Speicherkapazität von zwei großen Pumpspeicherkraftwerken (Heimerl und Kohler, 2017).

Die flexible Aluminiumelektrolyse bietet die Möglichkeit, neben der Erbringung von Regelreserve neue Forschungsansätze zur Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen an den Spotmärkten (z. B. kontinuierlicher Intraday-Handel) zu erproben und ihre technischen, betriebs- und volkswirtschaftlichen Auswirkungen zu überprüfen. Um einen detaillierten und aussagekräftigen Vergleich der unterschiedlichen Konzepte im Hinblick auf die Prozessauswirkungen sowie die Amortisation der Investitionen in Energieflexibilitätsmaßnahmen zu realisieren, ist es notwendig, die Gesamtenergieflexibilität ($\pm 22,5$ MW) in mehrere Lastbänder aufzuteilen und für jeden Vermarktungspartner ein eigenes Energieflexibilitätsband zu reservieren. Die Reservierung der Lastbänder für die einzelnen Vermarktungspartner schließt eine Doppelvermarktung von Energieflexibilität aus. Weiterhin wird eine Fehlerzuteilung bei nicht korrekter Erbringung ermöglicht. Dabei erfordert die Kommunikation einen sicheren bidirektionalen Datenaustausch zwischen TRIMET und jedem Partner.

5.3 Plattform-Konzept zur Vermarktung von Energieflexibilität

Bei Produktionsanlagen zur Primäraluminiumerzeugung existieren grundsätzlich keine Kommunikationsstrukturen zum Zweck der Energieflexibilitätsvermarktung, und die bestehenden SPS-Laststeuerungseinheiten sind nicht für diese Aufgaben ausgelegt. Die Komplexität steigt mit der Anzahl der Partner und der Diversität der Kommunikationswege. Um dieses Problem zu adressieren, wurde ein informations- und kommunikationstechnisches Konzept (IKT-Konzept) erstellt, in dem die Anforderungen an die Kommunikationswege, die Schnittstellen, die Datensteuerung für die relevanten Produktarten und Partner sowie die Art der Daten beschrieben sind. Es wurde ein virtueller Server bereitgestellt, der als zentrales Element des IKT-Konzepts dient. Um die Daten- und die Energieflexibilitätsteuerung auf dem Server sowie zwischen dem Server, der Kopf-SPS (Eingang-SPS) und den externen Partnern gezielt vornehmen und die notwendigen Einstellungen und Reservierungen durchführen zu können, wurde eine Steuerungs- und Visualisierungssoftware entwickelt. Der Server, die Software und zugehörige Gateways bilden eine Universal-Plattform zur Vermarktung von Energieflexibilitäten: »Flexys«. Diese Plattform kommuniziert mit der Unternehmens- und Marktplattform (Abbildung 10).

5.4 Funktionsweise und Einsatz von »Flexys«

Jeder Partner hat über ein speziell parametrisiertes Gateway Zugriff auf die Universal-Plattform »Flexys«. Dort können Daten (z. B. Sollwerte und Fahrpläne) abgelegt oder über das Gateway Ist-Werte und Batteriekapazitätsstände ermittelt werden. Für die korrekte Identifizierung und Zuteilung der auf »Flexys« eingehenden Daten werden diese beim Versand vom Partner mit einer ID gekennzeichnet, sodass die Plattform den Partner und das vermarktete Produkt (z. B. Primär- oder Sekundärregelenergie) erkennt und auf Plausibilität überprüfen kann.

Die angeforderten Lastwerte aus den geprüften Daten werden anschließend an die Kopf-SPS der Produktionshalle weitergeleitet und dem für den jeweiligen Partner reservierten Energieflexibilitätsband zugewiesen. Von der Kopf-SPS wird über eine redundant ausgelegte Leitung eine Rückmeldung über die Erbringung zum Server gesendet und an den Partner übermittelt.

Die Kommunikationswege und Schnittstellen zwischen der Partnerinfrastruktur und TRIMET können individuell ausgestaltet werden. Die Datenwerte (z. B. Sollwerte und Fahrpläne) sind direkt über einen VPN-Tunnel oder über die eigene Infrastruktur der Partner austauschbar. Viele etablierte Dienstleister für die Vermarktung von Energieflexibilität haben spezielle Kommunikationswege oder Hardware, die beim Kunden installiert wird.

Eine besondere Lösung stellt die Verbindung der Universal-Plattform mit der Energiesynchronisationsplattform dar. Letztere ist über einen Smarten Konnektor (Flexys-Konnektor) mit »Flexys« verbunden und besteht aus Unternehmens- und Marktplattform. Seitens der Unternehmensplattform sorgt der Energieflexibilitätsmanagementservice (EFMS) für die Übertragung der relevanten Daten. So kann beispielsweise das Flexibilitätseinsatzplanungstool eine marktübergreifende Optimierung der Energieflexibilität vornehmen und einen optimierten Fahrplan zurückgeben.

Treten kritische Netzsituationen mit schnellen Änderungen der Netzfrequenz (f_{Netz}) bei z. B. Prognosefehlern der Energieerzeugungsanlagen oder einem Kraftwerksausfall auf, erhält die Kopf-SPS von einem lokalen Frequenzmessgerät (MG) die Frequenzabweichung (f_{MG}) und ermöglicht somit über die Kommunikation mit dem Energiedatenmanagementsystem (EMS bzw. EDMS) einen direkten Abruf von Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Stabilisierung des Stromnetzes. Die Universalplattform »Flexys« informiert die Übertragungsnetzbetreiber automatisch über die erbrachte Energieflexibilitätsmaßnahme. Eine weiterführende Beschreibung des TRIMET-Anwendungsfalls findet sich in *Kapitel C.5*.

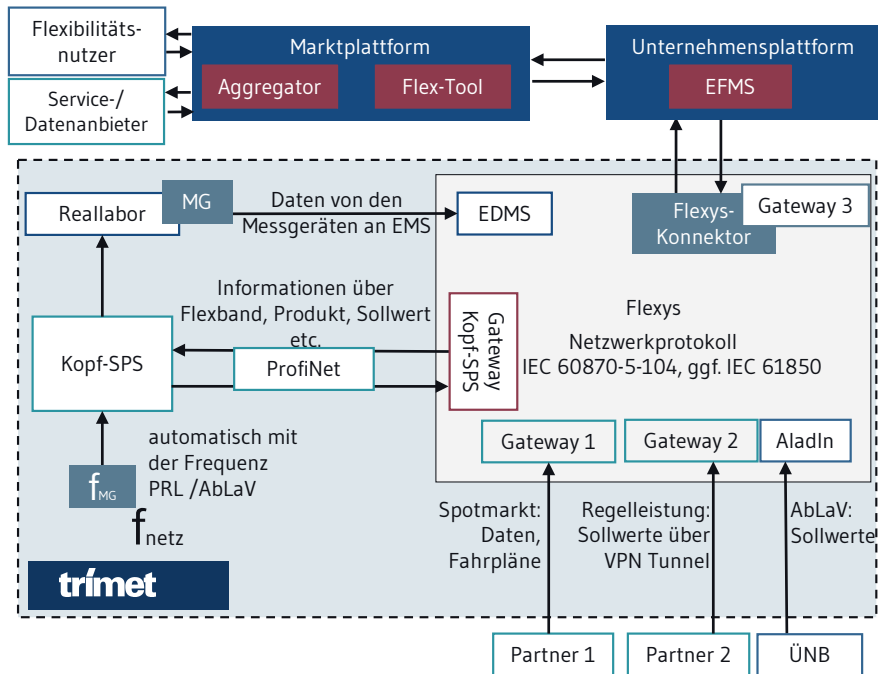


Abb. 10 Das Flexys-Konzept bei TRIMET und die Anbindung zur Unternehmens- und Marktplattform

6 Controlling und Monitoring am Beispiel Last- und Flexibilitätsmanagement

Autoren: Bianchini · Retzlaff · Schillinger · Riethmüller · Benedik · Hoffman · Seyed Sadjjadi · Emde · Sauer

6.1 Grundlagen

6.1.1 Zielstellung

Die Aufgabe des Last- und Energieflexibilitätsmanagements besteht darin, zu bestimmen, welche Energieflexibilitätsmaßnahmen in welchem Ausmaß und zu welchem Zeitpunkt durchgeführt werden, um einen möglichst kostengünstigen elektrischen Energiebezug zu ermöglichen bzw. möglichst hohe Erlöse bei der Vermarktung von Energieflexibilität zu erzielen. Diese Aufgabe ist Teil der Controlling- und Monitoring-Phase der sechsstufigen Methodik zur energetischen Flexibilisierung von Fabriken nach VDI (2021). Unter dem Begriff des Controllings ist in diesem Zusammenhang – in Abgrenzung zum betriebswirtschaftlich geprägten Begriffsverständnis – eine zielgerichtete Steuerung des

elektrischen Energiebezugs zu verstehen. In diesem Kapitel werden zwei Beispiele des Last- und Energieflexibilitätsmanagements vorgestellt, eines für die Kunststoffproduktion und eines im Bereich der Automobilindustrie.

6.1.2 Umsetzung

Grundlage des Last- und Energieflexibilitätsmanagements ist die umfangreiche Erfassung von Hauptstromverbrauchern und die Extrapolation der Verbräuche von wenigen gemessenen mittelgroßen Verbrauchern auf deren Gesamtheit. Durch die Verknüpfung dieser Daten mit den Daten eines Manufacturing Execution Systems aus der Fertigung über einen definierten Zeitraum kann sichergestellt werden, dass die Verbrauchsflexibilisierung nicht die Produktivität verringert.

Das Last- und Energieflexibilitätsmanagement wird in die hierarchische Steuerungsstruktur der Fabrik integriert (Siepmann und Graef, 2016). Das ermittelte Optimum des Systems wird zum Zweck der Umsetzung an die untergeordneten lokalen Steuerungssysteme übergeben. Falls eine Durchführung der Energieflexibilitätsmaßnahmen nicht planmäßig erfolgt, wird dies dem übergeordneten Last- und Energieflexibilitätsmanagement mitgeteilt. Daraufhin wird die Planung der Energieflexibilitätsmaßnahmen angepasst und die erforderlichen alternativen Energieflexibilitätsmaßnahmen werden aktiviert.

6.2 Last- und Flexibilitätsmanagement in der Kunststoffproduktion

Eine dynamische Lastreduzierung lässt sich beim Kunststoffspritzgießen nur sehr schwer realisieren, da die Qualität des zu fertigenden Bauteils nicht beeinträchtigt werden darf. Eine Prozessparameteranpassung beeinflusst direkt die Qualität sowie die Anzahl der produzierten Bauteile. Diese Abhängigkeit der Dimensionen Qualität, Quantität und Energie muss innerhalb definierter Toleranzgrenzen eingehalten werden. Eine mögliche Energieflexibilitätsmaßnahme stellt vor diesem Hintergrund die Verschiebung des Produktionsstarts dar, die im Anwendungsfall mithilfe eines Simulationstools dargestellt wird.

6.2.1 Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen zur Umsetzung des Simulationstools wurden gemeinsam mit den Konsortialpartnern definiert. Als Ausgangspunkt dient die Spritzgießmaschine ARBURG Allrounder 370E 600-100, die im Labor des Campus Schwarzwald verortet ist. Die Datenakquisition wurde mit Energiemesssystemen durchgeführt, um Messwerte für elektrische Spannung, elektrischen Strom, Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie den Phasenverschiebungswinkel messtechnisch zu ermitteln.

Als technische Anforderungen an das Simulationstool wurden funktionale und nicht-funktionale Anforderungen definiert.

Funktionale Anforderungen

- Eingabe: Betriebspunkt der spezifischen Maschine
- Ausgabe: benötigte Aufheizzeiten und -energien, Energiebedarf im Betrieb
- Definition von peripheren Einheiten mit identischer Funktionalität
- Zustandsdokumentation
- Datenintegration realer erneuerbarer Energiequellen
- Integration generischer Energiespeichermodelle
- Virtuelles Produktionsabbild, d.h. Kombination der Prozesse unter energetischen Aspekten

Nicht-funktionale Anforderungen

- Bestmögliche Abbildung der Prozesse
- Erweiterbarkeit
- Einfache Bedienung (UX)
- Open-Source bzw. keine proprietäre Software
- Hosting über Cloud

6.2.2 Simulationstool

Das entwickelte Simulationstool konzentriert sich auf drei Aspekte:

- Die energetische Modellierung und grafische Darstellung der Energieverbräuche einer Spritzgießmaschine inkl. deren Skalierung zu einem Maschinenverbund.
- Die Implementierung von generischen Energiespeichermodellen, die als Pufferspeicher zwischen dem Versorgungsnetz und den Verbrauchern in der virtuellen Produktion fungieren. Das Energiespeichermodell kann verschiedene Energiespeichertechnologien (Kondensator, Schwungmassenspeicher, Bleibatterie, Lithium- und Redox-Flow-Batterie) und Kapazitäten berücksichtigen.
- Der Import von realen elektrischen Leistungsdaten regenerativer Energiequellen. Mit der Synchronisation dieser Aspekte lässt sich eine virtuelle Produktion unter den Gesichtspunkten der Energiebereitstellung und -nutzung modellieren und visualisieren.

Das Simulationstool gliedert sich in verschiedene Funktionalitäten bzw. Module:

1. Das Modul **»Explore Database«** dient zur Sichtung der Rohdaten und bietet einen Überblick über die Datenbasis. Dabei können unterschiedliche Datenbanken sowie Darstellungsformen ausgewählt werden.
2. Im Modul **»Segment Data«** werden die Rohdaten segmentiert und in die einzelnen Prozesszyklen und Prozessphasen eingeteilt.
3. Die im vorangegangenen Modul definierten Zyklen und Prozessphasen können im Modul **»Compare Measurement Cycles«** bezüglich ihrer Leistungsaufnahme und Prozessdauer verglichen werden, wodurch sich Unterschiede in den einzelnen Versuchsreihen aufzeigen lassen.
4. Im Modul **»Physical Simulation«** wird unter Eingabe der Prozessparameter der elektrische Energieverbrauch der spezifischen Spritzgießmaschine simuliert.
5. Das Modul **»Simulate Factory«** bildet die Grundlage für die Simulation eines Maschinenverbunds. Dabei werden eine oder mehrere Simulationen ausgewählt und vervielfältigt. Durch Anpassen von z. B. Startzeitpunkten lässt sich der Maschinenverbund zeitlich dynamisch variieren und der Energieverbrauch somit flexibilisieren.
6. Im Modul **»Simulate Renewable Energies«** werden Daten von regenerativen Energieträgern in der Simulation berücksichtigt. Weiterhin wird ein generischer Energiespeicher implementiert. Dieser ermöglicht den Abgleich der durch erneuerbare Energien bereitgestellten Netzleistung mit dem Energiebedarf der Spritzgießproduktion. Somit dient das Tool der Veranschaulichung einer Kunststoff-Spritzgießproduktion und zeigt Möglichkeiten der realen Umsetzung auf.
7. Mithilfe des Moduls **»Simulate Heating Process«** kann der energieintensive Aufheiz- und Anfahrprozess einer Spritzgießmaschine dargestellt werden. Dazu werden an der Maschine Heizbänder mit einem Regler angesteuert, bis die Solltemperatur im Schneckenzyylinder erreicht ist. Für eine beispielhafte Maschine wurde dieser Anfahrprozess in einem Modell nachgebildet. Durch Auswählen der gewünschten Solltemperaturen der einzelnen Zylinderheizzonen kann bestimmt werden, wie lange der Aufheizprozess dauert und welchen Energiebedarf dieser Vorgang hat.

6.2.3 Simulation eines Spritzgießzyklus

Ein Spritzgießzyklus gliedert sich in unterschiedliche Betriebsphasen mit verschiedenen Einstellparametern. Um eine Simulation durchzuführen, müssen verschiedene Parameter (z. B. Werkzeug- und Einspritzgeschwindigkeiten, verschiedene Kunststoffe) definiert werden. Nach erfolgter Parametereingabe wird ein energetisches Modell eines solchen Zyklus generiert und grafisch sowie tabellarisch dargestellt. Weiterhin findet eine Simulation der Zykluszeit statt, wodurch eine erste Abschätzung der benötigten Zeit eines solchen Zyklus getroffen werden kann. Außerdem kann der Zyklus energetisch sowie zeitlich optimiert werden. In *Abbildung 11* ist eine solche Simulation exemplarisch dargestellt.

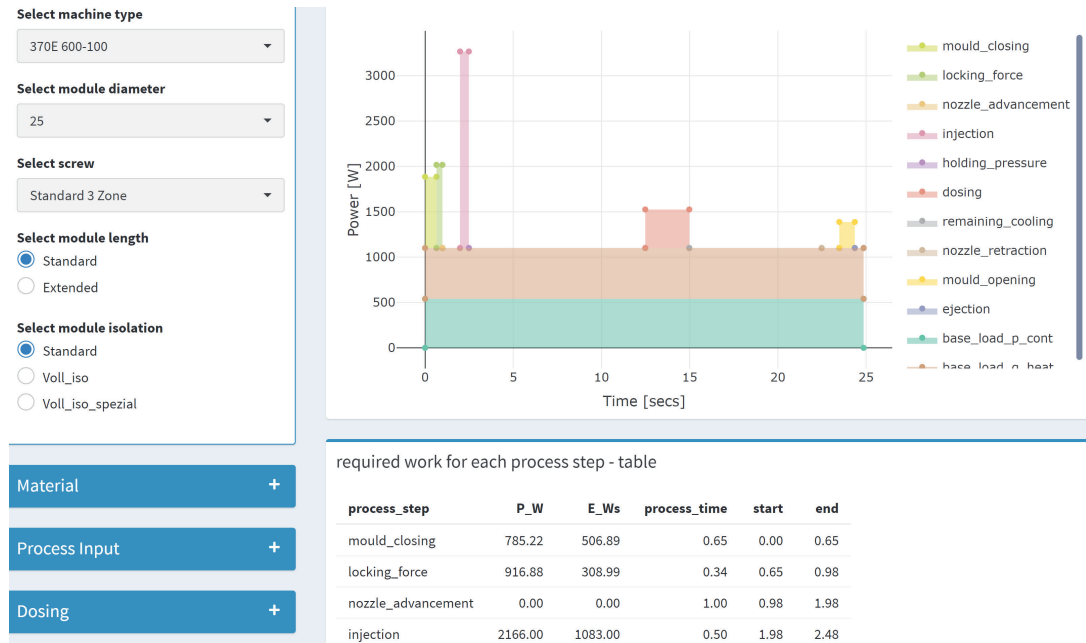


Abb. 11 Ergebnisse einer Simulation des Spritzgießzyklus anhand von eingegebenen Maschinenparametern

6.2.4 Simulation eines Maschinenverbunds

Die Spritzgießproduktion besteht aus einem Verbund mehrerer Spritzgießmaschinen mit sehr großer Produktvielfalt, sodass nicht jede Maschine dasselbe Bauteil herstellt. Um dieses Problem abzubilden, lassen sich die einzelnen Maschinen, die im Rahmen der Simulation definiert wurden, zu einem Maschinenverbund zusammenführen. Des Weiteren lassen sich die Startzeitpunkte der einzelnen Spritzgießmaschinen variieren. Als Ergebnis der Simulation erhält man die aufsummierte Leistung der einzelnen Spritzgießmaschinen. Die Simulation eines solchen Maschinenverbunds aus drei Maschinen ist in *Abbildung 12* dargestellt.

1	Simulation_A	0
2	Simulation_A	2
3	Simulation_B	4

Showing 1 to 3 of 3 entries

Previous

1

Next

Simulation results - plot

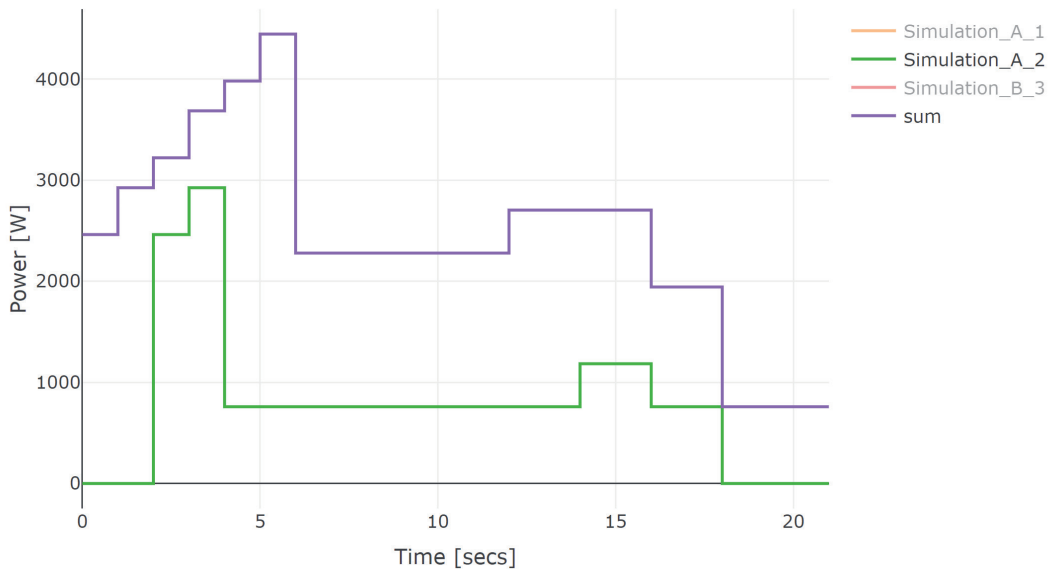


Abb. 12 Ergebnis der Simulation mehrerer Spritzgießmaschinen (Simulation A_1 und B_3 zur leichten Verständlichkeit ausgeblendet)

6.2.5 Lastspitzenreduktion durch verschobene Anfahrvorgänge

Es besteht die Möglichkeit, das Lastprofil des Maschinenverbunds zu optimieren. Das Ziel ist es, die zeitliche Anordnung der Lastprofile der einzelnen Maschinen so zu variieren, dass die Summe der Lastspitzen reduziert und die Variation der Startzeitpunkte einzelner Maschinen minimiert wird. Das bietet die Möglichkeit, die Produktion an die entsprechenden Startzeitpunkte anzupassen und einen konstanten Leistungsbedarf der Maschinen zu gewährleisten.

6.3 Last- und Flexibilitätsmanagement in der Automobilindustrie

Die Mercedes-Benz AG nahm 2020 unter dem Leitmotiv »digital, flexibel und nachhaltig« mit der Factory 56 in Sindelfingen die bisher modernste Montagehalle des Konzerns in Betrieb. Um das Ziel eines energiekostenoptimierten Betriebs der Komponenten zu erreichen, wird ein Last- und Energieflexibilitätsmanagement eingesetzt. Konkret verfolgt die Mercedes-Benz AG das Ziel, durch das Lastmanagement eine Reduktion oder Verschiebung von Lastspitzen (Peak-Shaving oder Peak Shifting), eine Steigerung des durch Photovoltaik eigenerzeugten Stroms, eine Verbesserung der Versorgungssicherheit (z. B. durch die Überbrückung von Ausfällen der elektrischen Versorgung) und Erlöse durch Stromhandel bei zunehmender Volatilität des Energieangebots und der Energiepreise zu generieren (z. B. durch die Teilnahme an Regelenergie- oder Spotmärkten).

Die Problemstellung der optimalen Durchführung und Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) ist vielschichtig, da werksinterne Zustände (Eigenschaften der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen und Eigenschaften des Gesamtsystems), die Verfügbarkeit der einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen sowie externe Einflüsse (z. B. die Vermarktungsmöglichkeiten an Regelenergie- oder Spotmärkten) einen Einfluss auf die Optimierung haben. Diese stehen als Eingangsdaten zur Verfügung. Das Resultat des Last- und Energieflexibilitätsmanagements ist eine maximierte Kostenreduktion unter Berücksichtigung der Erlöse aus der Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen.

6.3.1 Konzept des Last- und Energieflexibilitätsmanagements

Der Prozessablauf des für die Factory 56 konzipierten Last- und Energieflexibilitätsmanagements wird in *Abbildung 13* dargestellt. Die Datengrundlage besteht aus den Lastzuständen der Komponenten, den Preisen der Spot- und Regelenergiemärkte sowie den Eigenschaften der Energieflexibilitätsmaßnahmen und bildet den Eingang für das Last- und Energieflexibilitätsmanagement. Dieses ist in der Lage, die Energieflexibilitätsmaßnahmen unter Betrachtung der Netzentgeltreduktionsziele (Lastspitzenreduktion oder atypische Netznutzung) auf den Spotmärkten und den Regelenergiemärkten zu vermarkten, sowohl einzeln als auch kombiniert. Nach den Vorgaben des Anwenders bezüglich der zu berücksichtigenden Vermarktungsmöglichkeiten erfolgt im zweiten Prozessschritt ein Energieeinkauf auf den Spot- und Future-Märkten. Durch die ersten beiden Prozessschritte wird der Betrachtungsumfang für das Last- und Energieflexibilitätsmanagement festgelegt und der Echtzeitsteuerung als Eingangsgröße übermittelt (*Abbildung 13*).

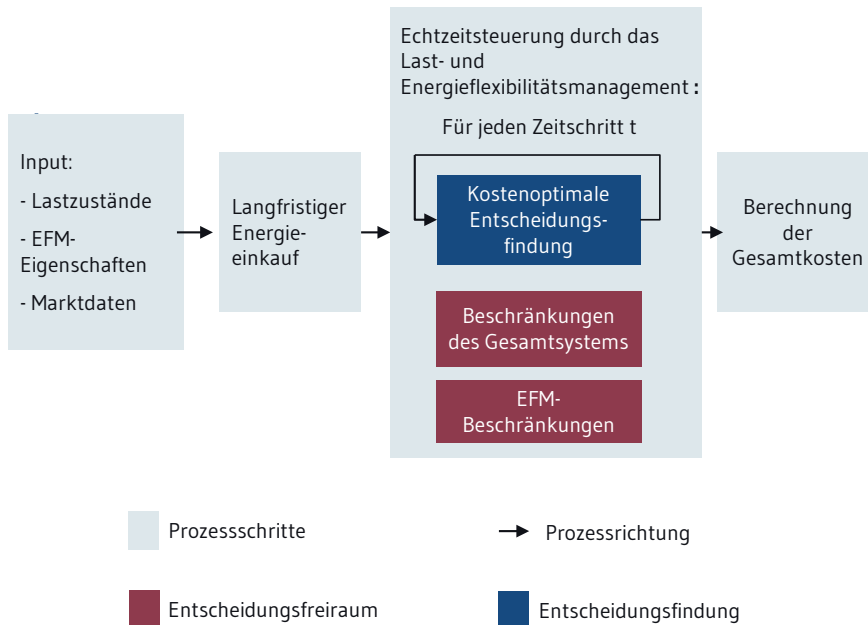


Abb. 13 Prozessablauf des konzipierten Last- und Energieflexibilitätsmanagements für die Factory 56 der Mercedes Benz AG

Die Entscheidung wird für jeden Zeitschritt (15 Minuten) getroffen. Die Vorgabe des Entscheidungsraums wird auf zwei Ebenen definiert. Auf der ersten Ebene werden die einzelnen Energieflexibilitätsmaßnahmen in ihrer Durchführung beschränkt. Dies geschieht entsprechend den jeweiligen technischen Eigenschaften der Energieflexibilitätsmaßnahmen (z. B. deren Leistung, Abrufdauer oder Speicherkapazität). Die zweite Ebene zeigt die Beschränkungen des Gesamtsystems auf. So werden die Voraussetzungen der Vermarktungsmöglichkeiten und die Leistungsgrenzen der Infrastruktur in der Entscheidungsfindung berücksichtigt. Die Entscheidungsfindung erfolgt basierend auf einer gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung (Mixed Integer Linear Programming, MILP). Diese ermittelt das Minimum der aufgestellten Kostenfunktion, woran sich die Durchführung der Energieflexibilitätsmaßnahmen über die Steuerung anschließt.

Je nach Eigenschaften ergeben sich für unterschiedliche Energieflexibilitätsmaßnahmen unterschiedliche Vermarktungsmöglichkeiten. *Tabelle 1* stellt die möglichen Energieflexibilitätsmaßnahmen dar und zeigt, ob diese die Voraussetzungen der unterschiedlichen Märkte erfüllen. Die zeitlich begrenzte Verfügbarkeit, die Leistung und die Speicherkapazität der Energieflexibilitätsmaßnahmen schränken ihren Einsatz zu Zwecken der Netzentgeltreduktion und der Teilnahme an den Regelleistungsmärkten ein.

Tab. 1 Die Energieflexibilitätsmaßnahmen der Factory 56 und die dadurch erfüllten Voraussetzungen der Vermarktungsmöglichkeiten; x: Voraussetzungen erfüllt; (-): Voraussetzungen nicht erfüllt

Vermarktungsmöglichkeit	EFM 1: Elektrischer Speicher	EFM 2: Lüftungsanlage	EFM 3: Ladesäulen
Netzentgeltreduktion: Lastspitzenreduktion	x	x	x
Netzentgeltreduktion: atypische Netznutzung	(-) Minimale Leistung nicht erreichbar	(-) Begrenzte Verfügbarkeit	(-) Begrenzte Verfügbarkeit
Terminmarkt	x	x	x
Spotmärkte	x	x	x
Regelenergiemärkte: Minutenreserveleistung	(-) Minimale Leistung und Speicherkapazität nicht erreichbar	(-) Begrenzte Verfügbarkeit	(-) Minimale Leistung nicht erreichbar und begrenzte Verfügbarkeit

6.3.2 Simulation des Last- und Flexibilitätsmanagements

In *Abbildung 14* werden die aus der Entscheidungsfindung des Last- und Energieflexibilitätsmanagementsystems resultierenden EFM-Einsätze zum Zweck der Lastspitzenreduktion dargestellt. Die Energieflexibilitätsmaßnahmen werden zur Einhaltung des vorgegebenen Leistungsgrenzwerts eingesetzt, wobei als Resultat der Durchführungskosten ihre Einsatzreihenfolge bestimmt wird. Die aggregierte abgerufene Leistung von Energieflexibilitätsmaßnahmen entspricht für jeden Zeitschritt der Differenz zwischen dem vorgegebenen Grenzwert und der Netzbezugslast.

Die Anwendung des Last- und Energieflexibilitätsmanagementsystems im Rahmen von Simulationen ergeben erhebliche Kostenreduktionspotenziale durch die Netzentgeltreduktion und Teilnahme an den Spotmärkten. Dies bestätigt die in Bianchini et al. (2019) erarbeitete Bewertung der Handelsprodukte für die Industrie. Spotmärkte zeigen unter den angenommenen Randbedingungen und der Marktsituation im Jahr 2019 für flexible industrielle Verbraucher das größte Potenzial. Auch zukünftig sind die Netzentgeltreduktion und die Teilnahme an den Spotmärkten mit einem positiven Kosteneinsparungspotenzial für die Mercedes Benz AG zu bewerten: Die zunehmende Volatilität der Marktpreise auf den Spotmärkten sowie die steigenden Netzentgelte unterstützen den bestehenden Trend zur Vermarktung von Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Industrie (Bianchini et al. 2021).

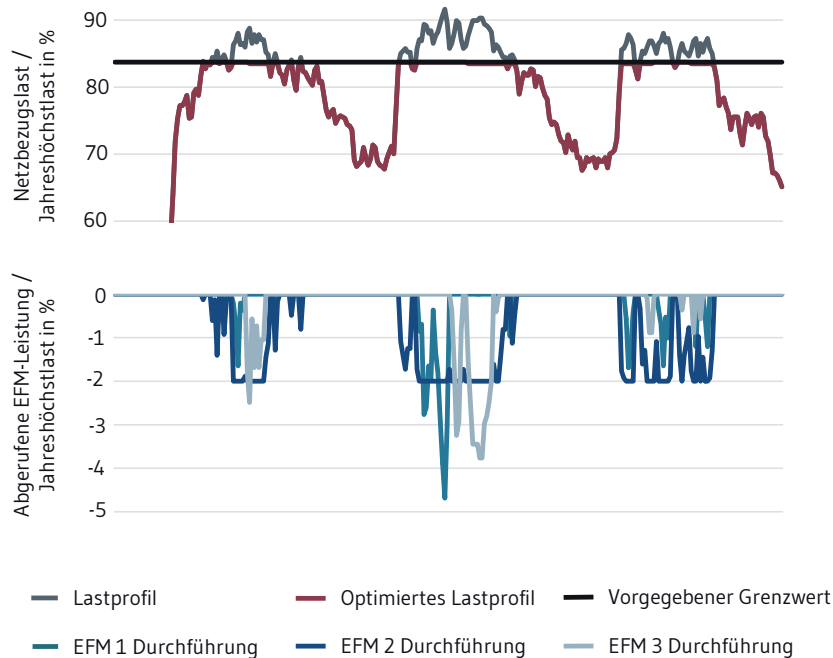


Abb. 14 Durchführung von Energieflexibilitätsmaßnahmen (EFM) zum Zweck der Lastspitzenreduktion

6.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden zwei Beispiele des Last- und Flexibilitätsmanagements vorgestellt, welche die Flexibilisierung von industriellen Fabriken unterstützen.

In der Spritzgießproduktion stehen die Größen Qualität, Quantität und Energie in einer starken Abhängigkeit. Eine Veränderung der Prozessparameter wirkt sich direkt in der Bauteilqualität aus. Dies erschwert die energetische Optimierung über die Prozessparameter. Unterstützen soll hier das entwickelte Simulationstool, das Verhaltensweisen einer Spritzgießmaschine sowie einer gesamten Produktion abbilden kann. Dadurch können verschobene Produktionsstarts geplant und umgesetzt werden.

Die in der Industrie vorhandenen Energieflexibilitätsmaßnahmen gilt es optimal zu steuern. Hierfür wurde mit der Mercedes Benz AG ein Last- und Flexibilitätsmanagementsystem entwickelt, das die Erschließung von Kostenreduktionspotenzialen durch verschiedene Vermarktungsmöglichkeiten von Energieflexibilitätsmaßnahmen ermöglicht. Die Ergebnisse verdeutlichen den positiven Einfluss der Energieflexibilitätsmaßnahmen auf die Senkung der Produktionskosten.

7 Betriebsoptimierung

Autoren: Weber · Dietrich · Weigold

7.1 Grundlagen

Versorgungstechnische Systeme verursachen nach Panten (2019) in der Regel zehn bis 40 Prozent des gesamten Energiebedarfs einer Fabrik. Bei diesen mediengebundenen Wärme- und Kälteversorgungssystemen handelt es sich häufig um komplexe Systeme aus zahlreichen Energiewandlern, deren Betrieb eng aufeinander abgestimmt ist. Einfache Maßnahmen zur Lastverschiebung innerhalb eines Prozesses lassen sich nur selten finden. Stattdessen muss in Bezug auf Energieflexibilität das System mit seinen zahlreichen Komponenten als Ganzes betrachtet werden. Aufgrund der hohen Komplexität (viele Freiheitsgrade und Abhängigkeiten) ist es für den Menschen praktisch nicht möglich, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten an Strompreissignale angepasste Betriebsstrategien zu ermitteln. Computergestützte Verfahren, die auf Basis von Messdaten das Anlagenverhalten lernen, bieten die Möglichkeit, den Anlagenbetrieb bei schwankenden Strompreisen kostenminimal zu steuern. In den Kosten können neben den Energiebezugskosten für Strom und Gas auch Steuern und Umlagen sowie der Anlagenverschleiß aufgrund der Steuerung der Anlagen berücksichtigt werden.

7.1.1 Zielstellung

Ziel der Betriebsoptimierung eines Verbunds von versorgungstechnischen Systemen (im Weiteren Pooling-Optimierung genannt) ist es, computergestützte Verfahren für den optimierten Anlagenbetrieb zu entwickeln und ihre Einsatzfähigkeit in realen Fabrikumgebungen zu prüfen. Dabei werden die Kosten minimiert, während die Versorgungsqualität aufrechterhalten wird. Zusätzlich wird der Aufwand zum Einsatz des Verfahrens durch die Automatisierung der Modellerstellung verringert. Die Optimierung wurde nicht nur simulativ durchgeführt, sondern auch an realen Anlagen der ETA-Fabrik der TU Darmstadt eingesetzt in Zusammenspiel mit der Prognose der Nutzenergiebedarfe, der Gebäudeautomation sowie Datenanbietern für Wetter und Strompreisprognosen. Das Gesamtsystem ist in *Abbildung 15* dargestellt.

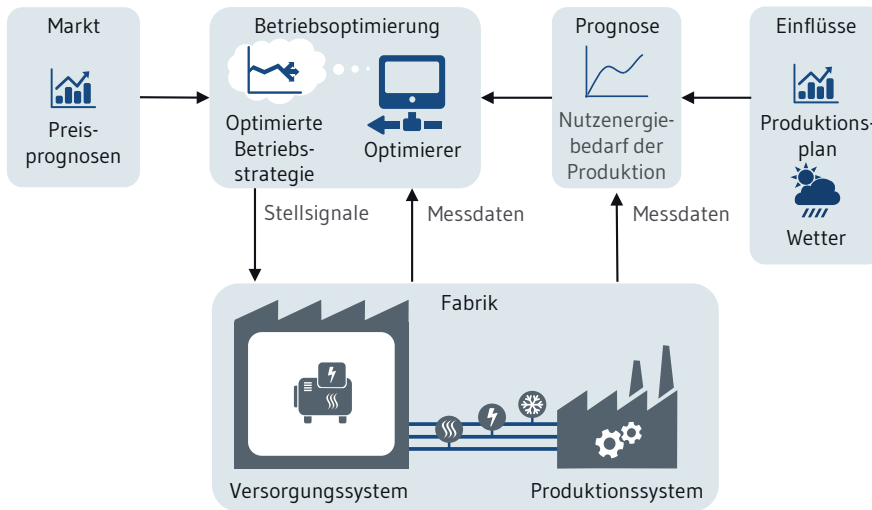


Abb. 15 Aufbau und Datenflüsse zwischen den Systemen zur Nutzenergiebedarfsprognose, Betriebsoptimierung und der Fabrik

Um den Regelkreis der Betriebsoptimierung der versorgungstechnischen Anlagen zu schließen, müssen Daten externer Einflüsse sowie der Systemzustände ermittelt und dem Optimierungsalgorithmus zur Verfügung gestellt werden. Der Algorithmus zur Betriebsoptimierung ist Teil einer als Agent bezeichneten Software, die Aktionen am Energiesystem ausführt und dabei eine vorgegebene Zielfunktion minimiert oder maximiert. Damit die gewählte Betriebsstrategie möglichst vorausschauend gewählt wird, müssen dem Agenten zusätzlich zu den aktuellen Systemzuständen Prognosen über zukünftige Einflüsse auf das zu optimierende System übermittelt werden, z. B. Wetter-, Energiepreis- und Nutzenergiebedarfsprognosen. Die Wetter- und Energiepreisprognosen werden über externe Dienstleister bereitgestellt, wohingegen die Prognosen der Nutzenergiebedarfe unternehmensintern erstellt werden. Dies wird mithilfe eines Service zur automatisierten Erstellung von Nutzenergiebedarfsprognosemodellen ermöglicht.

Der Agent selbst basiert auf einem mathematischen Modell, das das Verhalten des versorgungstechnischen Systems durch eine Reihe von Nebenbedingungen antizipiert. Berechnete Betriebsstrategien müssen alle gestellten Nebenbedingungen der Systeme einhalten (z. B. Temperatur oder Leistungsbeschränkungen). Mit den verbleibenden Freiheitsgraden des zulässigen Lösungsraums wird eine Strategie gewählt, die die Kosten-Zielfunktion minimiert. Diese optimierte Betriebsstrategie wird anschließend in Form der berechneten Stellsignale an die realen Anlagen übertragen und von diesen im versorgungstechnischen System umgesetzt. Hierdurch verändern sich in den nächsten Minuten die Systemzustände (Temperaturen, Drücke oder Anlagenzustände). Diese veränderten

Systemzustände werden nach einem definierten Zeitraum wieder an den Agenten übermittelt und daraufhin die Prognosen aktualisiert, wodurch der Agent eine neue Betriebstrajektorie berechnet und somit auf die veränderten Rahmenbedingungen reagiert. Der Regelkreis wird damit geschlossen.

7.1.2 Technische Anforderungen

Für die reale Umsetzung der Betriebsoptimierung sind Schnittstellen zur Datenübertragung zwischen den verschiedenen Systemen, im Weiteren auch als Microservices bezeichnet, erforderlich. Die Betriebsoptimierung benötigt Schnittstellen zu den Aktoren und Sensoren der Versorgungssysteme sowie Zugriff auf die Wetter-, Nutzenergiebedarfs- und Marktpreisprognosen. Die Nutzenergiebedarfsprognose wiederum benötigt Zugriff auf Wetterprognosen und aktuelle und historische Nutzenergiebedarfe (Abbildung 16). Dafür sind unterschiedliche Kommunikationsprotokolle erforderlich. Zugriffe auf die Sensoren und Aktoren der Fabrik erfolgen über OPC UA und Modbus TCP (Transmission Control Protocol). Die Zugriffe auf die Prognosen und Datenbanken erfolgen über REST-Schnittstellen (Representational State Transfer) im JSON-Format (JavaScript Object Notation).

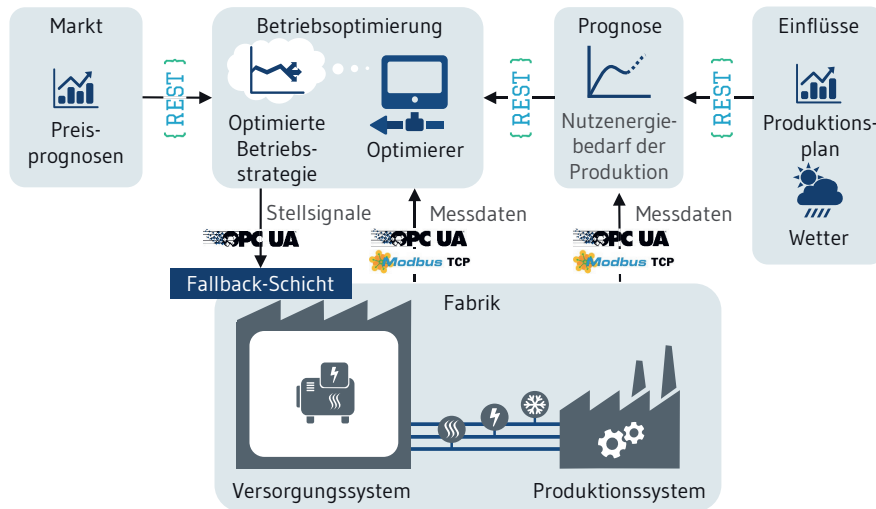


Abb. 16 Schnittstellen der Systeme zur Betriebsoptimierung inkl. Fallback-Schicht

Zur Umsetzung der Schnittstellen wurde softwareseitig in einem Python-Package ein Framework mit Konnektoren entwickelt, welches die Kommunikation über die verschiedenen Schnittstellen innerhalb von Python ermöglicht. Dabei wurde auf Open-Source-Bibliotheken aufgebaut.

Bei der Implementierung sind Anforderungen an die Datenübertragungsrate zu beachten, damit Stellsignale und Systemantworten ausreichend schnell übertragen werden. Da die Betriebsoptimierung im 15-Minuten-Takt durchgeführt wird, sind Datenübertragungsraten kleiner als zehn Sekunden für den Anwendungsfall ausreichend. Dennoch ist zu beachten, dass die Erstellung der Prognosen und deren Übertragung an den Optimierer vor jeder Neuberechnung der Betriebsstrategie erfolgt. Daher spielen die Inferenzzeiten der Prognosemodelle eine wichtige Rolle und sollten ebenfalls im Bereich kleiner als zehn Sekunden liegen.

Eine weitere wichtige Anforderung für den realen Einsatz der Pooling-Optimierung ist die Implementierung einer Fallback-Schicht. Diese stellt sicher, dass durch die Stellsignale des Optimierers keine Systemgrenzwerte überschritten werden und somit die Anlagen nur innerhalb der festgelegten Betriebsgrenzen arbeiten. Die Fallback-Schicht bildet die letzte Instanz vor der Anlagensteuerung. Bei Überschreiten eines Grenzwerts wird automatisch auf die hinterlegte konventionelle Regelstrategie zurückgegriffen und somit das Stellsignal des Optimierers überschrieben. Die Fallback-Schicht wurde ebenfalls in Python umgesetzt.

7.1.3 Umsetzung und Methodik

Die Betriebsoptimierung erfolgt über ein mathematisch formuliertes Optimierungsproblem mit einer Zielfunktion sowie einer Reihe von Nebenbedingungen. Eine potenzielle Lösung des Optimierungsproblems muss zwingend alle formulierten Nebenbedingungen erfüllen. Die verbleibenden Freiheitsgrade können anschließend genutzt werden, um den Wert der Zielfunktion für die gewählte Betriebsstrategie zu minimieren. Hierfür wurde das mathematische Problem als lineares gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem formuliert und anschließend mit entsprechenden Solvern (cplex bzw. glpk) gelöst.

Die für die Betriebsoptimierung erforderlichen Nutzenergiebedarfsprognosen werden datenbasiert auf Grundlage des Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM, *Abbildung 17*) nach Wirth und Hipp (1998) mittels Open-Source-Python-Bibliotheken erstellt. Als Haupteinflussgrößen in Prognosemodellen für den Nutzenergiebedarf von Produktionssystemen werden in der Literatur die vergangenen Lastkurven, Wetterprognosen sowie Daten zur Produktionsauslastung (Produktionsplan oder Schichtplan) verwendet (Walser und Sauer, 2021). Als Trainingsdatensatz ist üblicherweise mindestens ein gesamtes Jahr erforderlich, um die saisonalen Einflüsse eines Jahres abzubilden. Für die Betriebsoptimierung werden die Nutzenergiebedarfe der nächsten zwölf Stunden in einer Auflösung von 15 Minuten bereitgestellt.

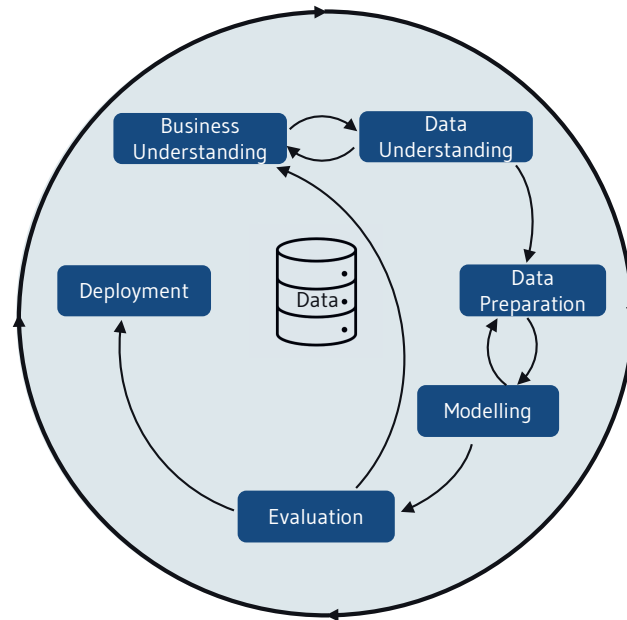


Abb. 17 Phasen des CRISP-DM-Prozessmodells nach Wirth und Hipp (1998)

Nach Festlegung der Prognoseziele (Business Understanding) und erster Analyse der Daten (Data Understanding) liegt der Fokus in der Modellerstellung auf den Schritten Data Preparation, Modeling und Evaluation. Diese Schritte werden über eine Machine-Learning-Pipeline abgedeckt, deren Hyperparameter über einen Optimierungsalgorithmus angepasst werden (Abbildung 18).

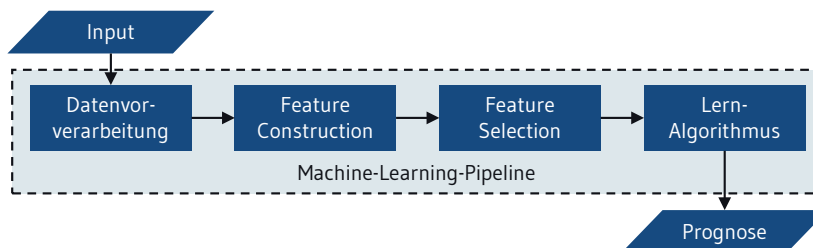


Abb. 18 Machine-Learning-Pipeline zur Prognoseerstellung

Insbesondere werden in der Pipeline unterschiedliche Kombinationen von Algorithmen und deren Hyperparametern zu den Schritten Datenvorverarbeitung (Skalieren, fehlende Werte ersetzen, Ausreißer entfernen), Feature Engineering (zusätzliche Informationen bereitstellen), Feature Selection (Auswahl relevanter Features und/oder Dimensionsreduzierung) und Lern-Algorithmus (Machine-Learning-Algorithmen) getestet und die Kombination mit dem geringsten Prognosefehler nach Bergstra et al. (2011) ausgewählt. Der Prognosefehler wird in Form des normalisierten Mean Absolute Error (nMAE) angegeben:

$$nMAE = \frac{\sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i|}{\sum_{i=1}^n Y_i} \quad (1)$$

mit n : Anzahl der Prognosewerte, \hat{Y}_i : Prognosewerte, Y_i : Beobachtungswerte

Zur Evaluation jedes Durchlaufs wird eine Cross-Validation durchgeführt. Das finale Modell wird abschließend anhand eines Testdatensatzes, der im Training und Hyperparameter-Tuning nicht genutzt wurde, evaluiert.

Zur Bereitstellung der Nutzenergiebedarfsprognose für die Betriebsoptimierung (Deployment) wird die Prognoseerstellung als Microservice in einem Docker-Container auf einer virtuellen Maschine im internen Fabriknetz betrieben. Der Prognosevektor wird über eine REST-Schnittstelle im JSON-Format dem Optimierungsservice zur Verfügung gestellt.

7.2 Anwendungsfall

7.2.1 Aufbau des Anwendungsfalls

Die Algorithmen zur Betriebsoptimierung und Prognose werden anhand eines Teilsystems der Versorgungstechnik in der ETA-Fabrik evaluiert (*Abbildung 19*). Der Fokus liegt neben der Erprobung der entwickelten Ansätze am realen System insbesondere das Zusammenspiel der Komponenten (Kommunikation zwischen Betriebsoptimierer, Prognose und realem System).

Es wird gezeigt, dass reale Anlagen direkt über die geschaffene Infrastruktur gesteuert werden können. Konkret werden das Heißwassernetz sowie Teile des Warmwassernetzes der ETA-Fabrik in die Betrachtung einbezogen. Das Heißwassernetz wird über zwei Blockheizkraftwerke und einen Boiler versorgt. Hierfür wird Gas aus dem öffentlichen Gasnetz bezogen und elektrische Energie aus den Blockheizkraftwerken in das Stromnetz eingespeist. Über einen Plattenwärmetauscher wird die thermische Leistung der Wärmeerzeuger vom Heißwassernetz an das Warmwassernetz übertragen. An das Warmwassernetz sind die eigentlichen Energieverbraucher (Büro- und Hallenheizung) angeschlossen, welche es mit Wärme auf einem vorgegebenen Temperaturniveau zu versorgen gilt. Sowohl das Heißwassernetz als auch das Warmwassernetz verfügen über thermische Weichen zur Pufferung der Wärmeleistung. Aufgrund der hybriden hydraulischen Verschaltung von Wärme-

erzeugern und Verbrauchern in Form einer Parallelschaltung zwischen Vor- und Rücklauf kann es zu thermischen Kurzschlüssen zwischen Erzeugern und Verbrauchern kommen. Diese Kurzschlüsse führen dazu, dass die thermischen Weichen nicht durchlaufen werden und sich entsprechend keine homogene Temperatur über die verschiedenen Erzeuger bzw. Verbraucher einstellt. Dies erhöht die Komplexität der Betriebsoptimierung, da die Temperaturen an den Energiewandlern nur schwer prognostizierbar sind. Insbesondere die Wärmeleistung, die über den Wärmetauscher bereitgestellt wird, ist mit einem stochastischen Rauschen belegt.

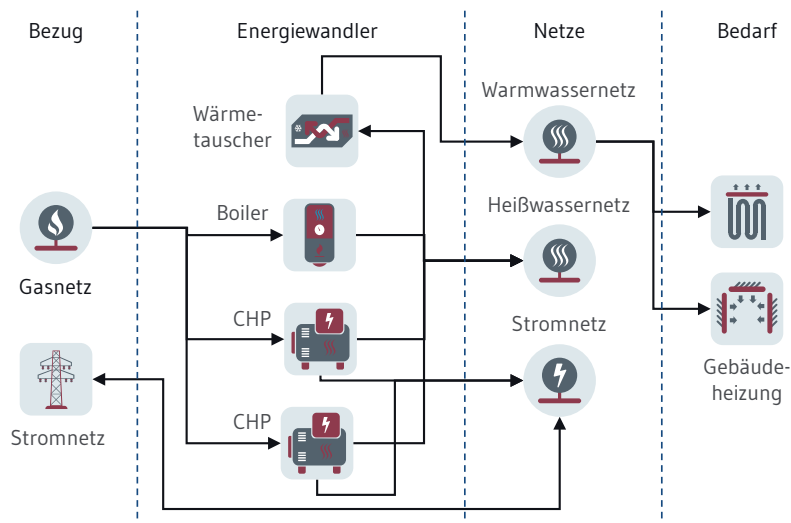


Abb. 19 Wärmeversorgungssystem der ETA-Fabrik

Der Agent zur Optimierung der Betriebsstrategie ist als mathematisches Modell umgesetzt. Dabei werden neun unterschiedliche Modellierungsvarianten des Energiesystems bzw. des jeweiligen Umgangs mit stochastischen Einflussfaktoren evaluiert. Das System wird als lineares gemischt-ganzzahliges Programm modelliert. Ganzzahlige Variablen dienen dabei der Modellierung diskreter Anlagenzustände (z. B. An/Aus). Das Betriebsverhalten der Anlagen wird über eine Linearregression in Abhängigkeit ausgewählter Eingangsgrößen modelliert (Temperaturabhängigkeit, Stellsignal oder Anlagenzustand). Ziel der Linearregression ist die Approximation der über die Energiewandler erzeugten bzw. aufgenommenen Wärmeleistung, der bezogenen Gasleistung der Wärmeerzeuger sowie der elektrischen Leistung der Blockheizkraftwerke. Alle Wärmeleistungen werden anschließend für einen Zeitschritt über die thermische Weiche des jeweiligen Netzes über die Zeit integriert. Über diese Energiebilanz wird die Temperatur innerhalb der thermischen Weiche für die jeweiligen Folgezeitschritte berechnet.

Eine zentrale Nebenbedingung des betrachteten Systems ist die Einhaltung der Grenztemperaturen der Wärmenetze. Die jeweiligen Temperaturgrenzen sind wiederum abhängig von der Außenlufttemperatur. Damit Modellierungsungenauigkeiten nicht zu einer Unterversorgung des Heizsystems führen, werden die vorgegebenen Grenztemperaturen zusätzlich beschränkt. Ist das erlaubte Temperaturfenster ursprünglich $\pm 5^\circ\text{C}$, wird dem Optimierer lediglich ein Temperaturfenster von $\pm 4^\circ\text{C}$ gewährt, wodurch der Einfluss von Modellierungsungenauigkeiten lediglich zu kleinen Abweichungen der Temperatur ($< 1^\circ\text{C}$) führt und damit die Versorgungsqualität gewährleistet wird. Die engeren Temperaturgrenzen reduzieren allerdings die Freiheitsgrade des Agenten, was zu einem konservativeren und weniger kosteneffizienten Anlagenbetrieb führt.

Eine weitere Variante zum Umgang mit stochastischen externen Einflussfaktoren bietet die lineare gemischt-ganzzahlige stochastische Programmierung, also eine Erweiterung des bestehenden Modells. Hier wird die Unsicherheit hinsichtlich des Systemverhaltens in konkreten Szenarien beschrieben. Szenarien sind in diesem Zusammenhang unterschiedliche Ausprägung der übertragenen Leistung des Wärmetauschers bzw. der Wärmelast, z. B. ein Szenario mit hoher, mittlerer und niedriger Wärmeübertragung bzw. Wärmebedarf. Das Optimierungsergebnis muss im Fall der stochastischen Programmierung so gewählt werden, dass in jedem Szenario, also auch in extremen Szenarien, die Temperaturbeschränkungen eingehalten werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche finden sich in *Abbildung 22*.

Als thermische Last liegen im Beispiel die Fußboden- und die Hallenheizung vor. Diese gilt es mittels der Nutzenergiebedarfsprognose zu modellieren. Beispielhaft ist der Verlauf des thermischen Lastbedarfs der Fußbodenheizung einer Woche im Sommer in *Abbildung 20* gegeben.

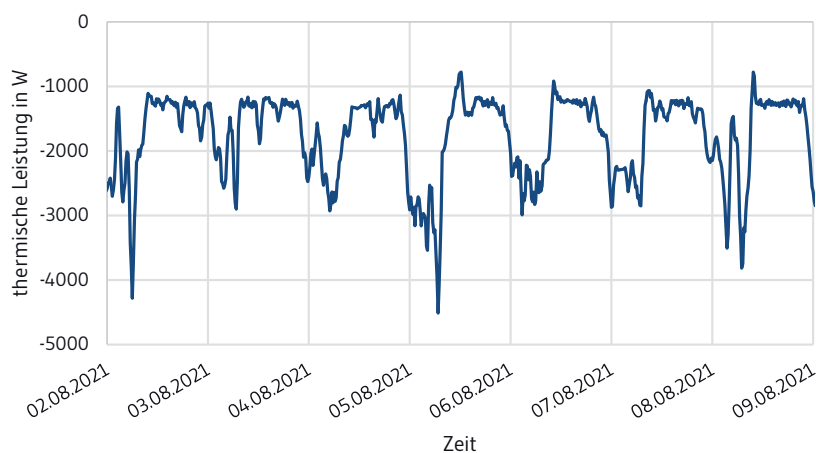


Abb. 20 Thermische Leistungsaufnahme der Fußbodenheizung in einer beispielhaften Woche im Sommer 2021

Als Prognosehorizont sind die nächsten zwölf Stunden festgelegt, wobei die zeitliche Auflösung mit steigendem Prognosehorizont sinkt. So werden für die ersten beiden Stunden Viertelstundenwerte, für die Stunden drei bis zwölf nur noch die Stundenwerte prognostiziert. Zur Modellierung wird ein Multi-Target-Modell antrainiert, das alle Prognosewerte gleichzeitig prognostiziert. Dies hat den Vorteil, dass weniger Modelle antrainiert und betrieben werden müssen. In den Arbeiten von Dietrich et al. (2020) konnte gezeigt werden, dass Multi-Target-Modelle im Vergleich zu Single-Target-Modellen eine ähnlich gute, teilweise sogar bessere Prognosegüte aufweisen.

7.2.2 Ergebnisse

Zur Freigabe der Prognosewerte wird eine REST-Schnittstelle genutzt, über die der gesamte Prognosevektor inkl. Zeitstempel im JSON-Format veröffentlicht und eingelesen werden kann. Die Inferenz des Prognosemodells dauert im Anwendungsfall durchschnittlich $0,91 \pm 0,06$ Sekunden (Mittelwert aus elf Versuchen) und liegt damit im zulässigen Bereich (< 10 Sekunden). Der Prognosefehler des Modells (nMAE) beträgt zwischen 14,8 Prozent (15 Minuten) und 26,3 Prozent (12 Stunden). Eine Darstellung der Prognosewerte einer beispielhaften Woche im Sommer 2021 findet sich in *Abbildung 21*. Als Modell wurde ein rekurrentes neuronales Netz mit einer verdeckten Schicht mit 60 LSTM-Neuronen (Long Short-Term Memory) vom Bayes-Algorithmus ausgewählt.

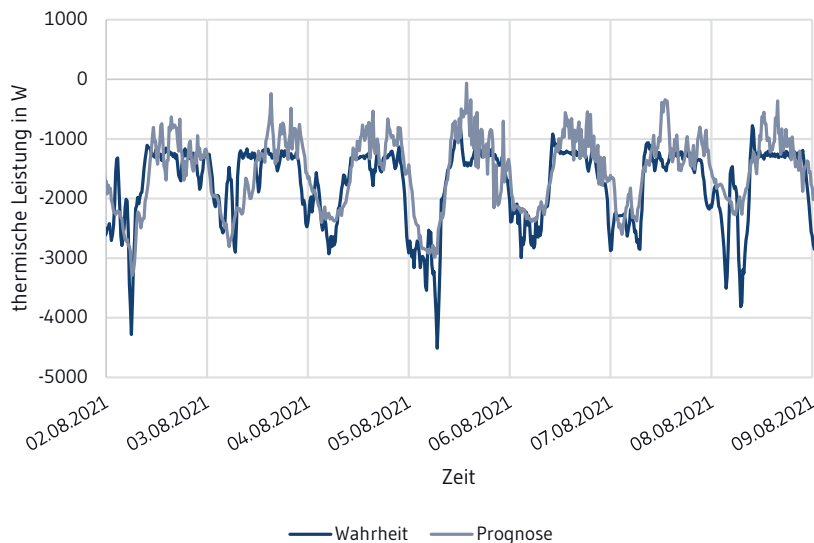


Abb. 21 Messwert und Prognose (12 Stunden) der thermischen Leistung der Fußbodenheizung in einer Woche im Sommer 2021

Die Optimierung des Anlagenbetriebs des Energiesystems der ETA-Fabrik wurde durch eine Reihe von Simulationsdurchläufen mit unterschiedlicher Parametrierung der stochastischen Parameter untersucht. Dabei wurde die deterministische Optimierung auf Basis des Erwartungswerts mit der stochastischen Programmierung verglichen. Die stochastische Programmierung wurde wiederum mit verschiedenen Extremszenarien unterschiedlicher Intensität validiert. Hierfür wurde die thermische Leistung des Wärmetauschers mit einer Leistungsschwankung von $\pm 10\%$, $\pm 20\%$, $\pm 30\%$ und $\pm 40\%$ in den jeweiligen Szenarien versehen. Anschließend wurden für jeden Versuchsdurchlauf die Kosten sowie die Anzahl an Zeitschritten mit Abweichungen von dem vorgegebenen Temperaturband ermittelt und verglichen.

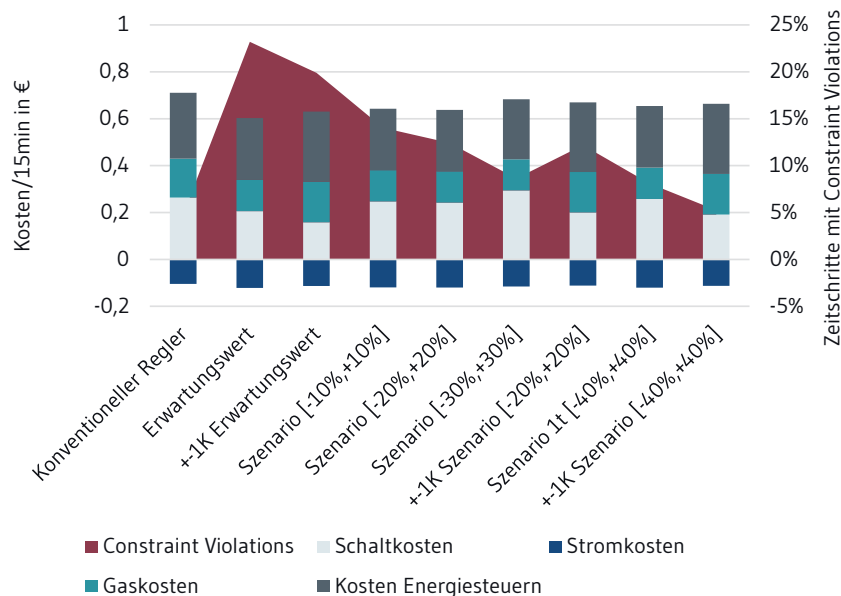


Abb. 22 Auswertung der Verletzungen der Randbedingungen (Constraint Violations) in der Simulation gegenüber den erzeugten Kosten

In *Abbildung 22* ist zu erkennen, dass die Energiekosten durch den Einsatz der stochastischen Programmierung zu insgesamt leicht höheren spezifischen Energiekosten, aber auch zu deutlich geringeren Verletzungen der Randbedingungen (Constraint Violations) führen. Diese Constraint Violations entstehen in diesem Zusammenhang nicht in dem Optimierungsmodell, sondern in dem zu optimierenden Simulationsmodell der ETA-Fabrik. Während die Energiekosten um ca. zehn Prozent steigen, konnte die Anzahl der Constraint Violations um 65 Prozent reduziert werden. Dabei ist anzumerken, dass auch durch den Einsatz der konventionellen Regelung für das Energiesystem Constraint Violations auftreten. Zudem zeigen die Ergebnisse, dass mit einer Aufweitung der Szenarien die

Anzahl an Constraint Violations abnimmt. Schlussendlich können durch die Kombination der stochastischen Programmierung mit einem engeren Temperaturbereich sowohl eine sicherere Versorgung des Wärmebedarfs als auch niedrigere Energiekosten umgesetzt werden. Die Betriebsoptimierung über den Erwartungswert führt zu den niedrigsten Energiekosten, allerdings auch zu nicht annehmbar hohen Constraint Violations.

Die Betriebsoptimierung in der ETA-Fabrik wurde über das einfacher zu implementierende, deterministische lineare gemischt-ganzzahlige Modell in Kombination mit Soft Constraints umgesetzt (Erwartungswertmodell). Dies lässt sich mit der einfacheren Implementierbarkeit des Verfahrens in die Microservice-Architektur sowie der Robustheit des Verfahrens gegenüber externen Fehlern begründen. Auf die Evaluation der Funktionsfähigkeit der geschaffenen Infrastruktur aus den Microservices zur Betriebsoptimierung, der Prognose sowie der Datenübertragung und Umsetzung auf den realen Anlagen hat die Art des verwendeten Verfahrens keinen Einfluss. Diese Funktionsfähigkeit konnte über mehrere Stunden erfolgreich demonstriert werden.

7.3 Zusammenfassung

Um Energieflexibilitätsmaßnahmen in komplexen versorgungstechnischen Systemen bewerten und umsetzen zu können, wurde in diesem Abschnitt ein Framework vorgestellt, das aus Betriebsoptimierung, Nutzenergiebedarfsprognose und Kommunikationsschnittstellen besteht. Die Betriebsoptimierung dient dabei der Berechnung einer kostenoptimalen Betriebsstrategie der Versorgungsanlagen unter Einbezug von Strompreis- und Lastprognosen sowie der aktuellen Zustände des Systems. Verschiedene Ansätze zum Umgang mit stochastischen Einflussgrößen in der Betriebsoptimierung wurden anhand eines Simulationsmodells getestet und bewertet. Das Erwartungswertmodell zeigte den geringsten Implementierungsaufwand und wurde daher am realen System der ETA-Fabrik der TU Darmstadt zur Validierung der Kommunikationsarchitektur der vorgestellten Microservices angewandt. Das betrachtete System umfasst zwei Wärmenetze und ein Stromnetz mit verschiedenen Energiewandlern und zwei Wärmeverbrauchern. Zur Wärmebedarfsprognose wird eine Machine-Learning-Pipeline verwendet, die die Hyperparameter über einen Bayes-Algorithmus berechnet.

Die Versuche zeigen, dass Betriebsoptimierung und Lastprognose am realen System über mehrere Stunden betrieben und die Anlagen nach der berechneten Betriebsstrategie geschaltet werden können. Das Framework kann daher genutzt werden, um mithilfe von Simulationsmodellen Energieflexibilitätsmaßnahmen an komplexen Versorgungssystemen zu bewerten und über die Kommunikationsschnittstellen an realen Anlagen umzusetzen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Autoren: Lindner · Weigold

Das Kapitel zeigt Werkzeuge und Anwendungsfälle für die energetische Flexibilisierung von Fabriken nach der sechsstufigen Methodik nach VDI (2021). Es wurden Werkzeuge entwickelt, die Industrieunternehmen künftig bei der Umsetzung von Energieflexibilitätsmaßnahmen unterstützen und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und ihres Praxisbezugs geprüft.

So stellen die Werkzeuge zur Energieflexibilitätspotenzialanalyse (Schnell-Check-Tool, E-Flex-Scanner, Energieflexibilitätsaudit und Flexibilitätseinsatzplanungstool) Hilfsmittel für eine erste Einschätzung und Bewertung unterschiedlicher Optionen zur energetischen Flexibilisierung der Produktion dar. Darüber hinaus wird mit der Planungsplattform ein Werkzeug zur Unterstützung der detaillierteren Konzeption und Planung von energieflexiblen Kälte- und Wärmeversorgungssystemen von Fabriken zur Verfügung gestellt.

Am Beispiel eines smarten Speicher-Wandler-Systems werden die technischen Herausforderungen und Schritte für eine Umsetzung und Implementierung von identifizierten thermischen Energieflexibilitäten am Beispiel eines Klimaraums aufgezeigt. Ein Praxisbeispiel für die operative Energieflexibilitätsvermarktung liefert die Aluminiumelektrolyse mit einem Energieflexibilitätspotenzial von $\pm 22,5$ MW. Es wird dargestellt, wie eine informationstechnische Befähigung für eine effektive Vermarktung von Energieflexibilitäten in der Industrie realisierbar ist.

Der Einsatz von Energieflexibilitätsmanagementsystemen wird am Beispiel einer Kunststoffproduktion sowie einer Automobilfabrik beschrieben. Dabei zeigt sich, dass durch den effektiven Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen die Produktionskosten maßgeblich gesenkt werden können. Der Aufbau sowie die Funktion eines energieflexiblen, optimierten Betriebs wurde abschließend am Beispiel des Wärmenetzes in der ETA-Fabrik dargestellt. Das Werkzeug kann genutzt werden, um Energieflexibilitätsmaßnahmen an komplexen Versorgungssystemen mithilfe von Simulationsmodellen zu bewerten und über die Kommunikationsschnittstellen an realen Anlagen umzusetzen.

Die erfolgreiche prototypische Anwendung der entwickelten Werkzeuge legt den Grundstein für einen niedrigrschwelligen Einstieg für Firmen bei der Energieflexibilitätsbefähigung von Fabriken. Ausblickend gilt es nun diese Werkzeuge branchenübergreifend einzusetzen, um die Umsetzung der energetischen Flexibilisierung von Fabriken in der Breite zu realisieren.

9 Literatur

- AG ENERGIEBILANZEN E. V., 2021. Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken [online]. Verfügbar unter: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2020/10/ageb_20v_v1.pdf
-
- BERGSTRA, J., R. BARDENET, Y. BENGIO und B. KÉGL, 2011. Algorithms for Hyper-Parameter Optimization [online]. In: 25th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2011): Neural Information Processing Systems Foundation [Zugriff am: 20. November 2011]. Verfügbar unter: <https://hal.inria.fr/hal-00642998/>
-
- BIANCHINI I., F. ZIMMERMAN und A. SAUER, 2019. Chancen der Industrie auf dem Energiemarkt: Strategischer Vergleich der Handelsprodukte [online]. wt Werkstattstechnik online, (110), 339–345.
-
- BIANCHINI I., F. ZIMMERMAN, K. TOROLSAN und A. SAUER, 2021. Market Options for Energy-flexible Industrial Consumers, (3rd International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (PEEE 2021)).
-
- BUNDESGESETZBLATT I, 2013. Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI). HOAI [online] [Zugriff am: 30. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/
-
- DIETRICH, B., J. WALTHER, M. WEIGOLD und E. ABELE, 2020. Machine learning based very short term load forecasting of machine tools [online]. Applied Energy, 276, 115440. ISSN 03062619. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.apenergy.2020.115440
-
- FLUM, D., D. FRANZ, M. SPORLEDER, L. THEISINGER und E. ABELE, 2020. Easer/Easer. A planning tool for energy-optimized refrigeration and heat supply systems [online]. wt Werkstattstechnik online, 110(04), 205–208. ISSN 1436-4980. Verfügbar unter: doi:10.37544/1436-4980-2020-04-39
-
- FUHLÄNDER-VÖLKER, D., M. LINDNER und M. WEIGOLD, 2021. Design Method for Building Automation Control Programs to Enable the Energetic Optimization of Industrial Supply Systems [online]. Procedia CIRP, 104, 229–234. ISSN 2212-8271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.11.039
-
- GEBHARDT, M., H. KOHL und T. STEINRÖTTER, 2002. Preisatlas: Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung. Duisburg-Rheinhausen.
-
- GRUBER, A.-M., 2017. Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien. Dissertation. München.
-
- HEIMERL, S. und B. KOHLER, 2017. Aktueller Stand der Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland [online]. Praxis Wasserkraft, (10/2017), 77–79. Praxis Wasserkraft [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: https://www.fwt.fichtner.de/userfiles/fileadmin-fwt/Publikationen/WaWi_2017_10_Heimerl_Kohler_PSKW.pdf
-
- KLEINERTZ, B., A. GRUBER, F. VEITENGRUBER, M. KOLB und S. VON ROON, 2019. Flexibility potential of industrial thermal networks through hybridization. In: 11. Internationale Energiewirtschaftstagung (IEWT), S. 1–31.
-
- KOHNE, T., H. RANZAU, N. PANTEN und M. WEIGOLD, 2020. Comparative study of algorithms for optimized control of industrial energy supply systems [online]. Energy Informatics, 3(S1), 1–19. ISSN 2520-8942. Verfügbar unter: doi:10.1186/s42162-020-00115-7
-
- KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2021. E-Flex-Scanner [online]. 14. März 2022 [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/e-flex-scanner>

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2022a. Flexibilitätseinsatzplanungstool [online]. 14. März 2022 [Zugriff am: 14. März 2022]. Verfügbar unter: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/flexibilitaetseinsatzplanungstool>

KOPERNIKUS-PROJEKT SYNERGIE, 2022b. Schnell-Check-Tool [online]. 10. März 2022 [Zugriff am: 10. März 2022]. Verfügbar unter: <https://schnell-check.synergie-projekt.de/Home>

MATTHES, P., M. FLACH, S. SCHMIED, J. TEICHMANN, D. MÜLLER, F. GLÜCK, J. OPPERMAN, P. MATHIS, T. KNAPP, A. KÜMPEL und M. BARANSKI, 2019. Zukünftige hydraulische Systeme für die Verteilung von Wärme und Kälte in modernen neuen oder sanierten Gebäuden mit unterschiedlichen Abnehmern und Erzeugern. Gemeinschaftlicher Abschlussbericht über alle Teilprojekte.

MODELICA ASSOCIATION, 2020. Functional Mock-up Interface for Model Exchange and Co-Simulation 2.0.2 [online]. Verfügbar unter: <https://github.com/modelica/fmi-standard/releases/download/v2.0.2/FMI-Specification-2.0.2.pdf>

MOOG, D., F. BORST und M. WEIGOLD, 2021. Modulare Simulation bei der energieorientierten Planung industrieller Heiz- und Kühlsysteme. In: J. Franke und P. Schuderer, Hg. Simulation in Produktion und Logistik. Göttingen: Cuvillier, S. 51–60. ISBN 978-3-7369-7479-1.

PANTEN, N., 2019. Deep Reinforcement Learning zur Betriebsoptimierung hybrider industrieller Energienetze [online]. Dissertation. Aachen: Shaker. Innovation Fertigungstechnik.

PANTEN, N., H. RANZAU, T. KOHNE, D. MOOG, E. ABELE und M. WEIGOLD, 2020. Simulation und Optimierung kombiniert. Werkstattstechnik online, 110(1/2), 12–17. Werkstattstechnik online.

RÉHAULT, N., M. DANG, M. MITTERHOFER, S. STRATBÜCKER und G. BENNDORF, 2017. Planung, Auslegung und Betriebsoptimierung von energieeffizienten Neu- und Bestandsbauten durch Modellierung und Simulation auf Basis von Bauwerkinformationsmodellen (EnEff-BIM).

SEIFERMANN, S., E. ABELE, A. SAUER und et al., 2019. Internationaler ETG-Kongress 2019. S. 191–196.

SIEPMANN, D. und N. GRAEF, 2016. Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: A. Roth, Hg. Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin: Springer Gabler, S. 17–82. ISBN 978-3-662-48505-7.

STEURER, M., 2017. Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Forschungsbericht. Stuttgart.

STROBEL, N., D. FUHLÄNDER-VÖLKER, M. WEIGOLD und E. ABELE, 2020. Quantifying the Demand Response Potential of Inherent Energy Storages in Production Systems [online]. Energies, 13(16), 4161. Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13164161

TRISTÁN, A., F. HEUBERGER und A. SAUER, 2020. A Methodology to Systematically Identify and Characterize Energy Flexibility Measures in Industrial Systems [online]. Energies, 13(22), 5887. Energies. Verfügbar unter: doi:10.3390/en13225887

VDI, Hg., 2021. Energieflexibel in die Zukunft – Wie Fabriken zum Gelingen der Energiewende beitragen können. Unter Mitarbeit von A. Bachmann, L. Bank, C. Bark, D. Bauer, B. Blöchl et al. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. Verfügbar unter: doi:10.24406/FIT-N-638765

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e.V. (VDI). VDI 2073:2014, Hydraulik in Anlagen der Technischen Gebäudeausrüstung. Hydraulische Schaltungen. Berlin: Beuth.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e.V. (VDI). VDI 5200:2011, Fabrikplanung. Planungsvorgehen. Berlin: Beuth.

VDI 5207, Blatt 1: Energieflexible Fabrik – Grundlagen. 2020.

VDI 5207, Blatt 2: Energieflexible Fabrik – Identifikation und technische Bewertung. 2021.

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE e.V. (VDI). VDI 6018:2018, Kälteversorgung in der technischen Gebäudeausrüstung Planung, Bau, Betrieb. Berlin: Beuth.

WALSER, T. und A. SAUER, 2021. Typical load profile-supported convolutional neural network for short-term load forecasting in the industrial sector [online]. Energy and AI, 5, 100104. ISSN 26665468. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.egyai.2021.100104

WIRTH, R. und J. HIPPEL, 1998. CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining. In: AAAI Press und Editor: Rakesh Agrawal, Paul Stolorz, Hg. Proceedings of the Fourth International Conference on the Practical Application of Knowledge Discovery and Data Mining, S. 29–39.

Impressum

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970 1241
kopernikus-synergie@eep.uni-stuttgart.de
www.kopernikus-projekte.de
www.synergie-projekt.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar

ISBN (Printausgabe): 978-3-8396-1778-6

DOI (kostenlose PDF-Version): <https://doi.org/10.24406/publica-258>

Koordination: Sara Gail und Lena Hitzenberger

Gestaltung: PTW, TU Darmstadt

Druck und Weiterverarbeitung: Elanders, Waiblingen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2022

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

verlag@fraunhofer.de

www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung

der angewandten Forschung e.V.

Hansastraße 27 c

80686 München

www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Zum Inhalt

Energie aus erneuerbaren Ressourcen ist nicht immer beliebig verfügbar. Je nach Jahreszeit und Witterung variiert beispielsweise die durch Photovoltaik oder Windkraft zur Verfügung gestellte Leistung. Durch den kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien wird sich die Volatilität im Energiesystem in Zukunft immer stärker ausprägen.

Die Industrie auf die sich ändernden Versorgungsstrukturen vorzubereiten und anzupassen, ist eine große Herausforderung der nächsten Jahre. Unternehmen müssen zukünftig ihre Prozesse und Betriebsorganisation so gestalten können, dass sich der Energieverbrauch zumindest in Teilen flexibel an das volatile Energieangebot anpassen kann – ein Paradigmenwechsel weg vom kontinuierlichen und rein nachfragegetrie-

benen Energieverbrauch hin zum anpassbaren, energieflexiblen Betrieb. Neben der Entwicklung von Technologien, Konzepten und Maßnahmen zur energetischen Flexibilisierung von industriellen Prozessen liegt ein zweiter Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten auf der Entwicklung einer durchgängigen IT-Infrastruktur, mit der Unternehmen und Energieanbieter in Zukunft Energieflexibilität bestmöglich einsetzen können.

Dieses Nachschlagewerk zeigt die Herausforderungen und Rahmenbedingungen von energieflexiblen Fabriken sowie Managementsysteme und Technologien für deren Realisierung. Es baut auf den wichtigsten Ergebnissen der Forschung im Rahmen der zweiten Phase des Kopernikus-Projekts SynErgie auf.



© Fraunhofer IPA/Rainer Bez

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP), Universität Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA



© Björn Seitz-kontender.Fotografie

Prof. Dr. Hans Ulrich Buhl

Kernkompetenzzentrum Finanz- & Informationsmanagement (FIM) und Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer FIT (FIM/FIT)



© alexlevay

Prof. Alexander Mitsos, Ph.D.

Aachener Verfahrenstechnik, RWTH Aachen University und IEK-10 (Energy Systems Engineering), Forschungszentrum Jülich



© PTW/S. Scheibner

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold,

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW), Technische Universität Darmstadt

ISBN 978-3-8396-1778-6



9 783839 617786

© Titelbild: Schott AG

Fraunhofer Verlag