

# Systemnutzen durch Lastflexibilisierung elektrischer Heizsysteme

Jochen Conrad, Simon Greif und Jan Weißflog

In Szenarien mit hohen Anteilen wärmegeführter, elektrischer Heizsysteme nimmt die Volatilität der elektrischen Last zu. Darüber hinaus steigt mit zunehmenden Anteilen erneuerbarer Energien die negative Residuallast und bei fehlender Flexibilität die abgeregelte Energiemenge. Der flexible Einsatz elektrischer Heizsysteme, welcher durch eine Optimierung bestimmt wird, erhöht den Systemnutzen. Diese setzt sich aus der Integration erneuerbarer Energien, der Reduktion der maximalen Residuallast sowie deren Glättung zusammen.

## Motivation und Ziel

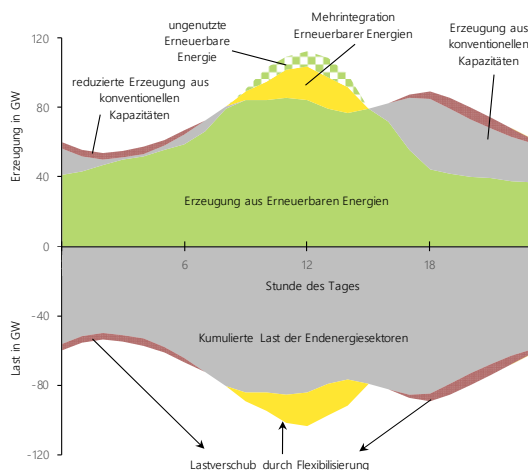
In Klimaschutzszenarien werden für die Zukunft oftmals eine flächendeckende Elektrifizierung und hohe Anteile erneuerbarer Energien (EE) an der Stromerzeugung angenommen (vgl. [1], [2] und [3]). Erfolgt diese Elektrifizierung weiterhin ungesteuert, ergeben sich zwei systemische Herausforderungen. Zum einen steigt die maximale Residuallast, welche durch regelbare und witterungsunabhängige Erzeugungskapazitäten bereitgestellt werden muss. Zum anderen muss die Stromerzeugung von EE-Anlagen in zunehmendem Maße abgeregelt werden, sobald diese die Last übersteigt.

Um diese Abregelung zu reduzieren, steht eine Vielzahl an Optionen zur Verfügung. Eine ist die flexible Steuerung elektrischer Lasten, wie die von Heizsystemen (auch Demand Side Management genannt). Die Funktionsweise der Lastverschiebung ist in

dargestellt. Dabei wird die Stromerzeugung durch positive Werte und die Last durch negative Werte abgebildet.

Durch die vermiedene Abregelung von EE-Anlagen – in

gelb dargestellt – lassen sich die Einsatzzeiten von Kraftwerken, welche mit fossilen Brennstoffen befeuert werden sowie der notwendige EE-Ausbau reduzieren. Darüber hinaus sinken die Kosten im Bereitstellungssektor, da dieser in geringerem Umfang Flexibilität bereitstellen muss. Dem stehen, wie in [4] beschrieben, Kosten auf Seiten der Flexibilitätsbereitstellung entgegen. Die Reduktion des Ausbaubedarfs erneuerbarer Energien kann zudem die gesellschaftliche Akzeptanz der Energiewende fördern.



---

Abbildung 1: Visualisierung der flexiblen Last und der Mehrintegration von erneuerbaren Energien am Beispiel eines sonnenreichen Tages im Jahr 2030

## Szenariorahmen

In dieser Untersuchung wird ein bestehendes Klimaschutzszenario für das Jahr 2030 verwendet. Diesem liegen ein Ausbau an EE in Höhe von 460 TWh und ein Stromverbrauch inkl. Netzverluste von 569 TWh zugrunde. Die Leistung der EE setzt sich aus 91 GW Photovoltaik (PV), 93 GW Onshore Windenergieanlagen (WEA), 20 GW WEA-Offshore, 6 GW Biomasse sowie 3 GW Laufwasser zusammen. Die Last ist zu 36 % auf die Industrie, jeweils 27 % auf die privaten Haushalte und GHD und 10 % auf den Verkehr zurückzuführen.

Anhand des Sektormodells der privaten Haushalte, welches im Rahmen des Projekts Dynamis [5] entwickelt wurde, lassen sich die Entwicklung des Gebäudebestandes und der zugehörigen Heizsysteme für den Zeitraum von 2020 bis 2050 für verschiedene Szenarien simulieren. Für diese Untersuchung wird daraus das Mengengerüst des Jahres 2030 erstellt. Hierbei werden 32 repräsentative Typgebäude aus vier Gebäudetypen, vier Baualterklassen und drei Sanierungszuständen abgebildet. Für jedes dieser Typgebäude wurden die stündlich aufgelösten Wärmebedarfe mittels TRNSYS simuliert und in Summe mit statistischen Werten kalibriert (vgl. [6] und [3]).

In diesem Zusammenhang werden die folgenden elektrischen Heizsysteme untersucht: Luft- und Erdwärmepumpen, elektrische Speicherheizungen sowie Heizstäbe in Kombination mit Gas- oder Biomassekesseln. Zur Entkopplung von Wärmebedarf und -erzeugung nutzen die elektrischen Wärmepumpen und die Heizstabkombinationen einen Wasserspeicher, wohingegen die elektrischen Speicherheizungen spezielle Speichersteine verwenden. Im Jahr 2030 werden im betrachteten Szenario 15 Mio. von insgesamt 38 Mio. Wohneinheiten mit elektrischen Heizsystemen versorgt. Davon werden 11 Mio. als flexibel steuerbar angenommen. Von diesen Wohneinheiten sind 6,2 Mio. mit Luftwärmepumpen, 3,2 Mio. mit Erdwärmepumpen 0,6 Mio. mit elektrischen Speicherheizungen und 1,1 Mio. mit einem zusätzlichen Heizstab ausgestattet.

Die Dimensionierung der Heizsysteme erfolgt in Abhängigkeit des Wärmebedarfs jedes Typgebäudes. Die installierte Leistung der Wärmepumpe ergibt sich aus der maximal benötigten elektrischen Leistung im unflexiblen Fall. Diese wird über eine stündlich aufgelöste Leistungszahl nach [7] und dem Wärmebedarfslastgang unter Berücksichtigung von Verteilverlusten in Höhe von 14 % berechnet. Die Elektrospeicherheizungen werden als Einzelraumgeräte angenommen. Für deren Auslegung wird der Raumwärmebedarf eines Typgebäudes auf verschiedene Räume aufgeteilt. Die am Tag des höchsten Raumwärmebedarfs benötigte Wärmeenergie plus Sicherheitsaufschlag von 20 % entspricht der Speicherkapazität der jeweiligen elektrischen Speicherheizung. Über die Annahme einer achtstündigen Freigabezeit ergibt sich daraus die elektrische Leistung pro Gerät bzw. Raum. Der Heizstab wird auf die halbe Heiznennleistung des Gas- oder Biomassekessels dimensioniert. Diese wiederum entspricht der maximal benötigten Wärmeleistung mit einem Sicherheitsaufschlag von 50 %. Die Pufferspeicherkapazitäten für den Heizstab sowie die Wärmepumpe werden nach [8] über die Heiznennleistung berechnet. Die Speicherverluste werden in Abhängigkeit des Speicherfüllstands prozentual berücksichtigt.

## Lastflexibilisierung

Die Steuerung der elektrischen Heizsysteme muss einem Signal folgen, welches die oben beschriebenen systemischen Effekte adressiert. Der Strompreis kann lediglich für marginale Laständerungen oder iterative Berechnungen verwendet werden. Aus diesem Grund wird die Residuallast herangezogen. Die Residuallast wird in diesem Zusammenhang definiert als die gesamte Stromlast inkl. flexibler Lastgänge elektrischer Heizsysteme abzüglich der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Nicht berücksichtigt werden Im- und Exporte, Stromspeicher und alternative Flexibilitätsoptionen.

Durch Veränderung des Lastbezugs kann der Verlauf der Residuallast beeinflusst werden. Ausgehend vom wärmegeführten Einsatz kann sowohl eine Lasterhöhung als auch eine Lastreduktion erfolgen. Zu Zeiten negativer Residuallast soll die Last erhöht und zu Zeiten hoher positiver Residuallast nach Möglichkeit reduziert werden. Dieser Einsatz lässt sich mithilfe eines Optimierungsproblems beschreiben. Das theoretische Optimum ist ein über das gesamte Jahr konstanter Residuallastverlauf. Dieser kann nur bei ausreichender Flexibilität, in Form einer saisonalen Speicherkapazität sowie installierter Heizsystemleistung, erreicht werden. Im untersuchten Szenario ist dieser Wert größer Null, sodass für die Deckung der restlichen Residuallast fossil befeuerte Kraftwerke betrieben werden müssen.

Zur Erreichung der Zielsetzung wird die Summe der quadratischen Residuallast im Betrachtungszeitraum minimiert. Durch das Quadrieren der stündlichen Residuallast werden Werte mit großer Abweichung vom konstanten Optimum stärker gewichtet. Dies verstärkt die Priorität den Strombezug zu Zeiten hoher Residuallast zu vermeiden und zu Zeiten niedriger Residuallast zu erhöhen. Um die Komplexität des Optimierungsproblems zu reduzieren, wird der Einsatz der Heizsysteme nicht mittels globaler Optimierung, sondern separat je Gebäudekategorie und Heizsystem ermittelt. Für jede weitere Kombination aus Gebäudekategorie und Heizsystem wird die Residuallast der vorangegangenen Simulationsläufe verwendet. Der optimierte Stromlastgang eines Heizsystems in einem Typgebäude wird mit der Anzahl der sich in dieser Kategorie befindlichen Gebäude multipliziert.

Es wird angenommen, dass die Luft- und Erdwärmepumpen sowie die elektrischen Speicherheizungen monovalent – also ohne zweiten Wärmeerzeuger – betrieben werden. Der Heizstab hingegen wird bivalent eingesetzt – also als Kombination zu einem bestehenden Gas- oder Biomassekessel. Dies erhöht dessen Flexibilität, da der Heizkessel den Wärmebedarf auch als alleiniges Heizsystem decken kann. Er wird dementsprechend nur dann eingesetzt, wenn es zur Erreichung einer optimalen Lösung also einer glatten Residuallast beiträgt.

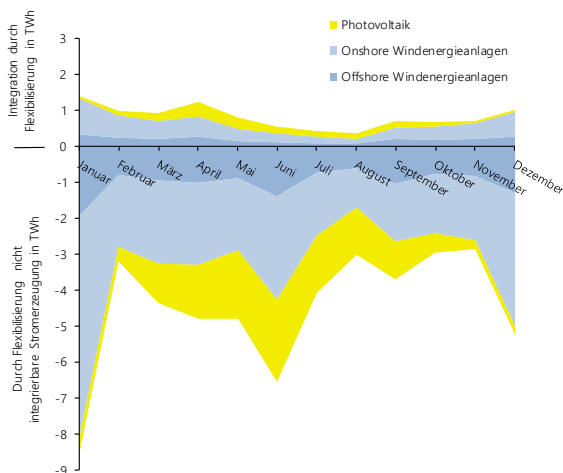


Abbildung 2: Integration erneuerbarer Energien durch Flexibilisierung elektrischer Heizsysteme

## Ergebnisse

Die Flexibilisierung elektrischer Heizsysteme kann die Integration erneuerbarer Energien erhöhen und die maximale Residuallast reduzieren.

### Mehrintegration erneuerbarer Energien

Über das gesamte Jahr 2030 können insgesamt 9,7 TWh Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mehr integriert werden, welche andernfalls durch alternative Flexibilitätsoptionen adressiert oder abgeregelt werden würde. Im Folgenden wird diese vereinfacht als Überschuss oder abgeregelt Energie bezeichnet. Der flexible Betrieb elektrischer Heizsysteme führt im Vergleich zum unflexiblen Betrieb zu einem

Mehrstromverbrauch in Höhe von 6,4 TWh. Dies liegt an einem häufigeren Einsatz des Heizstabs, wodurch 1,6 TWh Gas und 1,0 TWh Holz weniger verbrannt werden sowie den höheren Verlusten der Wärmespeicher. Da für den betrachteten Fall keine standardisierte Reihenfolge zur Abregelung von EE-Stromerzeugungstechnologien existiert, wird angenommen, dass diese entsprechend der Zusammensetzung der stündlichen Stromerzeugung erfolgt. Wird der Strom in einer Stunde mit geringer Last beispielsweise überwiegend aus Windkraftanlagen bereitgestellt, dann werden auch größtenteils WEA abgeregelt. Auf diese Weise kann die Abregelung nach EE-Technologien differenziert werden. In Abb. 2 sind die monatlichen Energiemengen der Mehrintegration (oberhalb der Abszisse) und die trotz Flexibilisierung abgeregelt Energie je Technologie (unterhalb der Abszisse) dargestellt.

Die Abregelung ohne Flexibilisierung beträgt 54 TWh/a, wovon 9,7 TWh/a durch die Steuerung der Heizsysteme integriert werden können. Die Mehrintegration der EE-Stromerzeugung je Monat beträgt zwischen 0,4 TWh im August und 1,4 TWh im Januar. Unter den getroffenen Annahmen kann durch die Flexibilisierung der Heizsysteme monatlich maximal ein Anteil von 31 % (Februar) der abgeregelt Energie integriert werden. Im gesamten Jahr 2030 beträgt der Anteil der integrierbaren Energie 18 %. Die Mehrintegration ist unter den beschriebenen Rahmenbedingungen in erster Linie durch die Kapazität der Wärmespeicher limitiert, da in allen Monaten sowohl ungenutzter EE-Überschuss sowie Wärmebedarf vorhanden ist. In Summe über das Jahr ergibt sich folgende Zusammensetzung der mehr integrierten EE-Stromerzeugung: 54 % Onshore-WEA, 23 % Offshore-WEA und 23 % PV-Anlagen. Dieses Ergebnis ist auf die vergleichsweise hohe jährliche Stromerzeugung aus Onshore-WEA zurückzuführen. Sie beträgt 207 TWh und dominiert im Vergleich zu jeweils 88 TWh für Offshore-WEA und PV die gesamte Stromerzeugung in dem beschriebenen Szenario im Jahr 2030.

Unterhalb der Abszisse lassen sich die Charakteristika der verschiedenen EE-Technologien erkennen. Der Überschuss aus Offshore-WEA ist wie deren Erzeugung gleichmäßig über das Jahr verteilt. Die Überschüsse aus Onshore-WEA machen die größten Anteile aus, was insbesondere an den Wintermonaten Dezember und Januar zu erkennen ist. Dies ist auf die saisonale Verteilung der Windgeschwindigkeit sowie die Verwendung des konkreten Wetterjahres 2012 zurückzuführen. In Gelb ist das saisonale Profil der PV-Anlagen mit maximalem Überschuss in den Sommermonaten und minimalem Überschuss in den Wintermonaten erkennbar.

### **Reduktion der maximalen Residuallast**

Die maximale Residuallast muss durch die regelbare und witterungsunabhängige Erzeugungskapazität bereitgestellt werden. Je höher sie ist, desto mehr Kosten verursacht die Vorhaltung dieser Kapazität. Durch die Flexibilisierung elektrischer Heizsysteme kann sie von 92 GW auf 85 GW reduziert werden.

Die Maximallast hingegen ist kein geeigneter Parameter zur Beurteilung dieser Erzeugungskapazität. Die Verschiebung der elektrischen Last in Zeiten hoher EE-Stromerzeugung kann, im Rahmen der beschriebenen Methodik, zu einer Erhöhung der Maximallast führen.

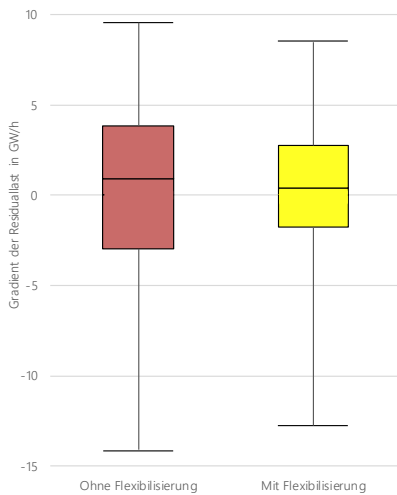


Abbildung 3: Boxplot – Gradienten der Residuallast ohne und mit Flexibilisierung elektrischer Heizsysteme

### Glättung der Residuallast

Eine volatile Residuallast muss durch flexible steuerbare Anlagen gedeckt werden. Fossil betriebene Kraftwerke sind in ihren Gradienten beschränkt und können mit konstanterer Last effizienter betrieben werden. Um die Glättung der Residuallast bewerten zu können, wird der Gradient der Residuallast bzw. deren Änderung je Stunde betrachtet. In

sind die Stundenwerte des Jahres 2030 für das Szenario ohne Flexibilisierung (links) und das Szenario mit Flexibilisierung (rechts) durch einen Boxplot visualisiert. Die Box repräsentiert die Hälfte der Werte. Sie wird unten durch das 25 %-Quantil und oben durch das 75 %-Quantil begrenzt. Der Median entspricht der Linie innerhalb der Box. Die Antennen des Boxplots stellen das 2,5 %-Quantil sowie das 97,5 %-Quantil dar und zeigen den Wertebereich, in dem sich 95 % der Residuallastgradienten befinden.

Ohne Flexibilisierung liegt das 25 %-Quantil bei -2,9 GW/h und das 75 %-Quantil bei 3,8 GW/h, wobei der Median bei 0,89 GW/h liegt. Durch die Flexibilisierung der elektrischen Heizsysteme wird die Residuallast geglättet, wodurch sich die Gradienten reduzieren. Im Ergebnis reduziert sich der Interquartilsabstand von 6,8 GW/h auf 4,5 GW/h. Das 25 %-Quantil bzw. 75 %-Quantil liegen bei -1,8 GW/h bzw. 2,7 GW/h. Der Median der Residuallastgradienten mit Flexibilisierung ist 0,38 GW/h.

### Fazit und Ausblick

Die implementierte Lastverschiebung elektrischer Heizsysteme kann im betrachteten Szenario 9,7 TWh/a EE-Stromerzeugung integrieren. Zudem wurde die maximale Residuallast von 92 GW auf 85 GW gesenkt und die Gradienten der Residuallast reduziert. Damit wurden die eingangs formulierten Ziele erfüllt. Eine potenzielle Reduktion des Netzausbaubedarfs sollte Bestandteil weiterführender Untersuchungen sein. Auch eine Variation der Annahmen ist eine sinnvolle Erweiterung der Analyse. Insbesondere die Wärmespeicherkapazität der Wärmepumpe und des Heizstabs stellt einen limitierenden Faktor für das Flexibilitätspotenzial dar. Ein größerer Warmwasserspeicher führt zu einer Reduktion der Abregelung von erneuerbaren Energien bei gleichzeitiger Zunahme der Speicherverluste. Im Gegensatz dazu erscheint eine Erhöhung der Kapazität der elektrischen Speicherheizungen aufgrund des rückläufigen Anlagenbestands unplausibel. Eine Weiterführung der Untersuchungen erfolgt in dem Projekt intelligente Wärme München [9].

Eine mögliche Erweiterung der vorgestellten Methodik stellt die sektorübergreifende Optimierung dar. In diesem Zusammenhang wird der Einsatz der elektrischen Heizsysteme und der Anlagen des Bereitstellungssektors gemeinsam optimiert.

### Quellen

- [1] dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Zwischenfazit Impulse und Erkenntnisse aus dem Studienprozess. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2017.
- [2] Gebert, P. et al.: Klimapfade für Deutschland. München: The Boston Consulting Group (BCG), prognos, 2018.
- [3] Regett, Conrad, Fattler: Laufendes Projekt: Verbundprojekt Dynamis - Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. In: [www.ffe.de/dynamis](http://www.ffe.de/dynamis). (Abruf am 2018-05); (Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6zfwkHdi3>); München, München: FfE e.V., 2018.
- [4] Miara, Marek et al.: Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor – Wärmepumpen im zukünftigen Strom- und Wärmesektor in KI Kälte Luft Klimatechnik 06/2016, Hüthig GmbH, Heidelberg, 2016
- [5] Conrad, J.; Fattler, S; Regett, A. et al.: Dynamis – Dynamische und intersektorale Maßnahmenbewertung zur kosteneffizienten Dekarbonisierung des Energiesystems. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Technische Universität München, 2019.
- [6] Stratou, E.: Auswirkung der energetischen Gebäudequalität auf den Wärmelastgang von Wohngebäuden – Abbildung mittels repräsentativer Typologien und Baualtersklassen. Masterarbeit. Herausgegeben durch die Technische Universität München – Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), betreut durch die Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: München, 2018.
- [7] Conrad, J. et al.: Modelling Load Profiles of Heat Pumps. In: Energies Special Issue "Energy Efficiency in Plants and Buildings" Volume 12 Issue 4. Basel: MDPI, 2019.
- [8] Wolff, D.; Jagnow, K.: Überlegungen zu Einsatzgrenzen und zur Gestaltung einer zukünftigen Fern- und Nahwärmeversorgung. Wolfenbüttel: Ostfalia Hochschule Wolfenbüttel, 2011.
- [9] Greif, Simon; Conrad, Jochen: Laufendes Projekt: Intelligente Wärme München. In: [www.ffe.de/iwm](http://www.ffe.de/iwm); München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2019.