



Fortschreibung gewerblicher Lastprofile und Quantifizierung regionalisierter Lastflexibilisierungspotenziale

Fachgebiet Energie- und Ressourcenmanagement

Stephan Seim, Till Böckmann, Johannes Kochems, Joachim Müller-Kirchenbauer
08.09.2021

Inhaltsverzeichnis

-  Herausforderungen der Energiewende
-  Forschungslücke
-  Methodik und Durchführung
-  Ergebnisse je Modul
-  Limitationen, Verbesserungsmöglichkeiten und Ausblick
-  Fazit

Herausforderungen der Energiewende

Steigende Energieeffizienzen und Anteile erneuerbarer Energien im deutschen Stromsystem bedingen den Bedarf nach technologiespezifischen Lastprofilen und Nachfrageflexibilisierung.



Lastprofile

- Veränderter Strombedarf je Technologie bedingt verändertes Summenlastprofil²

-
- Technologiespezifische Lastprofile: Verständnis von Effizienzsteigerungen und Flexibilisierungspotenzialen³
 - Endabnehmerspezifische Profile: Planung der Transformation von Versorgungs- zu Verteilnetzen⁴



Lastflexibilisierung

- Bisher: Lastfolgebetrieb der Kraftwerke. Heute: Flexibilitätsoptionen benötigt⁵
- Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) birgt Potenzial⁶, Höhe lässt sich bisher nur grob approximieren

-
- Höhe des Potenzials: Unternehmen, Politik, Netzbetreiber, Stromnetzausbau, Reservekapazitäten⁷
 - Potenziale schwanken zeitabhängig

Forschungslücke

Es bestehen zwei wesentliche Forschungslücken, die miteinander in Beziehung stehen.



Fortschreibung der Lastprofile

- Langfristige Fortschreibung des Stromverbrauchs meist fokussiert auf Jahresstromverbräuche einzelner Querschnittstechnologien oder Sektoren¹
- Die zeitliche Verteilung des Stromverbrauchs i.F.v. Lastprofilen wird kaum fortgeschrieben. Selbst aktuelle gewerbliche und industrielle Lastprofile sind kaum öffentlich verfügbar.^{2, 3}
- Die Ergebnisse bestehender Ansätze sind nicht öffentlich verfügbar^{4, 5}

Lücke: Fortschreibung branchen- und technologie-spezifische Lastprofile des deutschen GHD Sektors



Nachfrageflexibilisierung

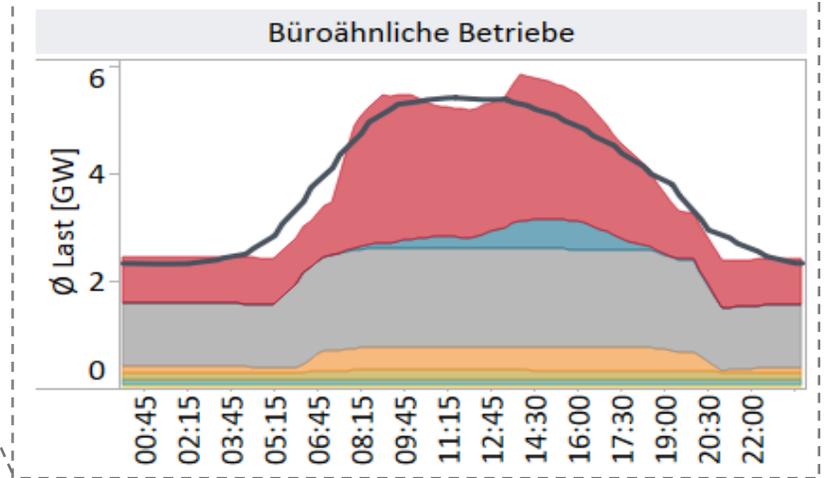
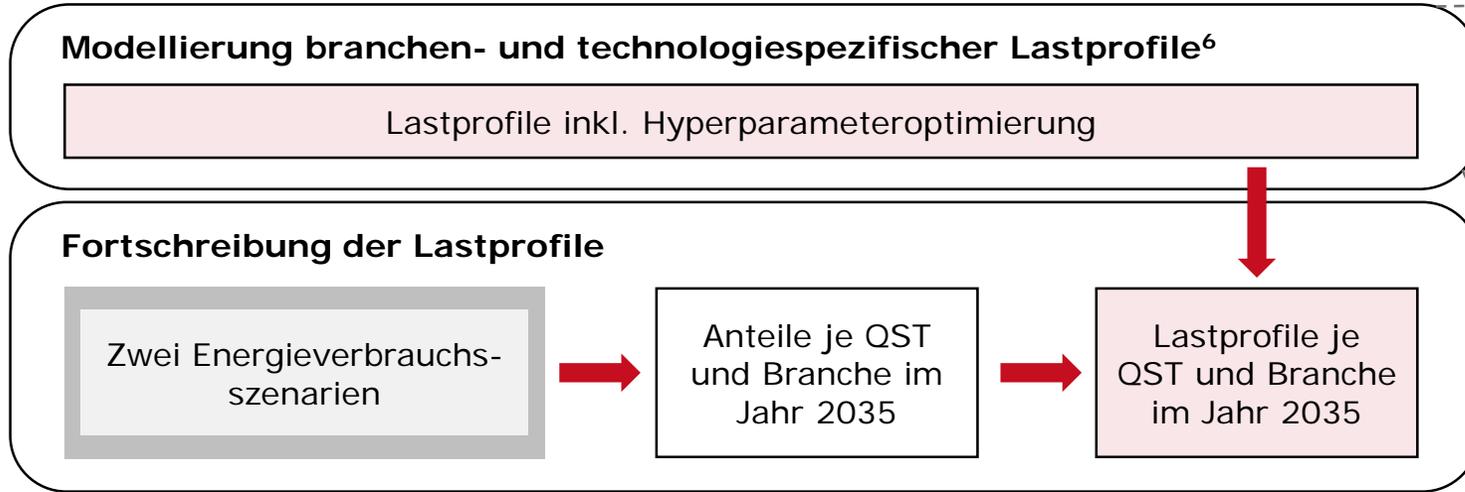
- Bisherige Veröffentlichungen zeitlicher Potenziale: Aggregierte Betrachtung des GHD-Sektors⁶
- Bislang keine vollständigen Zeitverfügbarkeitszeitreihen veröffentlicht und in 50% aller Veröffentlichungen berücksichtigt⁷
- Überschätzte schaltbare Lasten überschätzt⁸, da häufig installierte Leistung⁹ oder saisonale Annahmen⁸ als Maximallast modelliert werden.

Lücke: zeitlich aufgelöste Flexibilisierungspotenziale je Branche und Technologie des Sektors GHD



Fortschreibung der modellierten Lastprofile

Bestehende Energieverbrauchsszenarien der Literatur helfen dabei, die Lastprofile fortzuschreiben.



Basisszenario

- Nach Pfluger, Tersteegen und Franke (2017b): Langfristszenarien⁵
- Energie- und klimapolitische Ziele werden zu möglichst geringen Kosten erreicht
- Effizienzsteigerungen bestimmt von 15–20 % Diskontierungsrate

Referenzszenario

- Nach Pfluger, Tersteegen und Franke (2017b): Langfristszenarien⁴
- Auslaufen der Energiewende, explorativ und hypothetisch
- Politischer Stillstand – Effizienzsteigerungen bestimmt von 35 % Diskontierungsrate

Vergleich ausgewählter Energieverbrauchsszenarien

Verbrauchsebene	Technologie- & Branchenanteile separat	Technologieanteile je Branche
Endenergie	✓ ¹	–
Nutzenergie	–	✓ ²
Strom	✓ ³	–

Quantifizierung der Nachfrageflexibilisierungspotenziale im Jahr 2018 und 2035

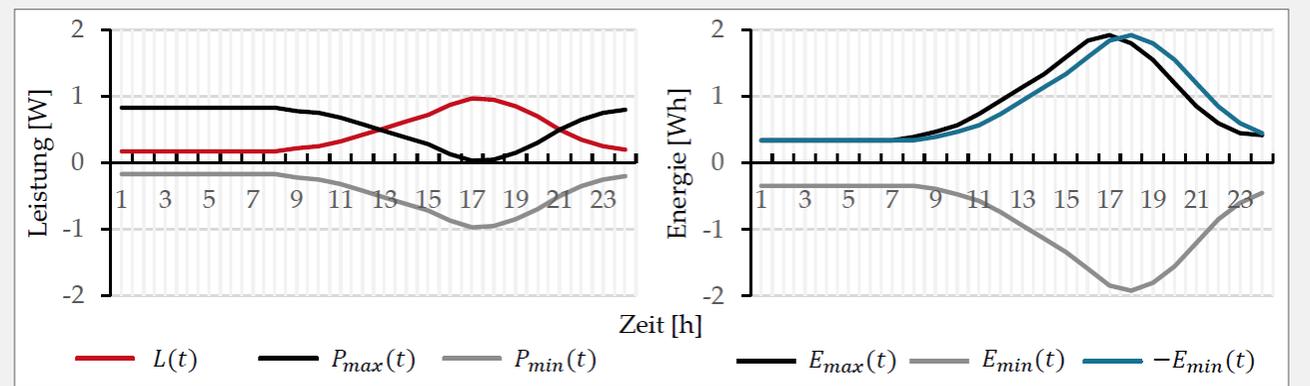
Die Bestimmung der Potenziale profitiert von detaillierten Informationen zu Verfügbarkeiten aus aktuellen und fortgeschriebenen Lastprofilen.



- Leistungsparameter: Grundsätzliche Eignung zur Flexibilisierung und schaltbare Lasten
- Zeitparameter: Schalt- und Verschiebedauern
- Erstmals eingeführt: Zeitraum, in dem die Maximallast bestimmt wird

Ansatz nach Kleinhans (2014)

Δt_q	Verschiebedauer	[s]
$L_q(t)$	Geplante Last der Anwendung q	[W]
$\Lambda_q(t)$	Maximallast der Anwendung q	[W]
$P^q(t)$	Schaltbare Last der Anwendung q	[W]
$E^q(t)$	Verschiebbare Energiemenge der Anwendung q	[Wh]



Fortgeschriebene Lastprofile im Jahr 2035

Effizienzsteigerungen und Veränderungen der Nachfrage führen zu leicht veränderten Verbrauchscharakteristiken.

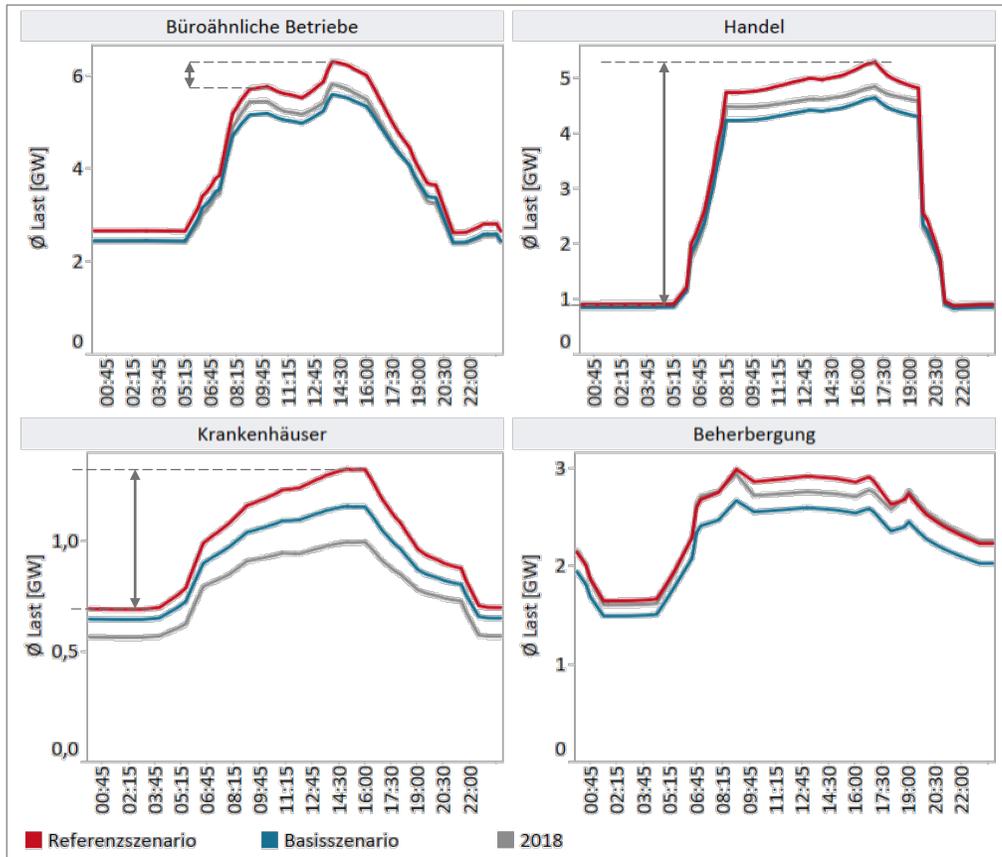


Abbildung: Lastprofil im Jahr 2035 je Branche und Szenario

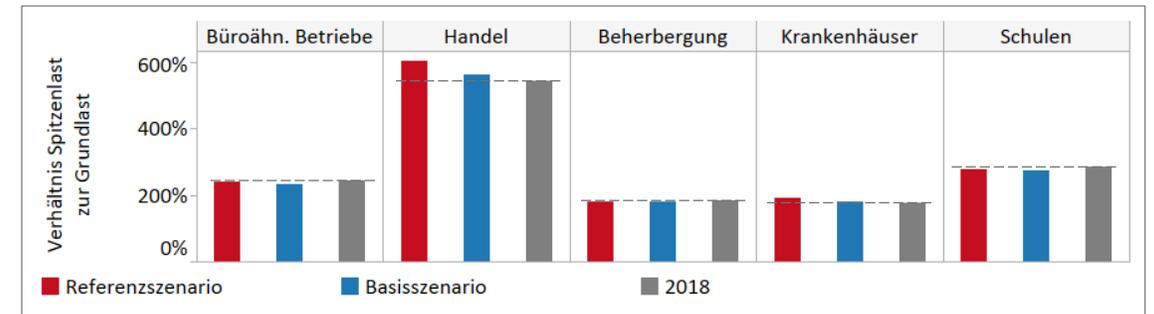


Abbildung: Das Verhältnis der Spitzenlast zur Grundlast in den modellierten Szenarien im Vergleich mit dem Jahr 2018

Tabelle: Modellierungsannahmen der Szenarien

	Beleuchtung	IKT
Referenzszenario	↓	↑
Basisszenario	↓	↑

Nachfrageflexibilisierungspotenziale im Jahr 2035

Die quantifizierten Potenziale passen gut zu den Literaturwerten. Insgesamt umfasst der vorliegende Ansatz ca. 74% aller flexibilisierbaren Lasten des Sektors GHD.

Abbildung: Lasterhöhungs- und Lastverringierungspotenziale

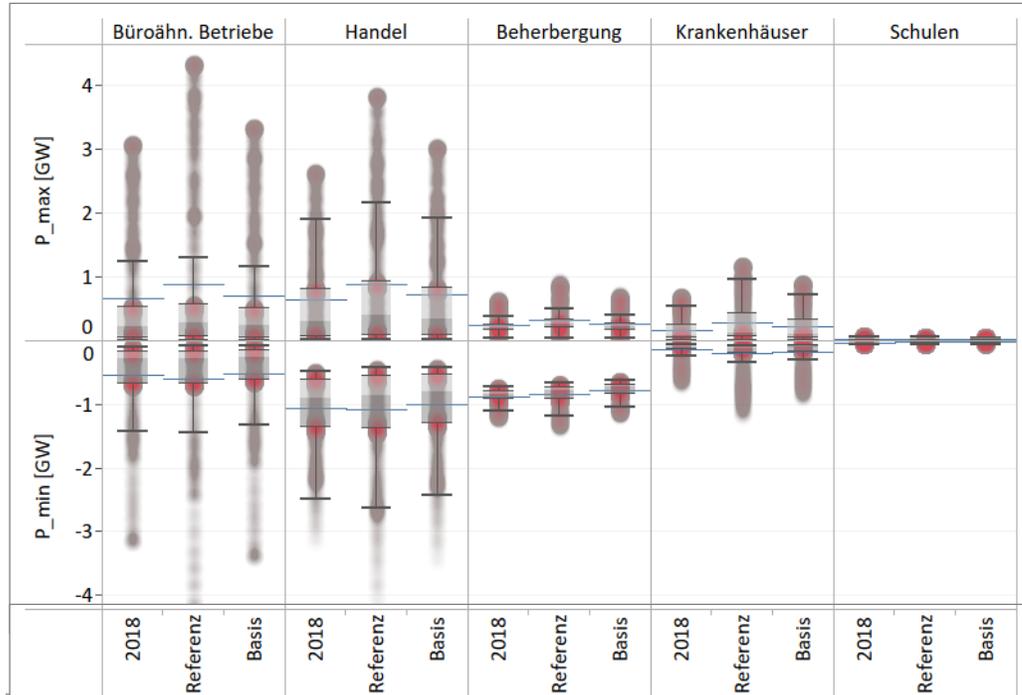


Tabelle: Potenzial je Anwendungskategorie

	Diese Arbeit	Kochems (2020)
Ø	80 – 970 MW	≪ 1000 MW ¹
Max	1.700 – 2.400 MW	≤ 3000 MW ¹

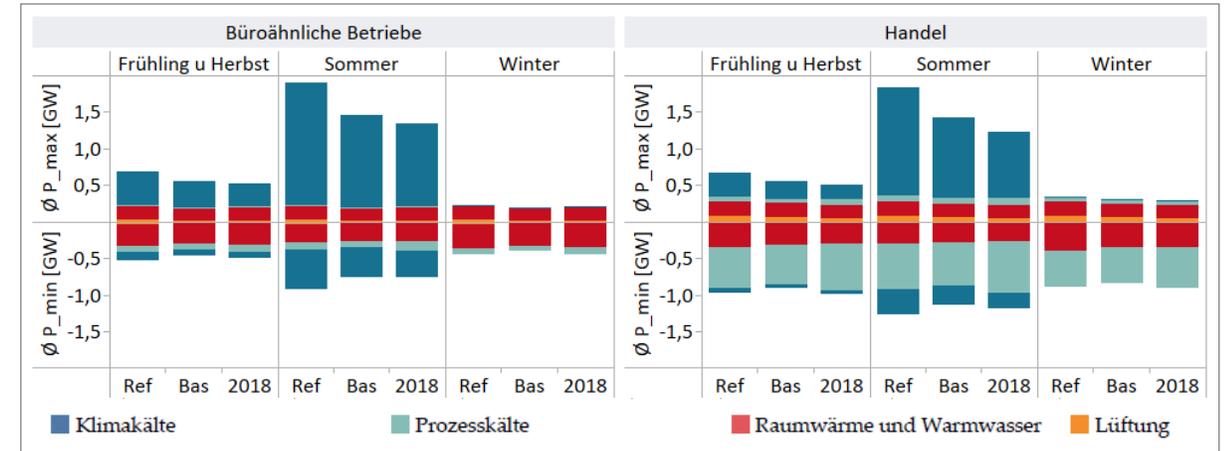


Abbildung: Technologiespezifische Lasterhöhungs- und Lastverringierungspotenziale

- Kochems (2020): Symmetrische Potenziale, Nachtspeicherheizung und Klimakälte mehr Lasterhöhungspotenzial¹
- Diese Arbeit: Klimakälte und Lüftung: Mehr Lasterhöhungspotenzial; Rest: Mehr Lastverringierungspotenzial
- Heitkoetter u.a. (2020): Insgesamt im Sektor GHD mehr Lastverringierungspotenzial²

Räumlich aufgelöste Flexibilisierungspotenziale im Basisszenario

Die identifizierten Lastflexibilisierungspotenziale stechen in Regionen hoher Bevölkerungsdichte hervor. Aufgrund der flächenspezifischen Betrachtung lassen sich auch kleinere urbane Zentren gut erkennen.

Hervorstechende urbane Zentren

- Berlin, Hamburg, München, Frankfurt a.M., Köln, Stuttgart und Düsseldorf

Darstellung absoluter und flächenspezifischer Potenziale der Lastflexibilisierung (P_{max} , P_{min}) sowie der verschiebbaren Energiemengen (E_{max} , E_{min})



Zukünftiges Zusammenbringen regionalisierter Flexibilitätspotenziale mit Informationen zu

- Netzengpässen und Netzausbaupfaden, etwa aus dem NEP Strom
- regionalisierter Erzeugung fluktuierender erneuerbarer Energien und Strompreisinformationen

→ Bestimmung wirtschaftlicher Lastverschiebungspotenziale

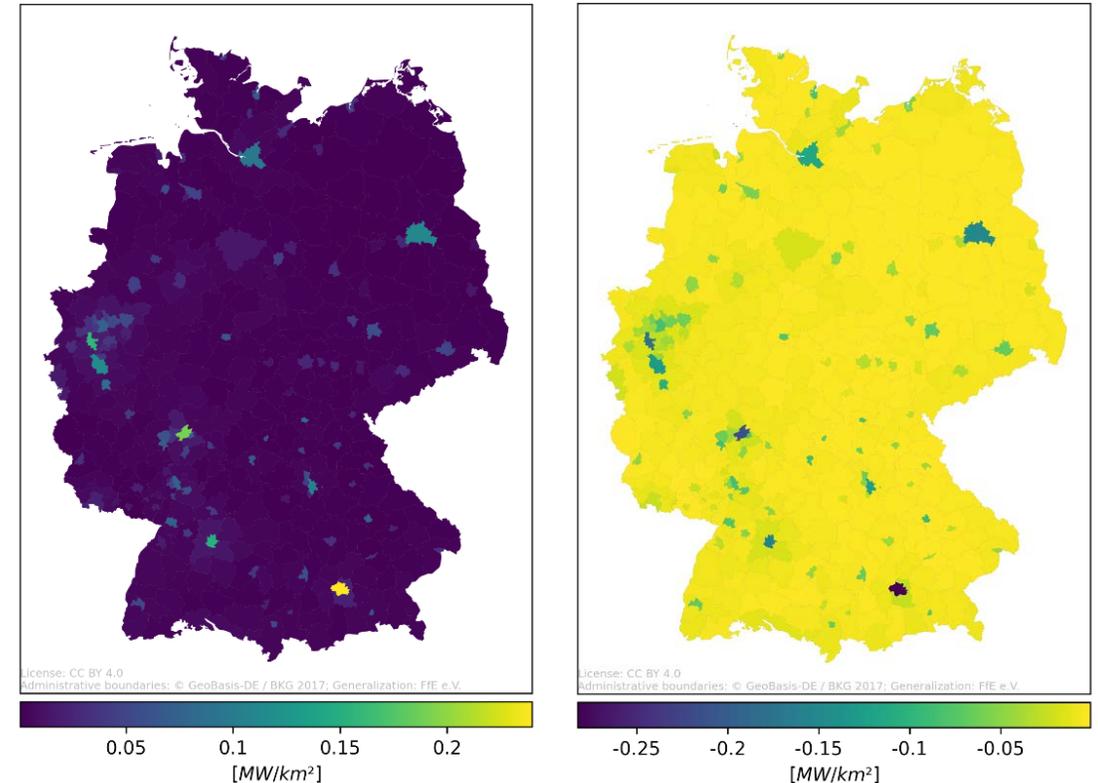


Abbildung: Durchschnittliches flächenspezifisches Lastflexibilisierungspotenzial (links: P_{max} , rechts: P_{min}) je Landkreis des Basisszenarios, Abbildung erstellt mithilfe von [1]

Zeitlich aufgelöste Flexibilisierungspotenziale im Basisszenario

Die Prozesskälte des Handels und Raumwärme, Warmwasser sowie Lüftung der Krankenhäuser und der Beherbergung bieten die zeitlich stabilsten Potenziale.

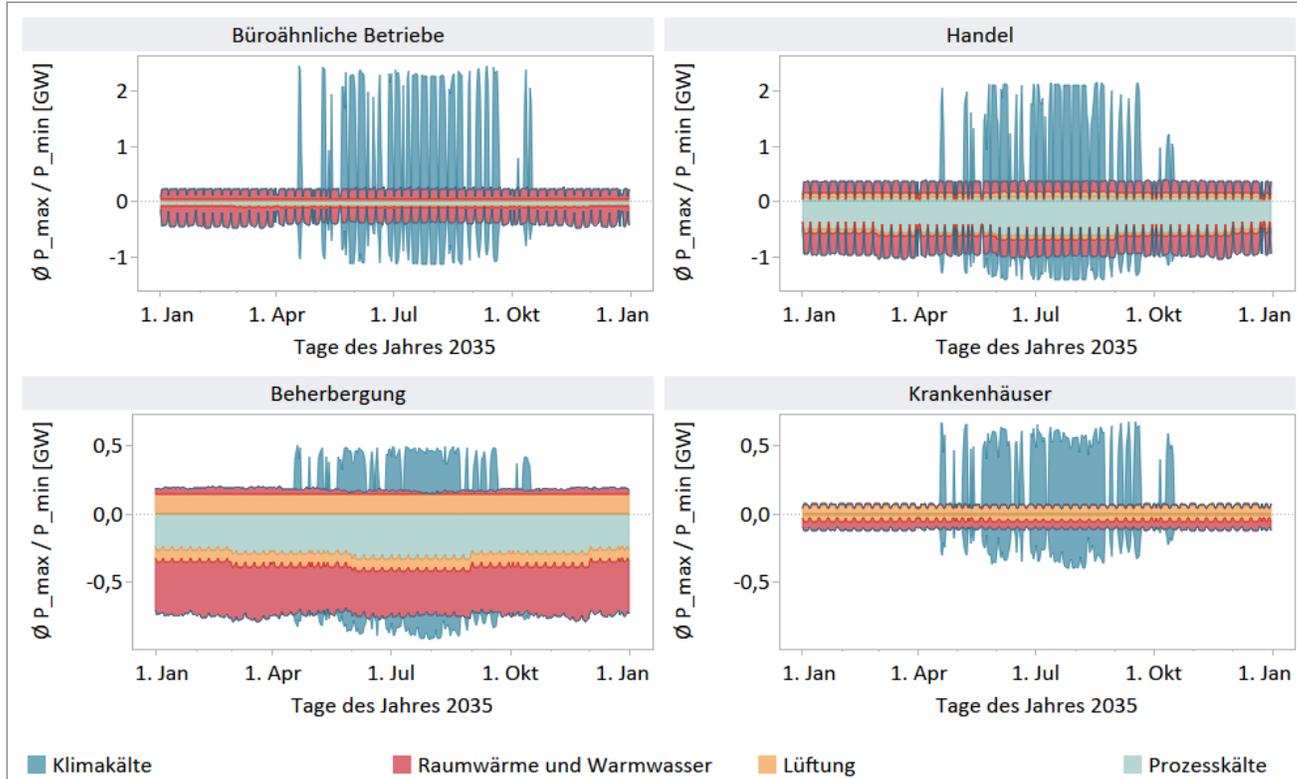


Abbildung: Tageweise durchschnittliche Lasterhöhungs- und Lastverringierungspotenziale

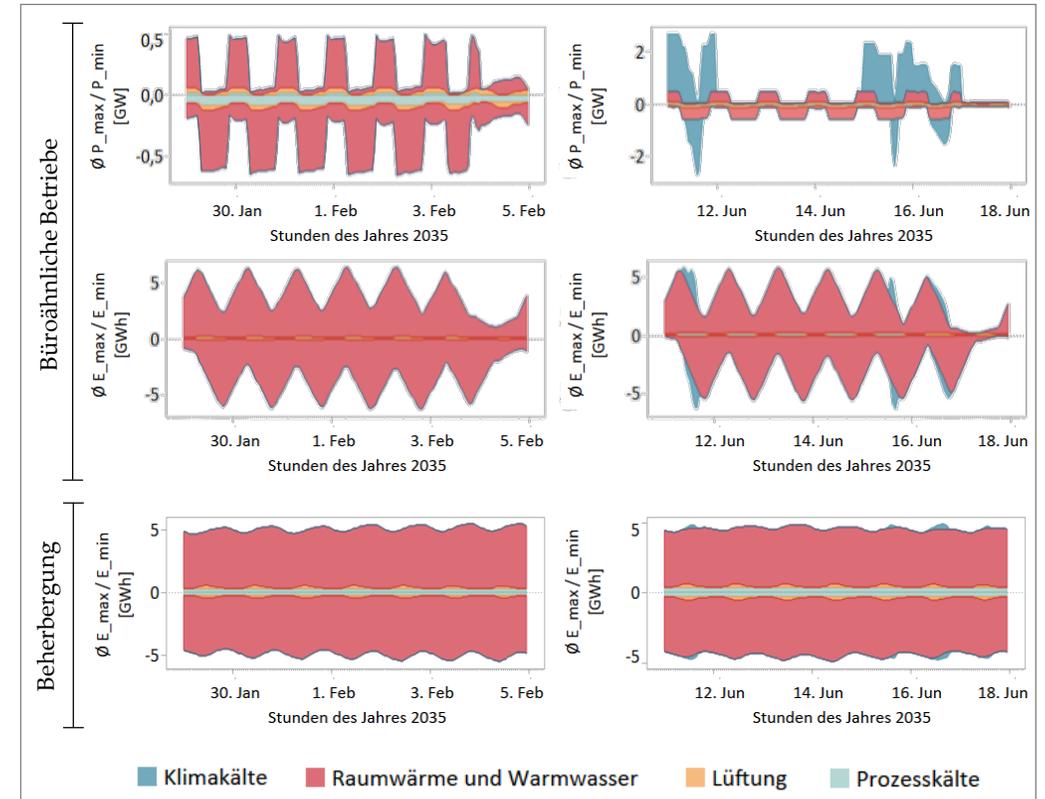
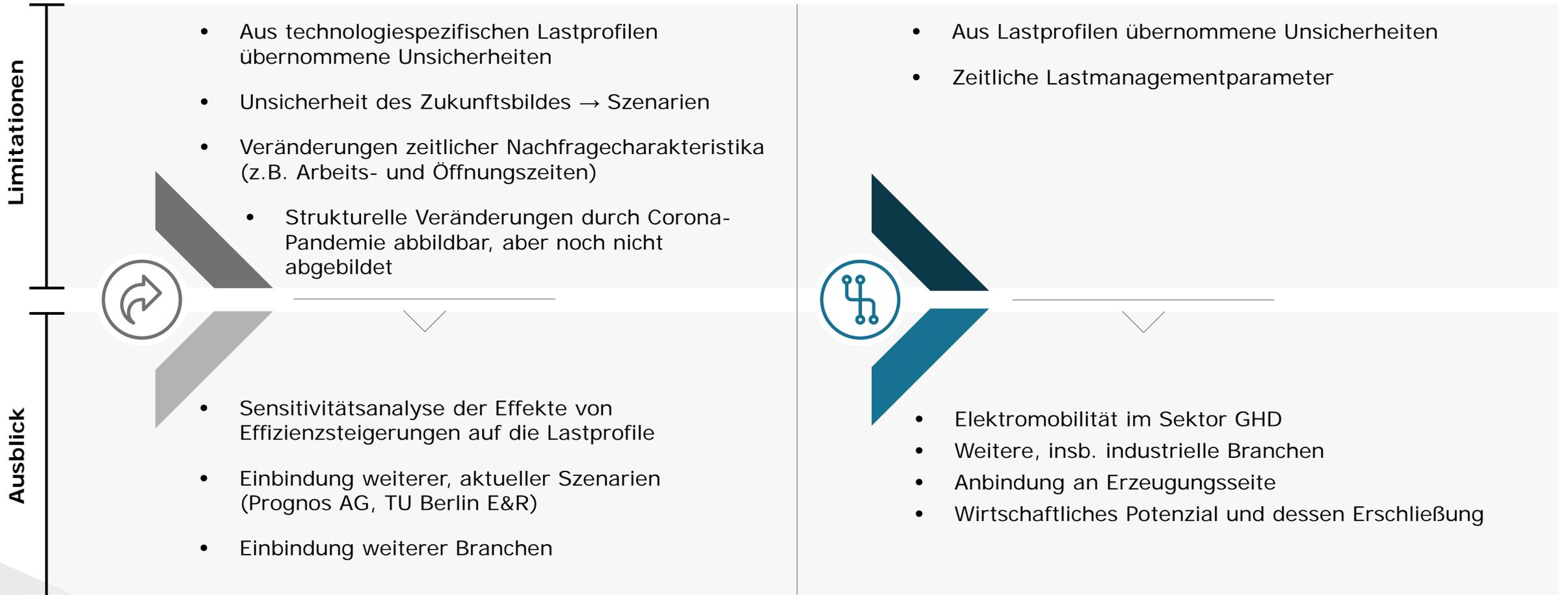


Abbildung: Stundenweise durchschnittliche Lasterhöhungs- und Lastverringierungspotenziale sowie verschiebbare Energiemengen

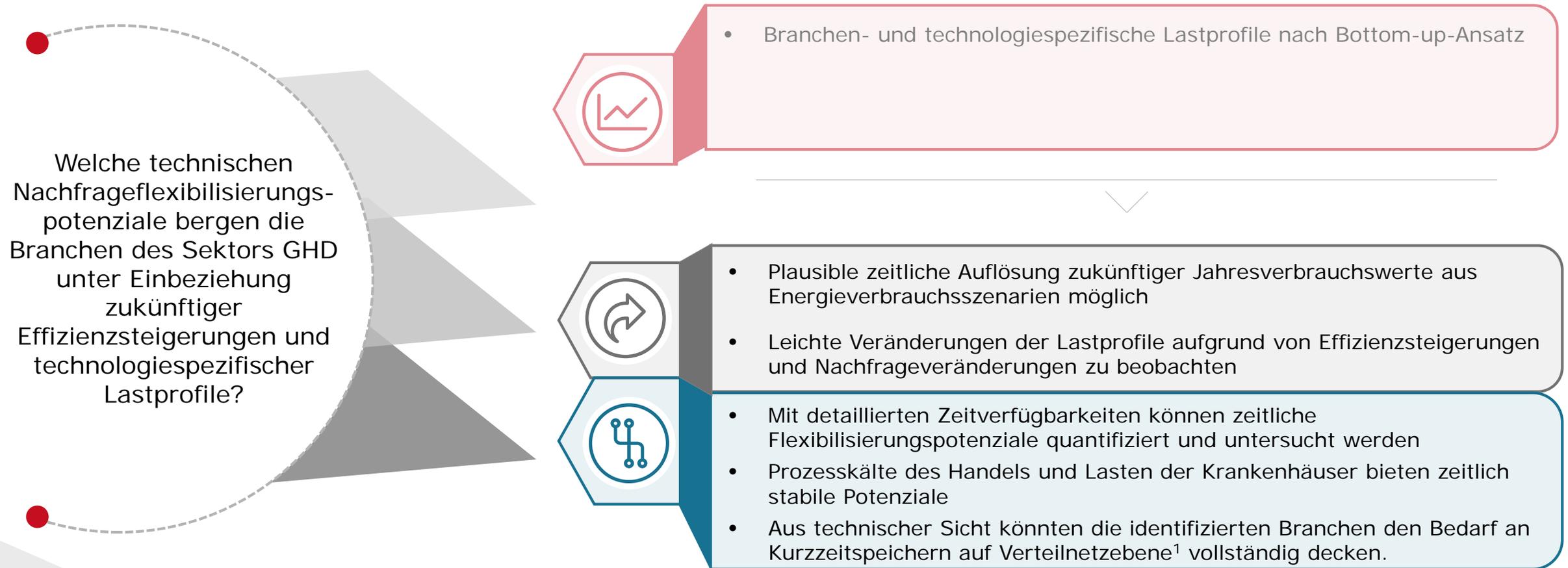
Limitationen, Verbesserungsmöglichkeiten und Ausblick

Die vorliegenden Ansätze der Fortschreibung und der Lastflexibilisierungspotenzialermittlung bieten Möglichkeiten der Weiterentwicklung



Fazit

Potenzialanalysen und weitere Anwendungen profitieren von branchen- und technologiespezifischen Lastprofilen.



Abkürzungsverzeichnis

AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.
BLP	Branchenlastprofil
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
QST	Querschnittstechnologien
SLP	Standardlastprofile
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V.

Literaturverzeichnis (1/3)

Boßmann, T. (2015). „The contribution of electricity consumers to peak shaving and the integration of renewable energy sources by means of demand response“. Diss. Karlsruher Institut für Technologie. isbn: 978-3-8396-0919-4. url: [http : / / publica . fraunhofer . de / eprints/urn_nbn_de_0011-n-3601777.pdf](http://publications.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3601777.pdf) (besucht am 09. 11. 2020).

Böckmann, T. u. a. (2021). Ingenieurwissenschaftliche Modellierung branchen- und technologiespezifischer Lastprofile des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD). Präsentation und Conference Paper, IEWT 2021

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2010). Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. url: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiekonzept-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (besucht am 20. 11. 2020)

Deutsche Energie-Agentur (dena) (2016b). Roadmap Demand Side Management. Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem. Schlussfolgerungen aus dem Pilotprojekt DSM Bayern. Techn. Ber. url: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9146_Studie_Roadmap_Demand_Side_Management..pdf (besucht am 06. 01. 2021).

Dickert, J. (2015). „Synthese von Zeitreihen elektrischer Lasten basierend auf technischen und sozialen Kennzahlen“. Diss. Technische Universität Dresden. url: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-204629> (besucht am 16. 11. 2020).

Elstrand, R. u. a. (2016). Netzentwicklungsplan Strom. Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile - Begleitgutachten (Study on behalf of the distribution network operators). Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe.

Gils, H. C. (2015). „Balancing of intermittent renewable power generation by demand response and thermal energy storage“. Diss. Universität Stuttgart. doi: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-6888>. url: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/6905> (besucht am 27. 11. 2020).

Gotzens, F. u. a. (2020). DemandRegio - Harmonisierung und Entwicklung von Verfahren zur regionalen und zeitlichen Auflösung von Energienachfragen. Forschungsber. Berlin, Jülich, München. doi: <https://doi.org/10.34805/ffe-119-20>. url: https://www.er.tuberlin.de/fileadmin/a38331300/Dateien/DemandRegio_Abschlussbericht.pdf (besucht am 15. 01. 2021).

Heitkoetter, W. u. a. (2020). „Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset“. In: arXiv preprint arXiv:2009.05122. url: <https://arxiv.org/pdf/2009.05122.pdf> (besucht am 21. 11. 2020).

Literaturverzeichnis (2/3)

HTW Berlin (n.d). Links zu Lastprofilen und Wetterdaten [WWW Document]. URL <https://pvspeicher.htw-berlin.de/daten-und-simulation-links/>

Jakob, M., Kallio, S. und Boßmann, T. (2014). „Generating electricity demand-side load profiles of the tertiary sector for selected European countries“. In: Proceedings of 8th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'14). url: https://www.researchgate.net/publication/280111552_Generating_electricity_demandside_load_profiles_of_the_tertiary_sector_for_selected_European_countries (besucht am 16. 11. 2020).

Kleinhans, D. (2014). „Towards a systematic characterization of the potential of demand side management“. In: arXiv preprint arXiv:1401.4121. url: <https://arxiv.org/pdf/1401.4121.pdf> (besucht am 21. 11. 2020).

Klobasa, M. (2007). „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“. Diss. ETH Zurich. doi: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005484330>. url: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/150146/1/eth-29926-01.pdf> (besucht am 22. 11. 2020).

Kochems, J. (2020). „Lastflexibilisierungspotentiale in Deutschland – Bestandsaufnahme und Entwicklungsprojektionen“. In: Symposium Energieinnovation, Graz. Technische Universität Berlin. url: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/lf/Session_E5/553_LF_Kochems.pdf (besucht am 09. 11. 2020).

Ladwig, T. (2018). „Demand Side Management in Deutschland zur Systemintegration erneuerbarer Energien“. Diss. Technische Universität Dresden. isbn: 978-3-86780-569-8. url: <https://d-nb.info/1163200646/34> (besucht am 21. 11. 2020).

Prehofer, S. (n.d.). Analyse „Lastprofilwandel“ - Kopernikus-Projekt „ENavi“ [WWW Document]. URL http://www.zirius.eu/projects/enavi_lastprofilwandel_res4.htm#res4 (accessed 3.12.21).

Schellong, W. (2016). Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen. Springer Vieweg. isbn: 978-3-662-48527-9. doi: 10.1007/978-3-662-49463-9.

Schlomann, B., Steinbach, J. u. a. (2013). Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010. Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Forschungsber. Karlsruhe, München, Nürnberg. url: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/sondererhebung-zur-nutzung-erneuerbarer-energien-im-gdh-sektor-2011-2013.html> (besucht am 09. 11. 2020).

Literaturverzeichnis (3/3)

Schlomann, B., Wohlfarth, K. u. a. (2015). Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Forschungsber. Karlsruhe, München, Nürnberg. url: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccx/2015/Schlussbericht-GHD_2006-2013_Februar2015.pdf (besucht am 09. 11. 2020).

Seim, S. u. a. (2019). „Die Datenlandschaft der Deutschen Energiewirtschaft“. In: Working Paper Energie und Ressourcen im Rahmen des BMWi-Forschungsprojektes DemandRegio (Förderkennzeichen: 03ET4040C), Technische Universität Berlin. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3556720>. url: https://www.er.tu-berlin.de/fileadmin/a38331300/Dateien/Seim__Verwiebe__Blech__Gerwin__M%C3%BCller_-_Kirchenbauer__2019_-_Die_Datenlandschaft_der_dt_Energiewirtschaft__FG_E_R__TU_Berlin . Pdf (besucht am 23. 11. 2020).

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2008). Klassifikation der Wirtschaftszweige. url: <https://www.destatis.de/static/DE/dokumente/klassifikation-wz-2008-3100100089004.pdf> (besucht am 09. 11. 2020).

Verwiebe, P. u. a. (2020). DemandRegio - Disaggregator. DemandRegioTeam. Zugegriffen: Jan. 14, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/DemandRegioTeam/disaggregator>

Verwiebe, P. u. a. (2021). Modelling final energy demand – A systematic literature review. E&R Working Paper <https://doi.org/10.5281/ZENODO.4610502>

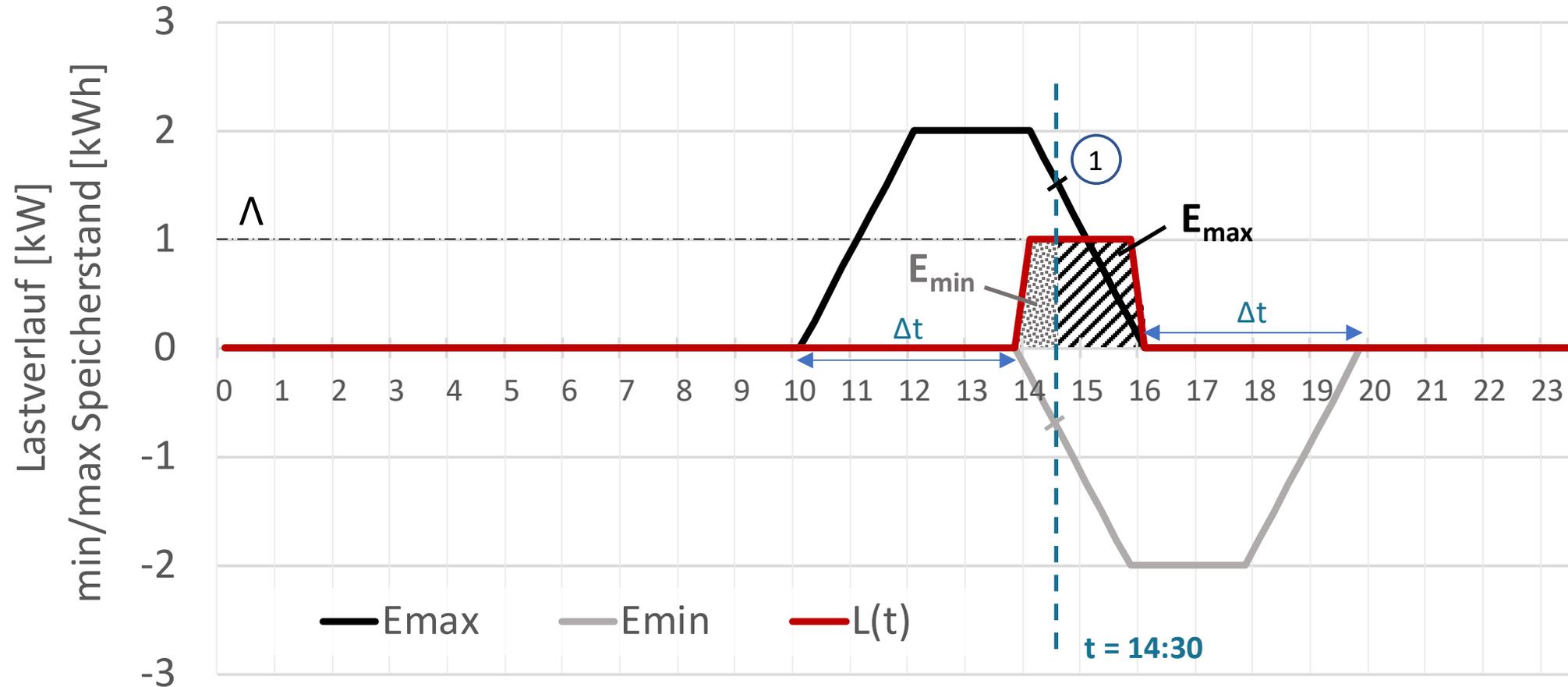
Wietschel, M., Fleiter, T. und Hirzel, S. (2011). „Modellierung der Energienachfrage - der wesentliche Baustein für zukünftige Energieszenarien“. In: Energieszenarien - Konstruktion, Bewertung und Wirkung – „Anbieter“ und „Nachfrager“ im Dialog, S. 41–52. url: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000021684> (besucht am 19. 11. 2020).

Backup



Quantifizierung der Nachfrageflexibilisierungspotenziale

Die rote Linie stellt den geplanten Lastverlauf einer Anwendung dar, die zeitabhängig innerhalb der Grenzen Λ (=Maximallast) und 0 (=Minimallast) variiert werden kann. Im Beispiel wird eine geplante Last von 1 kW von 14:00 bis 16:00 Uhr ausgewiesen.



Rahmenannahmen der Energieverbrauchsszenarien

Tabelle A.5: Steigerung des Anteils der Energiebezugsfläche an der Gesamtfläche des Sektors GHD zwischen 2018 und 2035. Eigene Berechnung mit Werten aus Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 64

Branche nach Destatis, (2008)	47	55	63	6471	86	85	84
Anteilssteigerung	2,04%	0,11%	0,10%	0,10%	0,78%	-0,42%	-1,49%

Tabelle A.6: Zuordnung der Anwendungen nach Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 68 zu Querschnittstechnologien für Stillstands- und Normativszenario

Anwendung nach Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 68		Querschnittstechnologie
Beleuchtung	⇒	Beleuchtung
Straßenbeleuchtung	⇒	-
IKT Büro + Datacenter	⇒	IuK
Lüftung	⇒	Mechanische Energie
Klimatisierung	⇒	Klimakälte
Umwälzpumpen	⇒	Mechanische Energie
Aufzüge	⇒	Mechanische Energie
Weitere Gebäudestromverbraucher	⇒	-
Kochen	⇒	Prozesswärme
Waschen	⇒	Mechanische Energie
Kühl- und Gefriergeräte	⇒	Prozesskälte

^a Weitere Gebäudestromverbraucher umfassen nach Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 65 Gebäudeautomation, Steuerungsgeräte, Umwälzpumpen und Hilfsaggregate.

Tabelle A.7: Vergleich ausgewählter Rahmenannahmen des Stillstands-, Normativ- und Explorativszenarios

	Stillstandsszenario	Normativszenario
Energiepreise	Steigend ^a	Steigend ^a
Beschäftigte	+2 % (2010–2050) ^c	+2 % (2010–2050) ^c
Energiebezugsfläche	+15% (2010–2050) ^c	+15 % (2010–2050) ^c
Effizienzsteigerungen	Minimal: Autonomes Lernen (0,5%/a bis 1%/a); maximal: Technische Entwicklung bis 4 %/a zwischen 2010 und 2020); Entwicklung in Korridor bestimmt implizite Diskontierungsrate von 35 % ^c	Minimal: Autonomes Lernen (0,5 %/a bis 1 %/a); maximal: Technische Entwicklung ,5 %/a bis 4 %/a zwischen 2010 und 2020); Entwicklung in Korridor bestimmt implizite Diskontierungsrate von 15-20 %; zusätzlicher Abbau aller weiteren Hemmnisse; nach 2030 verminderte Effizienzsteigerungen ^d

^a Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 130.

^c Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 64.

^d Pfluger, Tersteegen und Franke, (2017b), S. 64, 70.

Kumulierte Lastflexibilisierungspotenziale aller Branchen und Vergleich mit der Literatur

Tabelle: Extrem- und Mittelwerte der über die fünf Branchen kumulierten Lastverschiebungspotenziale der Branchen büroähnlicher Betriebe, Handel, Beherbergung, Krankenhäuser und Schulen

		P_{max} [GW]	P_{min} [GW]	E_{max} [GWh]	E_{min} [GWh]
2018	Max/Min	7,12	-7,79	21,62	-22,04
	Mittelwert	1,72	-2,66	14,39	-14,38
Basis-szenario	Max/Min	8,04	-8,33	20,86	-22,12
	Mittelwert	1,90	-2,50	13,87	-13,85
Referenz-szenario	Max/Min	10,34	-10,38	22,98	-25,56
	Mittelwert	2,38	-2,78	15,31	-15,30

Tabelle: Vergleich branchen- und technologiespezifischer Lastflexibilisierungspotenziale des vorliegenden Ansatzes mit Klobasa (2007)

		Extremwerte P_{max} / P_{min} [MW]	
		Klobasa (2007)	Dieser Artikel (2018)
Prozess-kälte	Handel	±200-685	+255 / -428
	Büro	±1.750	±2.541
Klima-kälte	Handel	±2.800	±1.785
	Beherbergung	±420	±437