

LASTFLEXIBILISIERUNGSPOTENZIALE IN DEUTSCHLAND – BESTANDSAUFNAHME UND ENTWICKLUNGSPROJEKTIONEN

Johannes Kochems

Fachgebiet Energie- und Ressourcenmanagement, TU Berlin, Fraunhoferstr. 33, 10587
Berlin, +49 (0) 30 314-23297, kochems@tu-berlin.de, www.er.tu-berlin.de

Kurzfassung: Existierende Publikationen zu technischen Lastflexibilisierungspotentialen in Deutschland werden in einer Metaanalyse hinsichtlich Methode und Potenzialergebnissen ausgewertet. Die Metaanalyse zeigt auf, dass Potenziale in allen Sektoren ausgewiesen werden, jedoch im Sektor GHD sowie hinsichtlich der Kosten und Zeitverfügbarkeiten der Potenziale Datenlücken bestehen. Ferner werden deutliche parametrische Unsicherheiten bei der Potenzialabschätzung identifiziert. Es ist festzustellen, dass bei Primärdatenerhebungen weiterer Forschungsbedarf besteht.

Keywords: Lastflexibilisierung, Lastmanagement, technische Potenziale, Metaanalyse

1 Einleitung

Die Energiewende geht mit einem zunehmendem Flexibilitätsbedarf zum Ausgleich schwankender Erzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Energien einher. [1, S. 2-4] Die Flexibilisierung von geeigneten Lasten mittels Lastverschiebung bzw. Lastverzicht oder Lasterhöhung stellt eine Option zur Adressierung dieses Flexibilitätsbedarfs dar. Hinsichtlich der Charakteristika und des zur Verfügung stehenden Potenzials dieser Option bestehen jedoch Unsicherheiten. Eine adäquate Quantifizierung des Potenzials muss dabei unter Beachtung verschiedener Flexibilitätsdimensionen durchgeführt werden [2, S. 4-5]. In der vorliegenden Metaanalyse wird hierzu die Forschungslandschaft hinsichtlich Aussagen zum technischen Lastflexibilisierungspotenzial ausgewertet. Die Analyse umfasst das jeweilige methodische Vorgehen sowie die enthaltenen Parameterwerte für die Flexibilitätsdimensionen Leistung, Zeit und Kosten. Hierbei wird folgende Potenzialdefinition zugrunde gelegt:

Als technisches Lastflexibilisierungspotenzial wird in dieser Analyse die Möglichkeit zur Veränderung der aktuellen Lastinanspruchnahme in positiver (Lastreduktion) bzw. negativer Richtung (Lasterhöhung) unter Berücksichtigung prozess- bzw. anwendungsspezifischer, zeitabhängiger Mindest- bzw. Maximallasten [3, S. 37-38, 4, S. 23] sowie zeitlicher Verfügbarkeitsrestriktionen [5, S. 44-45] verstanden. Eine technische Steuerungsmöglichkeit kann dabei bereits gegeben sein [6, S. 11] oder durch Investitionen herbeigeführt werden.

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben. Anschließend werden die angewendete Methode und zentrale Ergebnisse des Methoden- und Potenzialvergleichs dargelegt. In einem Fazit wird ein Resümee gezogen und in einem Ausblick werden weitere Forschungsbedarfe identifiziert.

2 Stand der Forschung

Es existieren bereits einige Lastflexibilisierungspotenzialstudien für Deutschland sowie für weitere Untersuchungsräume. Aufgrund der ausführlichen Abhandlung im weiteren Verlauf soll an dieser Stelle nur eine grobe Strukturierung der existierenden Forschungsarbeiten mit Fokus auf nationalen Betrachtungen für die Bundesrepublik Deutschland vorgenommen werden. Zumeist erfolgt eine Ermittlung technischer bzw. ökonomischer Lastflexibilisierungspotenziale [5, 7–9]. Soziale und organisatorische Limitationen werden seltener und häufig pauschal in den Untersuchungen thematisiert [3, 10]. In einigen Untersuchungen werden Potenziale bezogen auf einzelne Regionen abgeschätzt [4, 11]. Zum Teil geschieht dies in Kombination mit Feldstudien für einen Einsatz von Smart Metern bzw. Elementen eines Smart Grids in Hinblick auf die Auswirkungen von zeitvariablen Tarifdesigns [12, 13, S. 112-188]. In [14, S. 20-22] ist ein Überblick über internationale Feldstudien zu zeitvariablen Tarifen zu finden, der auch soziale Aspekte beleuchtet. Die für Lastflexibilisierung beschriebenen Anwendungszwecke [15, S. 273-282] lassen sich grob in markt- und netzgetriebenen Einsatz untergliedern [16, S. 33-34]. Einige Untersuchungen stellen dediziert auf eine Reduzierung der Netzbelastung durch Lastflexibilisierung [17] und andere auf einen marktgetriebenen Einsatz selbiger [5, 6] ab. Existierende Metaanalysen des Lastflexibilisierungspotenzials fokussieren auf den Industriesektor [2, 18]. Eine breit angelegte und zugleich detaillierte Übersicht über alle Sektoren fehlt bislang für die Bundesrepublik Deutschland. Diese Forschungslücke wird durch die vorliegende Analyse geschlossen.

3 Methode

Zur Analyse technischer Potenziale für Lastflexibilisierung wird eine Metaanalyse existierender Forschungsarbeiten durchgeführt, in der sowohl das jeweilige methodische Vorgehen als auch die Potenzialergebnisse ausgewertet werden. Die zu analysierenden Publikationen werden nach den folgenden Kriterien ausgewählt:

- Betrachtungsregion: Die Publikationen fokussieren sich auf die Bundesrepublik Deutschland.
- Aktualität der Analysen: Die Publikationen sind nach 2005 veröffentlicht.
- Sektorale Abdeckung: Die Publikationen decken entweder einzelne Sektoren (Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) und Haushalte) oder Gesamtdeutschland ab. Analysen zu Einzelanwendungen und -prozessen werden wegen der Ausrichtung der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt.
- Potenzialbegriff und Datenverfügbarkeit: Es werden zumindest technische Potenziale ausgewiesen. Es sind Angaben zu mindestens einem der analysierten Parameter verfügbar.

Im Methodenvergleich wird eine detaillierte Klassifikation der methodischen Vorgehensweise der Publikationen vorgenommen. Hierzu werden zunächst der methodische Grundansatz für die Abschätzung der Potenziale, zentrale Datenquellen sowie zentrale Annahmen ausgewertet. Zudem werden die betrachteten Prozesse und Anwendungen, die Flexibilitätsparameter sowie der Zeithorizont je Publikation analysiert. Für jeweils definierte Kriterien wird ausgewertet, ob diese angegeben bzw. vollständig erfüllt sind (Wert 1) oder nicht (Wert 0). Falls unvollständige Informationen vorliegen, wird eine Zwischenabstufung (Wert 0,5)

zugewiesen. Werden beispielsweise durchgängig Branchenstatistiken zur Ableitung der Potenzialschätzung im Industriesektor herangezogen, wird der Wert 1 zugewiesen. Wird nur für einen Prozess ein Abgleich mit einer Branchenstatistik durchgeführt, ist das Kriterium nicht vollständig erfüllt und es wird folglich der Wert 0,5 zugewiesen. Durch Summenbildung sowie Ermittlung der Häufigkeiten von Werten ungleich 0 wird ermittelt, wie viele Publikationen ein Kriterium erfüllen bzw. teilweise erfüllen.

Im Ergebnisvergleich werden für die analysierten Publikationen folgende Kennwerte zur Potenzialquantifizierung auf Prozess- bzw. Anwendungsebene ausgewertet:

- Leistungsparameter: grundsätzliche Eignung für Lastmanagement, für Lastverschiebung bzw. Lastverzicht oder Lasterhöhung zur Verfügung stehende schaltbare Leistung (nachfolgend auch: Lastmanagementpotenzial), Durchschnitts-, Mindest- und Maximalauslastung, installierte Leistung und flexibilisierbarer Leistungsanteil
- Zeitparameter: Aktivierungsdauer, Schaltdauer, d. h. die Dauer eines (Teil-)Prozesses – Lastreduktion oder Lasterhöhung, Verschiebedauer, d. h. die Dauer vom Beginn einer Lastverschiebung bis zum Ausgleich der Energiebilanz, Regenerationsdauer sowie maximale Aktivierungen bzw. zeitliche Verfügbarkeiten der Potenziale
- Kostenparameter: spezifische Investitionsausgaben, variable Abrufkosten, fixe Kosten

Die Erfassung der Parameter erfolgt für die Sektoren Industrie, GHD und Haushalte für den Status quo sowie für Betrachtungsjahre zwischen 2020 und 2050 im Fünfjahresabstand. Für die Prozesse bzw. Anwendungen werden jeweils kategorisierte Boxplots erstellt. Die zugehörigen Lagemaße sind im Anhang zu finden. Für Zukunftsprojektionen wird je Sektor eine Prozess- bzw. Anwendungsauswahl anhand der Höhe der für Lastmanagement durchschnittlich zur Verfügung stehenden Leistung getroffen. Auf Basis der Bandbreiten je Kennwert können abschließend Ableitungen hinsichtlich der Qualität und Quantität der Datenlage getroffen und parametrische Unsicherheiten identifiziert werden. Nachfolgend ist ein Auszug zentraler Ergebnisse dargelegt.

4 Ergebnisse und Diskussion

Aus 70 Publikationen einer engeren Literaturliste werden 30 den Auswahlkriterien entsprechende ausgewählt und ausgewertet (s. Anhang). Diese werden wiederum zu 24 Publikationsgruppen zusammengefasst, sofern die Publikationen im Rahmen des gleichen Forschungsprojekts entstanden sind, annähernd den gleichen Betrachtungsumfang aufweisen und übereinstimmende oder nur geringfügig abweichende Potenzialangaben enthalten. Hierdurch soll eine implizite Gewichtung der Potenzialschätzungen vermieden werden. Im Folgenden werden für die Publikationen zunächst zentrale Ergebnisse des durchgeführten Methodenvergleichs dargelegt. Es schließen sich zentrale Ergebnisse des Potenzialvergleichs an. Am Ende des Kapitels werden beide Analyseteile einer kritischen Würdigung unterzogen.

4.1 Ergebnisse des Methodenvergleichs

Im Methodenvergleich zeigt sich, dass überwiegend ein hybrider Ansatz zur Potenzialquantifizierung angewendet wird, bestehend aus einer Bottom-Up-Abbildung des jeweiligen Prozesses bzw. der jeweiligen Anwendung und der Disaggregation von

Informationen auf Ebene der gesamten Branche bzw. für die gesamte Bundesrepublik Deutschland. Dieser Ansatz wird in 21 der 24 Publikationsgruppen verfolgt, wobei die Bottom-Up-Abbildungen der jeweiligen Prozesse bzw. Anwendungen unterschiedlich detailliert ausfallen. In fünf der 24 Publikationsgruppen werden Kosten-Potenzial-Kurven abgeleitet, welche die Aspekte Kosten und Höhe des Potenzials im Sinne der schaltbaren Leistung kombinieren. In der Hälfte der Untersuchungen werden mehrere Szenarien analysiert, um Unsicherheiten abzubilden. Eine systematische Analyse von Fehlermaßen wird nur in einer Publikation durchgeführt, wobei zwei weitere den Aspekt tangieren. Abbildung 1 gibt eine Übersicht zu Methoden und Datenquellen der Publikationen.

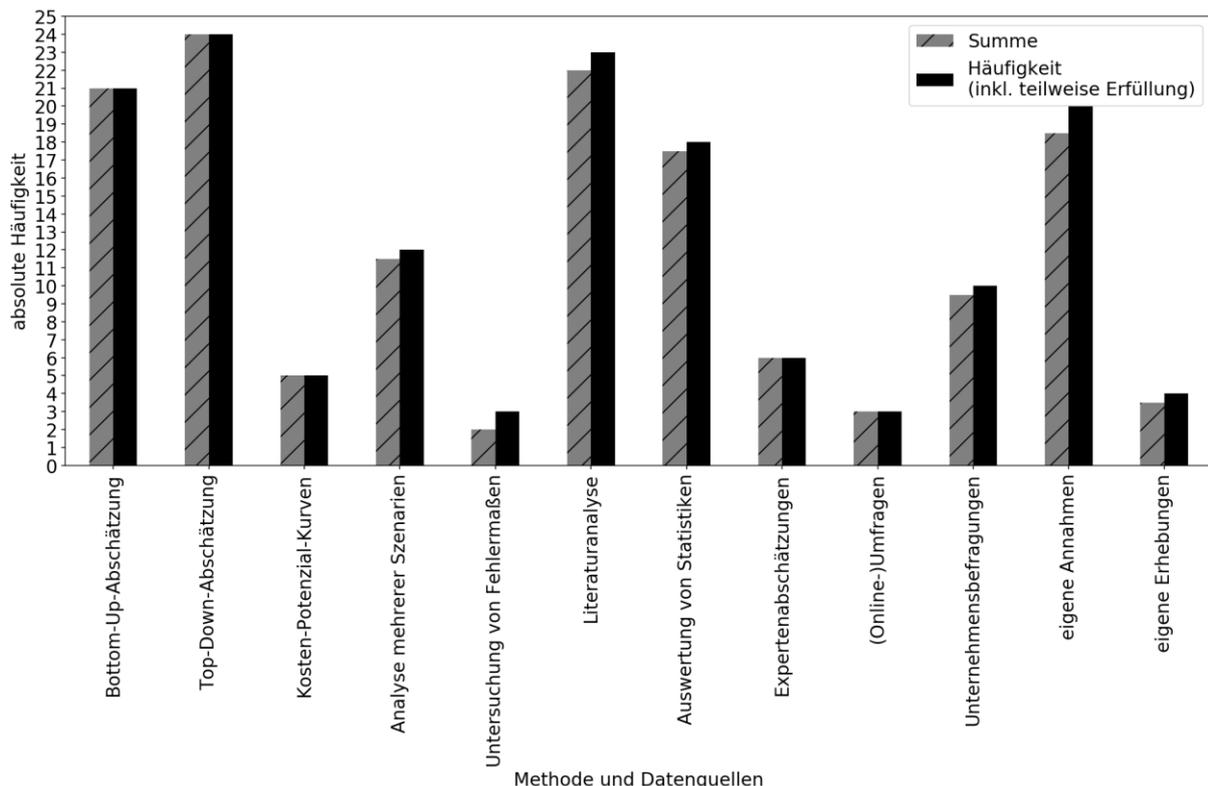


Abbildung 1: Methode und Datenquellen der Publikationsgruppen

Datenquellen: [3, S. 22-31, 46-63, 73-87, 93]; [4, S. 22-23, 31, 44, 54-60]; [5, S. 4-7, 16, 41-45, 47-61, 75-123, 126-127]; [6, S. 11-23, 65-70, 86-104, 135-144]; [7, S. 78-96]; [9, S. 23-34]; [10, S. 751-755]; [19, S. 1, 3-4]; [20, S. 2-58]; [21, S. 2-19, 80-93]; [22, S. 32, 35]; [23, S. 13-52]; [24, S. 5-7, 37-54, 58-64, 85-95]; [25, S. 6-8]; [26, S. 11-14, 27-28]; [27, S. 97-99, 216-225]; [28, S. 15-16, 39-40, 46-48, 59-60]; [29, S. 410-425]; [30, S. 434-437]; [31, S. 1-6, 88-94, 128-131, 137-139, 185-203, 206-209, 228-232]; [32, S. 52-57]; [33, S. 12-32]; [34, S. 38-45, 48-53, 62-69, 73-97, 104-116, 119-121, 168-169]; [35, S. 8-10, 26-28, 38]

Summe: Summierung aller Werte; teilweise erfüllte Kriterien sind mit 0,5 bewertet;
 Häufigkeit: Anzahl aller Werte ungleich 0

Beinahe alle Publikationen führen, zumindest ergänzend, eine Literaturanalyse durch. In allen Publikationen mit Ausnahme von [34] werden bereits vorhandene Potenzialstudien referenziert und teilweise zur Generierung der eigenen Potenzialschätzung herangezogen. Statistiken öffentlicher Stellen werden von 17 der 24 Publikationsgruppen herangezogen. Branchen- und Verbandsstatistiken sowie Smart-Metering- und Lastmanagement-Feldstudien werden in je 13 der 24 Publikationsgruppen herangezogen. Weniger häufig werden Expertenabschätzungen mit sechs von 24 Publikationsgruppen, eigene Erhebungen mit vier von 24 Publikationsgruppen sowie (Online-)Umfragen mit drei von 24 Publikationsgruppen eingesetzt.

Eine Vielzahl der Publikationen trifft umfangreiche eigene Annahmen mit Auswirkungen auf die Ergebnisse der Potenzialschätzung. Annahmen werden überwiegend in Bezug auf die Zeitverfügbarkeit (bei 13 von 24 Publikationsgruppen), Zeitdauern, die für Lastflexibilisierung relevant sind (bei 10 von 24 Publikationsgruppen), sowie den flexibilisierbaren Leistungsanteil und Durchdringungsraten einer Anwendung (bei je acht von 24 Publikationsgruppen) getroffen.

Eine Zitationsanalyse (Abbildung 2) zeigt wechselseitige Abhängigkeiten des Studienmaterials. Am häufigsten zitiert werden die Publikationen [36] bzw. [9] in 21 der 24 Publikationsgruppen, [29] und [34] in je 13 der 24 Publikationsgruppen sowie [7] in 11 der 24 Publikationsgruppen. Da die Potenzialschätzungen der Publikationen nicht in allen Fällen ausschließlich zur Einordnung der eigenen Ergebnisse verwendet werden, sondern auch zur Ableitung darauf aufbauender Potenzialquantifizierungen, kann das Literaturspektrum nicht als unabhängig voneinander betrachtet werden.

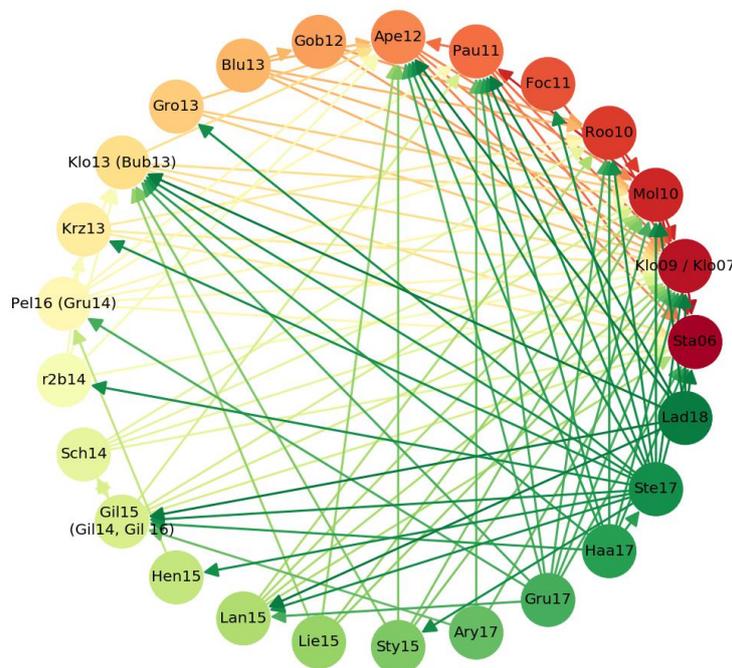


Abbildung 2: Zitationsanalyse

Datenquellen: [3, S. 120, 128-130, 132-133, 135-136, 138-139]; [4, S. 108]; [5, S. 169, 172, 175, 177, 179-180]; [6, S. 178, 182, 184-186]; [7, S. 137]; [9, S. 209]; [10, S. 765-766]; [19, S. 16-17]; [20, S. 131]; [21, S. 116]; [22, S. 36]; [23, S. 140-143, 145-146]; [24, S. 137, 148, 150-151, 155-156, 159]; [25, S. 31]; [26, S. 92-94]; [27, S. 209-210]; [28, S. 67-68, 70]; [29, S. 545]; [30, S. 441]; [31, S. 545, 549-550, 553, 565-566]; [32, S. 143, 146-147]; [33, S. 38-39]; [35, S. 41-42]; [37, S. 147, 149, 152]

Hinsichtlich des Betrachtungsumfangs ist der Industriesektor am häufigsten abgedeckt in 23 von 24 Publikationsgruppen. Der Haushaltssektor wird in 16 von 24 und der GHD-Sektor in 12 von 24 Publikationsgruppen analysiert. Schaltbare Leistungen werden von fast allen Publikationen ausgewiesen, wobei nicht alle Publikationen konsequent zwischen positiven Potenzialen (Lastreduktion) und negativen (Lasterhöhung) unterscheiden. In zwei von 24 Publikationen wird diese Unterscheidung nicht und in weiteren fünf nicht konsequent vorgenommen. Verschiebedauern und -häufigkeiten sind von den Zeitparametern mit je 17 von 24 Publikationsgruppen am besten abgedeckt. Die Schaltdauern werden in 15 von 24 Publikationen ausgewiesen. Bei den Zeitparametern findet häufig keine durchgängige Angabe

statt. Zeitverfügbarkeiten werden nur in knapp der Hälfte der Publikationen überhaupt beleuchtet. Es sind keine vollständigen Zeitverfügbarkeitszeitreihen (in mindestens stündlicher Auflösung) für ein Jahr veröffentlicht. Angaben zu spezifischen Investitionsausgaben sowie zu variablen und fixen Kosten finden sich in etwa in der Hälfte des Studienmaterials.

4.2 Ergebnisse des Potenzialvergleichs für den Status quo

Bei energieintensiven industriellen Prozessen lassen sich hohe positive schaltbare Leistungen feststellen, die für Deutschland aggregiert im Durchschnitt über ein Jahr bzw. über Typzeiträume im Bereich von 100 bis mehr als 1.000 MW je Prozess liegen (Abbildung 3). Überwiegend wird angegeben, dass diese Potenziale für einen Lastverzicht zur Verfügung stehen [5, S. 30, 6, S. 12-13] und insofern resultieren deutlich geringere negative schaltbare Leistungen für mögliche Lastverschiebungen. Bei industriellen Querschnittstechnologien liegen dagegen nahezu symmetrische Potenziale vor. Während sich bei der Primäraluminiumelektrolyse sowie Papiermaschinen und Druckluftanwendungen eine sehr breite Wertespannbreite identifizieren lässt, ist diese bei der Holzstoff- sowie der Zementherstellung deutlich weniger ausgeprägt. Dies könnte auf geringere Unsicherheiten durch eine bessere Datenlage hindeuten [2, S. 11].

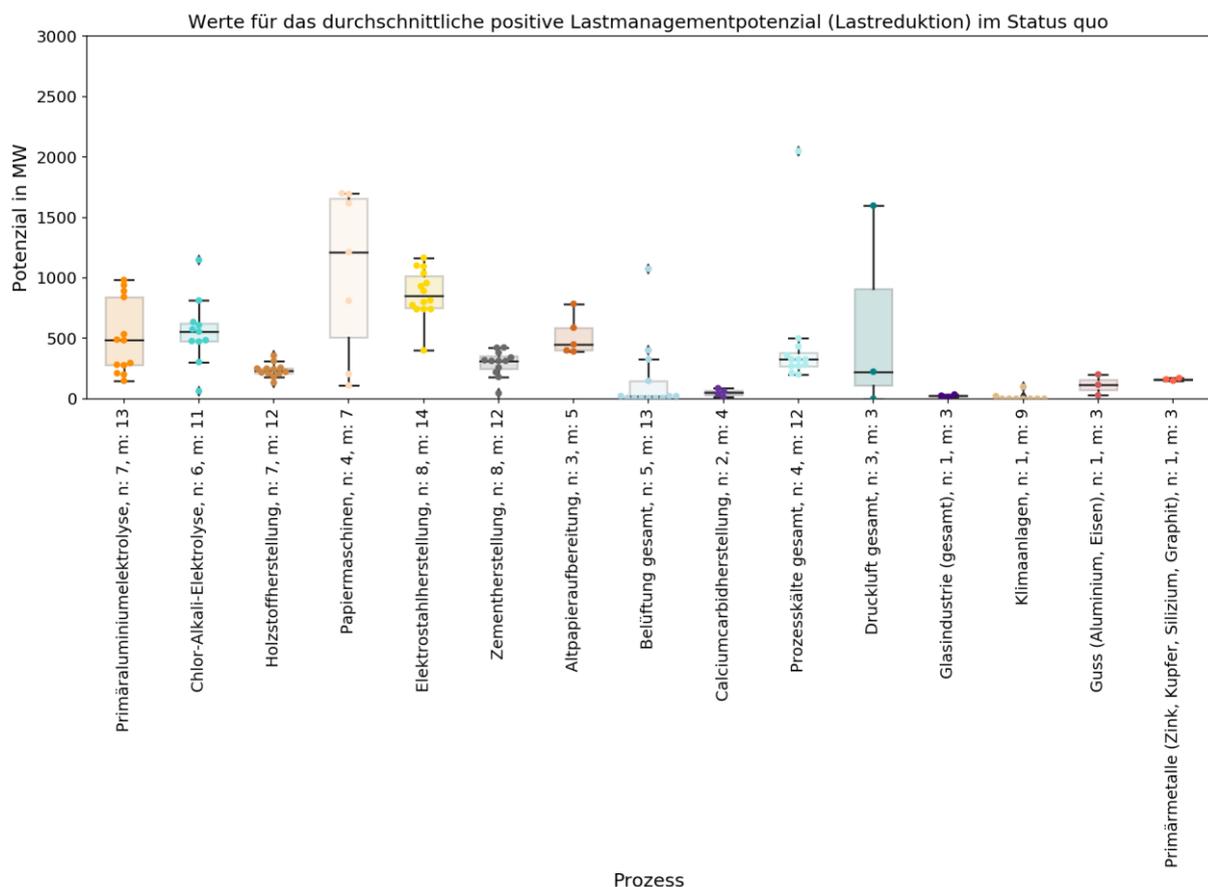


Abbildung 3: durchschnittliches positives Lastmanagementpotenzial im Industriesektor im Status quo

Datenquellen: [3, S. 171-174, 182-195, 223]; [5, S. 205]; [6, S. 196]; [7, S. 37, 41, 46-47, 50, 57, 111-113]; [8, S. 92]; [9, S. 53-67, 69]; [20, S. 33-34, 38, 47]; [22, S. 33]; [23, S. 57, 60, 94]; [27, S. 123, 133-134]; [29, S. 422-425, 460, 525-527]; [30, S. 434-435]; [31, S. 213-214, 216-217]; [32, S. 54]; [33, S. 15]; [34, S. 94-95, 162]; eigene Berechnungen

n: Anzahl der Publikationen, die Angaben zum jeweiligen Prozess enthalten; m: Anzahl der Datenpunkte; Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

Die Schaltdauern im Industriesektor liegen überwiegend im Bereich bis etwa fünf Stunden, wobei eine deutliche Konzentration der Werte im Bereich von ein bis drei Stunden festzustellen ist. Bei den Verschiebedauern werden in einigen Publikationen deutlich höhere Werte ausgewiesen. Eine Konzentration der Werte findet im Bereich bis etwa zehn Stunden statt. Vereinzelt werden auch Verschiebedauern bis etwa 40 Stunden angegeben, sodass eine tagesübergreifende Verschiebung zumindest in einigen Publikationen und für einzelne Prozesse bzw. Querschnittstechnologien als realistisch erachtet wird (Abbildung 4). Hinsichtlich der zeitlichen Verfügbarkeit werden für energieintensive Prozesse zumeist hohe Auslastungen angegeben [3, S. 181-183, 27, S. 17], weswegen wenig zeitliche Einschränkungen vorliegen.

Im Industriesektor werden weitgehend keine nennenswerten spezifischen Investitionsausgaben zur Herstellung der Flexibilitätseigenschaft bzw. der Steuerbarkeit ausgewiesen. Dies liegt einerseits daran, dass einige Studien bereits von einer gegebenen Steuerbarkeit bzw. der Anknüpfungsmöglichkeit an eine vorhandene Steuerungsinfrastruktur ausgehen [29, S. 531], was für stromintensive Prozesse nach [23, S. 69-70] auch in den meisten Fällen gegeben ist. Bei einer Übertragung auf weniger stromintensive Anwendungen wäre dies zu prüfen.¹ Andererseits lassen sich die niedrigen spezifischen Werte durch die im Vergleich mit dem GHD- und Haushaltssektor hohen installierten bzw. schaltbaren Leistungen begründen. Dagegen fallen die ausgewiesenen variablen Kosten in vielen Fällen im Vergleich hoch aus, da im Falle eines Lastverzichts der Value of Lost Load für den entgangenen Leistungsbezug angesetzt wird [29, S. 531]. Prozessabhängig werden in den Publikationen hierfür Werte von mehreren 100 bis deutlich über 1.000 €₂₀₁₈/MWh angegeben. Dagegen sind im Fall von Lastverschiebungen, sofern diese für die Prozesse als zulässig erachtet werden, Kosten nahe 0 angesetzt, die zu den in Tabelle 1 angegebenen großen Wertespannbreiten führen.

Tabelle 1: variable Kosten für ausgewählte Industrieprozesse im Status quo in €₂₀₁₈/MWh (gerundete Werte)

	Primäraluminium- elektrolyse	Chlor-Alkali- Elektrolyse	Holzstoff- herstellung	Elektrostahl- herstellung	Zement- herstellung
Anzahl Werte	22	15	14	16	17
Minimum	0	0	0	0	0
Median	357	111	154	402	445
Maximum	1.671	1.043	541	2.227	1.613

Datenquellen: [3, S. 220]; [4, S. 49]; [5, S. 30, 117]; [6, S. 106]; [20, S. 125]; [23, S. 69]; [27, S. 117-118, 130]; [29, S. 427]; [30, S. 436]; [31, S. 232, 239, 243]; [37, S. 175]

¹ In [3, S. 60-61] werden Prozesse nach der angenommenen IKT-Ausstattung differenziert. [18, S. 11-12] sowie [2, S. iii] kritisieren, dass in Hinblick auf Investitionsanwendungen im Industriesektor nicht hinreichend zwischen der Herbeiführung der Flexibilitätseigenschaft selbst, beispielsweise durch eine Investition in Pufferspeicherkapazitäten, und den Ausgaben für eine Anbindung an eine Steuerungsinfrastruktur differenziert wird.

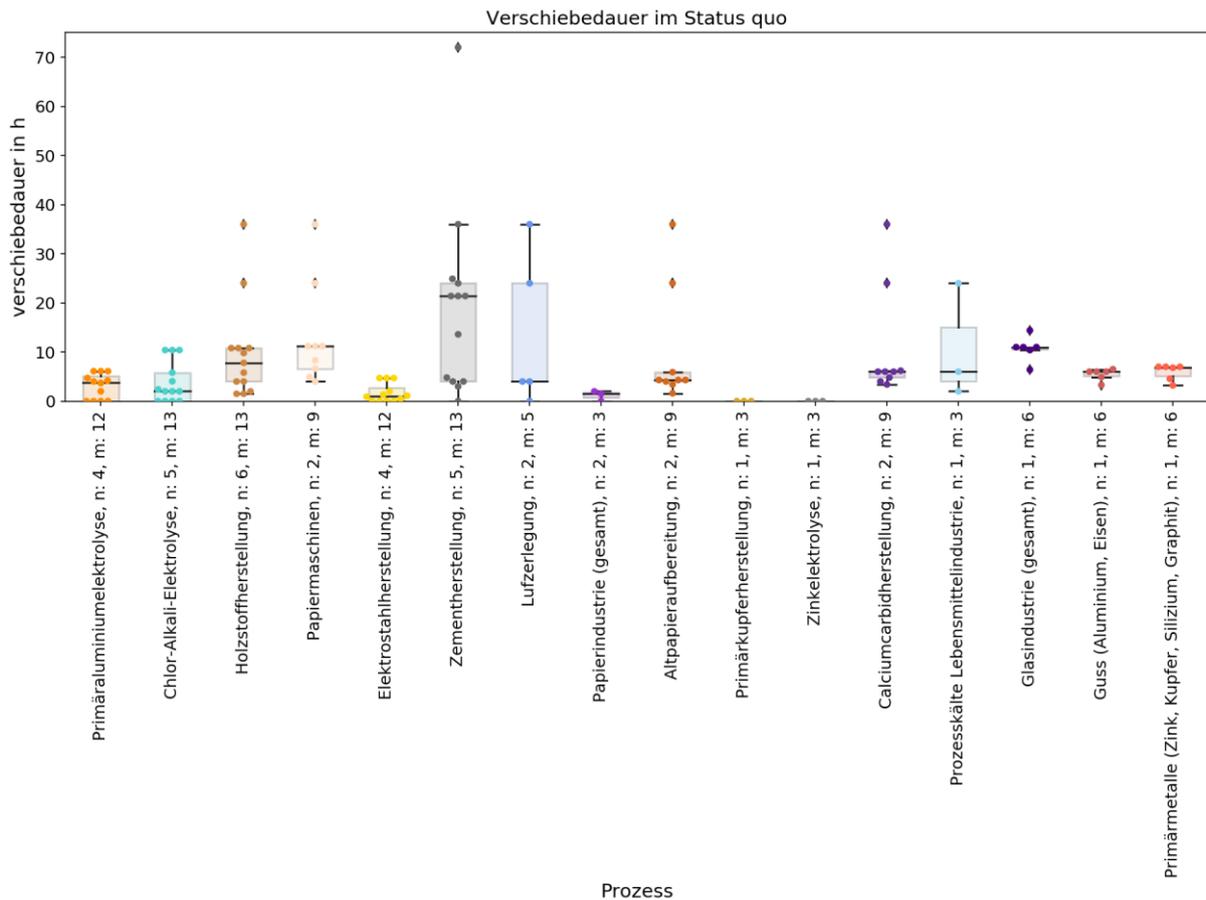


Abbildung 4: Verschiebedauern im Industriesektor im Status quo

Datenquellen: [3, S. 202]; [5, S. 23]; [10, S. 752]; [22, S. 33]; [29, S. 424, 460]; [30, S. 435]; [31, S. 213]; [37, S. 50, 175]

n: Anzahl der Publikationen, die Angaben zum jeweiligen Prozess enthalten; m: Anzahl der Datenpunkte; Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

Im GHD-Sektor lassen sich Potenziale vor allem bei Wärme- und Kälteanwendungen, wie Prozess- und Klimakältebereitstellung, Ventilation und Belüftung sowie Pumpenanwendungen identifizieren. Die durchschnittlichen positiven und negativen schaltbaren Leistungen je Anwendungskategorie liegen zumeist deutlich unter 1.000 MW, die maximalen schaltbaren Leistungen dagegen mit bis zu 3.000 MW deutlich höher. Hier zeigt sich eine ausgeprägte Temperatur- bzw. Zeitabhängigkeit der Höhe der schaltbaren Leistungen. Die Höhe der ausgewiesenen schaltbaren Leistungen fallen mit Ausnahme von Nachtspeichern und Klimaanlage, wo die negativen Potenziale höher beziffert werden, symmetrisch aus. Für die Schaltdauern werden im GHD-Sektor im Vergleich mit denjenigen des Haushaltssektors geringere Werte ausgewiesen. Die Verschiebedauern sind vergleichbar mit denen des Haushaltssektors. In Bezug auf die Kosten der Flexibilisierung im GHD-Sektor ist die Datenlage besonders verbesserungswürdig, sodass der geringe Umfang der Stichprobe zu Verzerrungen führen kann. Für die als geeignet identifizierten Branchen und Anwendungen werden spezifische Investitionen von bis zu 2.000 €₂₀₁₈/kW ausgewiesen. Ein denkbarer Erklärungsansatz ist, dass durch die verglichen mit dem Industriesektor deutlich geringeren Leistungen höhere spezifische Kosten entstehen können. Die Spannbreiten der Werte sind jedoch ausgeprägt, was auf große Unsicherheiten bzw. Heterogenität hindeutet.

Im Haushaltssektor lässt sich in Summe ein erhebliches und nahezu symmetrisches Potenzial an schaltbaren Leistungen identifizieren (Abbildung 5). Große schaltbare Lasten finden sich besonders im Bereich Wärme- und Kältebereitstellung und sind durch die Verbraucher Nachtspeicherheizungen, elektrische Wärmepumpen, Warmwasserbereitstellung sowie Kühl- und Gefrieranwendungen gegeben. Daneben existieren Flexibilisierungspotenziale bei der Weißen Ware, wobei die Aspekte Akzeptanz und Internalisierung der Komferteinschränkungen in den Studien unzureichend beleuchtet sind.

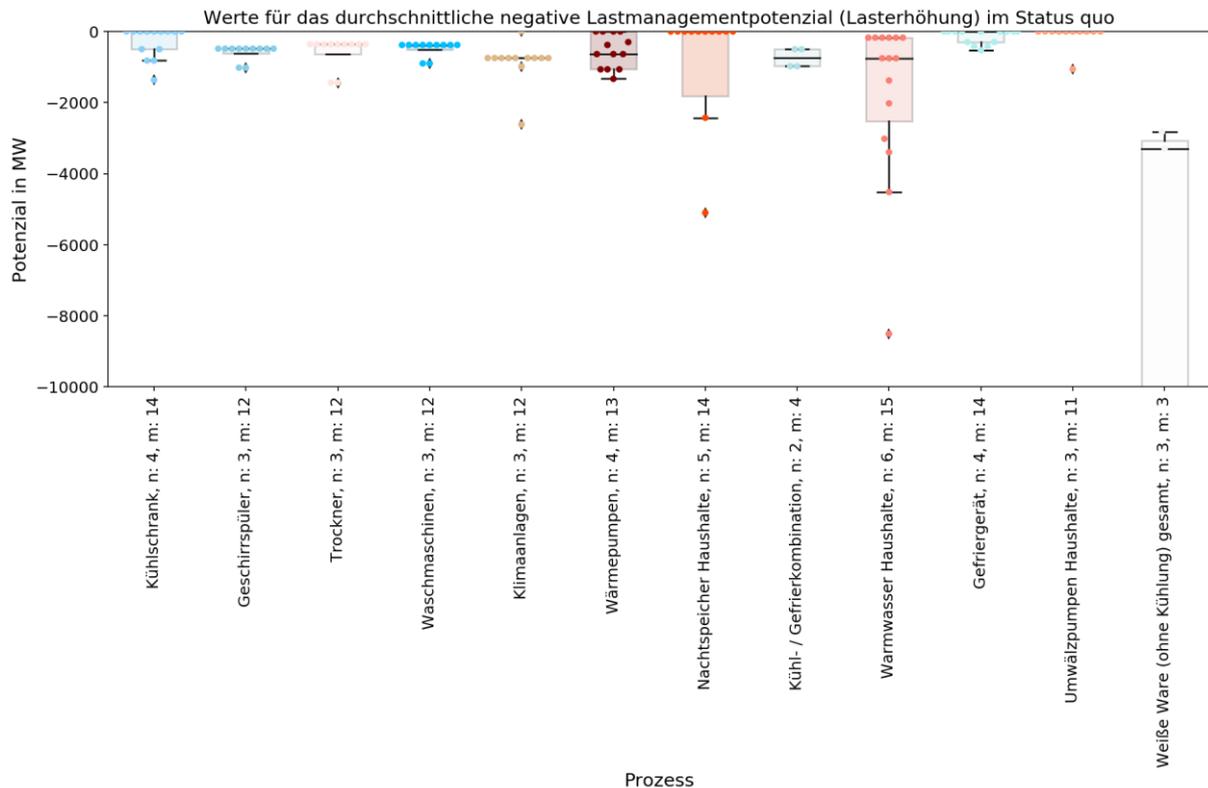


Abbildung 5: durchschnittliches negatives Lastmanagementpotenzial im Haushaltssektor im Status quo

Datenquellen: [3, S. 171-174, 184-195]; [6, S. 197]; [7, S. 97-98]; [22, S. 33]; [24, S. 74, 76-77, 81]; [28, S. 22, 27]; [29, S. 414-418]; [31, S. 109, 112, 142]; [34, S. 114, 116, 169]; [35, S. 13, 15, 17-18, 20, 22]; eigene Berechnungen

n: Anzahl der Publikationen, die Angaben zum jeweiligen Prozess enthalten; m: Anzahl der Datenpunkte; Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

Die positiven und negativen Schaltdauern im Haushaltssektor fallen mit Werten bis oberhalb von 10 Stunden etwas länger aus als im GHD- und Industriesektor. Die Werte streuen jedoch sehr breit je Haushaltsanwendung. Alle Schaltungen sowie Verschiebedauern sind gemäß dem ausgewerteten Literaturspektrum binnen 24 Stunden zu realisieren. Die längsten Schalt- und Verschiebedauern sind für Wärme- und Kälteanwendungen angegeben.

Für die spezifischen Investitionsausgaben wird in den Publikationen eine sehr breite Wertespanne von Kosten unter 100 €₂₀₁₈/kW für Anwendungen der Weißen Ware bis weit über 2.000 €₂₀₁₈/kW für Heizungsumwälzpumpen ausgewiesen (Abbildung 6). Die Wertespreizung lässt sich mitunter dadurch erklären, dass bereits erfolgte Standardisierungen Kostendegressionen eingeleitet haben. So werden etwa in [3] gegenüber [29] deutlich gesunkene Investitionsaufwendungen ausgewiesen, die im Haushaltssegment auf die zwischenzeitlichen Kostendegressionen bei Smart Metern und Steuerungsboxen

zurückzuführen sind. Dies zeigt die Relevanz aktueller Daten zur Beurteilung spezifischer Investitionsaufwendungen. Ähnlich wie im GHD-Sektor werden die variablen Kosten für Lastverschiebungen als vernachlässigbar angesehen und mit nahe 0 internalisiert.

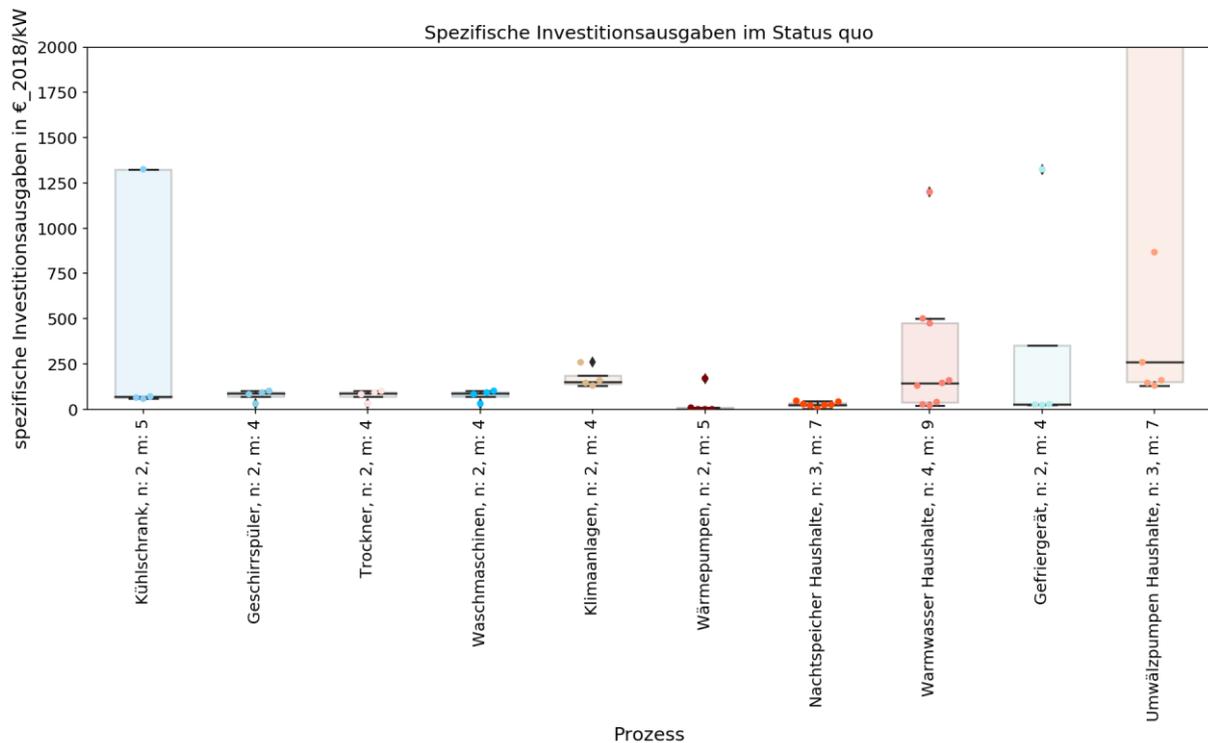


Abbildung 6: spezifische Investitionsausgaben im Haushaltssektor im Status quo

Datenquellen: [3, S. 171-174, 184-195]; [5, S. 30]; [6, S. 106]; [29, S. 427, 532]; [35, 14, 16-17, 19, 21-23]; eigene Berechnungen

n: Anzahl der Publikationen, die Angaben zum jeweiligen Prozess enthalten; m: Anzahl der Datenpunkte; Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand

4.3 Ergebnisse zu Entwicklungsprojektionen der Potenzialschätzungen

Es zeigt sich, dass die Untersuchungen von einer deutlichen Steigerung bei den schaltbaren Leistungen von Klimaanlage sowie Wärmepumpen ausgehen. Dagegen lässt sich für Nachtspeicherheizungen eine deutlich rückläufige Tendenz erkennen, dadurch, dass angenommen wird, dass die vorhandenen Anlagen durch effizientere Bereitstellungstechnologien substituiert werden. Bei Kühlschränken dürfte die leicht rückläufige Tendenz auf die angenommene Effizienzsteigerung bei nahezu gleichbleibender Haushaltsanzahl und Geräteausstattung zurückzuführen sein. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass die Datenlage für einzelne Stützjahre verbesserungswürdig ist. Bei industriellen Prozessen werden ein Potenzialanstieg für die Elektrostahlherstellung und ansonsten leichte Potenzialrückgänge erwartet. Im GHD-Sektor ergibt sich eine uneinheitliche Tendenz. In Abbildung 7 sind Projektionen für die zukünftige Entwicklung der durchschnittlichen positiven schaltbaren Leistungen für ausgewählte Anwendungen im Haushaltssektor dargelegt.

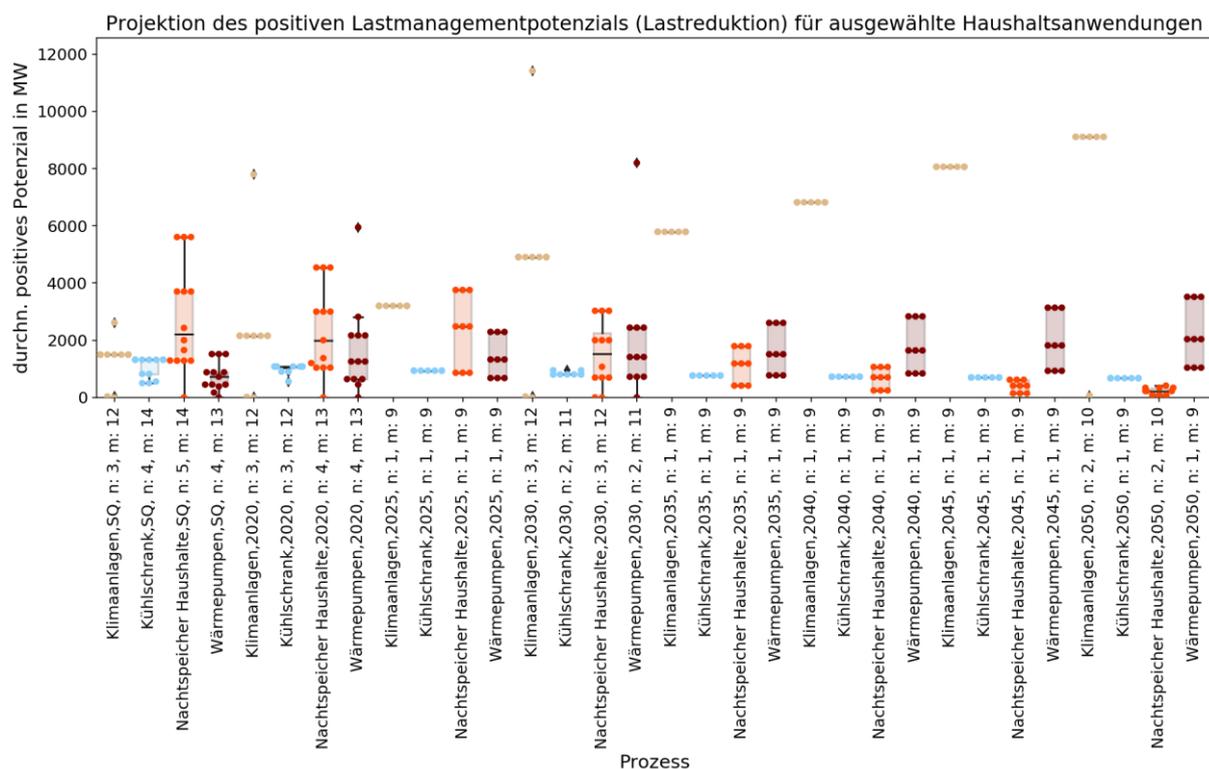


Abbildung 7: Projektion der durchschnittlichen positiven schaltbaren Leistungen im Haushaltssektor

Datenquellen: [3, S. 171-174, 184-195]; [6, S. 196]; [7, S. 97-98]; [9, S. 85]; [21, S. 90-91]; [22, S. 33]; [24, S. 74]; [26, S. 33-34]; [28, S. 22, 27]; [29, S. 414-415, 417]; [31, S. 100, 109, 112]; [34, S. 114]; [35, S. 13, 18]; [37, S. 158, 160, 162]; eigene Berechnungen

n: Anzahl der Publikationen, die Angaben zum jeweiligen Prozess enthalten; *m*: Anzahl der Datenpunkte; Whisker im 1,5-fachen Interquartilsabstand; SQ: Status quo

4.4 Kritische Würdigung der Ergebnisse

An einigen Stellen ist eine Interpretation des Studienmaterials erforderlich und die Datenlage erweist sich für einzelne Sektoren, Prozesse bzw. Parameter als ausbaufähig. Insofern wirkt sich die Heterogenität der existierenden Publikationen sowie die Qualität der Datenlage direkt auf die Ergebnisse aus. Datenlücken finden sich insbesondere im GHD-Sektor sowie insgesamt hinsichtlich der Aspekte Kosten und Zeitverfügbarkeiten. Teilweise sind widersprüchliche Informationen zu finden. Durch Bündelung können eine Vereinheitlichung der Datenlage erreicht sowie die erheblichen Unsicherheiten der Potenzialquantifizierung aufgezeigt werden.

Eine Einordnung in die gewählten Kategorien des Methodenvergleichs ist nicht in allen Fällen exakt trennscharf möglich, sondern erfordert mitunter Abwägungen. Durch die Einführung einer Zwischenabstufung wird diesem Umstand zumindest teilweise Rechnung getragen.

Im Potenzialvergleich wird der Fokus auf Potenziale im Stundenbereich gelegt, da eine Folgeverwertung mithilfe eines Elektrizitätsmarktfundamentalmodells mit stündlicher Auflösung erfolgen soll. Insofern werden sehr kurzfristige Potenziale und Gradienten aufgrund der gewählten Fokussierung nicht erfasst, obwohl diese etwa aus Sicht der Netz- und Systemstabilität von Belang sein können. Zugunsten einer breiteren Abdeckung wird an dieser Stelle auf eine höhere (zeitliche) Detaillierung der Potenzialschätzungen verzichtet.

5 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Metaanalyse werden 30 Publikationen zu technischen Lastflexibilisierungspotenzialen für die Bundesrepublik Deutschland ausgewertet. Hierbei wird ein breites Spektrum von Prozessen und Anwendungsbereichen in Hinblick auf die jeweiligen Lastflexibilisierungspotenziale untersucht. Es werden jeweils der Status quo sowie, sofern Angaben vorhanden sind, die zukünftigen Potenzialentwicklungen bis zum Jahr 2050 ausgewertet.

Im Methodenvergleich zeigt sich, dass in den Publikationen zumeist ein hybrider Ansatz zur Potenzialquantifizierung zum Einsatz kommt und wechselseitige Abhängigkeiten durch das Referenzieren früherer Untersuchungen nicht auszuschließen sind. Während der Industriesektor von beinahe allen Publikationen analysiert wird, werden Anwendungen im GHD-Sektor in der Hälfte der Publikationen betrachtet. Im GHD-Sektor fällt die Datenlage daher verbesserungswürdig aus. Abdeckungslücken ergeben sich ebenso bei den Kostenparametern, die in ca. der Hälfte der Publikationen ausgewertet werden, sowie in Bezug auf Zeitverfügbarkeiten.

Der Vergleich der Potenzialschätzungen zeigt einerseits, dass erhebliche positive Lastflexibilisierungspotenziale bei industriellen Prozessen vorliegen und die ausgewiesenen schaltbaren Leistungen je Einzelprozess bis mehr als 1.000 MW im Durchschnitt betragen. Andererseits lassen sich Lastverschiebepotenziale besonders bei temperaturabhängigen Lasten im GHD- und Haushaltssektor, d. h. für elektrische Raumwärmebereitstellung und Prozess- oder Klimakälte, identifizieren, die aggregiert eine erhebliche Größenordnung von mehreren 1.000 MW je Anwendung im Durchschnitt betragen. Während bei industriellen Prozessen überwiegend von leicht rückläufigen schaltbaren Leistungen ausgegangen wird, werden für den Haushaltssektor Potenzialzuwächse etwa bei elektrischen Wärmepumpen und Klimaanlage prognostiziert. Bei den spezifischen Investitionsausgaben sowie den variablen Kosten im Industriesektor werden keine wesentlichen Entwicklungen erwartet, während im Haushaltssegment leicht sinkende spezifische Investitionsausgaben für Lastflexibilisierung prognostiziert werden. Bei nahezu allen Parametern lassen sich bereits im Status quo durch große Wertespannweiten erhebliche Unsicherheiten in der Potenzialquantifizierung bzw. eine Heterogenität der untersuchten Grundgesamtheiten erkennen.

Hieraus lassen sich weitere Forschungsbedarfe identifizieren. Zum einen sollten weitere prozess- und anwendungsscharfe empirische Erhebungen zu Lastflexibilisierungsparametern in hoher Detaillierung vorgenommen werden. Zum anderen sollte die Datenlage im GHD-Sektor sowie hinsichtlich der Aspekte Kosten und Zeitverfügbarkeiten durch anknüpfende Forschungen verbessert werden.

Die Ergebnisse der Metaanalyse werden seitens des Autors genutzt, um Parametrierungen für eine Analyse des volkswirtschaftlichen Lastflexibilisierungspotenzials abzuleiten, welche mit einem Fundamentalmodell des vortägigen Elektrizitätsmarkts erfolgt. Anknüpfend hieran sollen Fallstudien zur Quantifizierung einzelwirtschaftlicher Lastmanagementpotenziale und zur Kontrastierung mit der volkswirtschaftlichen Potenzialschätzung durchgeführt werden.

6 Literatur

- [1] G. Papaefthymiou, K. Grave und K. Dragoon, „Flexibility options in electricity systems“, Ecofys, Berlin, 2014.
- [2] S. Eisenhauer, M. Reichart, A. Sauer, S. Weckmann und F. Timmermann, „Energieflexibilität in der Industrie: Eine Metastudie“, EEP Universität Stuttgart, Stuttgart, Mai 2018.
- [3] M. Steurer, „Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung“. Dissertation, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017.
- [4] M. Klobasa *et al.*, „Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland: Endbericht“, Fraunhofer ISI, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft, Karlsruhe, München, Berlin, Aug. 2013.
- [5] T. Ladwig, „Demand Side Management in Deutschland zur Systemintegration erneuerbarer Energien“. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden, 2018.
- [6] H. C. Gils, „Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage“. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2015.
- [7] R. Apel *et al.*, „Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland (Gesamttext)“. Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt am Main, Juni 2012.
- [8] T. Buber, A. Gruber, M. Klobasa und S. v. Roon, „Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast“, *DIW Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung*, Jg. 82, Nr. 3, S. 89–106, 2013.
- [9] M. Klobasa, *Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz*. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2009.
- [10] A. Aryandoust und J. Lilliestam, „The potential and usefulness of demand response to provide electricity system services“, *Applied Energy*, Jg. 204, S. 749–766, 2017. Zugriff am: 18. Januar 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.034.
- [11] M. Stötzer, *Demand Side Integration in elektrischen Verteilnetzen: Potenzialanalyse und Bewertung*. Dissertation an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Magdeburg, 2012.
- [12] M. Schreiber, M. E. Wainstein, P. Hochloff und R. Dargaville, „Flexible electricity tariffs: Power and energy price signals designed for a smarter grid“, *Energy*, Jg. 93, S. 2568–2581, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.067.
- [13] L. Karg, K. Kleine-Hegermann, M. Wedler und C. Jahn, „E-Energy Abschlussbericht: Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Evaluation der sechs Leuchtturmprojekte“, B.A.U.M. Consult, München, Berlin, Mai 2014.
- [14] A. Löschel und M. Werthschulte, „Smart Energy zur Flexibilisierung und Senkung des Energieverbrauchs - Handlungsoptionen und offene Fragen“, *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Jg. 67, Nr. 8, 19-23, 2017.

- [15] M. Behrangrad, „A review of demand side management business models in the electricity market“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 47, S. 270–283, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.033.
- [16] C. Rehtanz *et al.*, „Teil A: Technisches Gutachten“ in *Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030.: dena-Verteilnetzstudie*, dena, Hg., Berlin, 2012, S. 19–250.
- [17] J. Matsumoto und Z. Wende, „New Demand Response Architecture for Stabilization of Power Quality in Smart Grid: School of Electrical & Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore“ in *9th International Conference on Information, Communications and Signal Processing (ICICSP), 2013*, Shangri-La Far Eastern Plaza Hotel, Tainan, Taiwan, 2013.
- [18] C. Duffer, A. Guminski, C. Orthofer und S. v. Roon, „Lastflexibilisierung in der Industrie - Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung“ in *10. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*, Wien, 2017.
- [19] A.-K. Blum und M. Braun, „Potentialanalyse für das Demand Side Management im deutschen Industriesektor und die Integration in die Stromwirtschaft“, *Karlsruher Hochschulschriften für Wirtschaftsingenieurwesen und International Management*, Nr. 1, 2013.
- [20] U. Focken, J. Bümmerstede und M. Klobasa, „Kurz- bis mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor: Öffentlicher Abschlussbericht“, Oldenburg, Karlsruhe, Mai 2011.
- [21] T. Gobmaier *et al.*, „Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens: im Auftrag von E.ON Energie, StMWFK und StMWIVT“, Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München, Juni 2012.
- [22] F. Grote, T. Drees, J. Budke und A. Moser, „Einfluss des Demand Side Managements auf den Kraftwerkseinsatz in Europa“, *et Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Jg. 63, Nr. 12, S. 32–36, 2013.
- [23] A.-M. Gruber, „Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien“. Dissertation, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Technische Universität München, München, 2017.
- [24] T. Haasz, „Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierenden Energiesystemmodell: Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte“. Dissertation, IER, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2017.
- [25] H.-M. Henning und D. U. Sauer, „Demand-Side-Management im Wärmemarkt: Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050““, Fraunhofer ISE; KIT; RWTH Aachen, München, Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, Nov. 2015.

- [26] N. Krzikalla, S. Achner und S. Brühl, „Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien“. Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie, BET, Bochum, BEE Plattform Systemtransformation, Apr. 2013.
- [27] T. Langrock *et al.*, „Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien: Im Auftrag des Umweltbundesamts“, BET, Trianel, Aachen, Dessau-Roßlau, Sep. 2015.
- [28] A. Liebe und M. Wissner, „Der flexible Verbraucher - Potenziale zur Lastverlagerung im Haushaltsbereich: Studie für das Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg und das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg“, WIK, Bad Honnef, März 2015.
- [29] J. P. Molly *et al.*, „dena-Netzstudie II: Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025“. Endbericht, EWI *et al.*, Berlin, Nov. 2010.
- [30] M. Paulus und F. Borggrefe, „The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany“, *Applied Energy*, Jg. 88, Nr. 2, S. 432–441, 2011. Zugriff am: 7. April 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.03.017.
- [31] C. Pellingner und T. Schmid, „Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030: Teil 2: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher“, FfE, München, Mai 2016. Zugriff am: 20. März 2019.
- [32] r2b, „Endbericht Leitstudie Strommarkt: Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen“. im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Köln, Juli 2014.
- [33] S. v. Roon und T. Gobmaier, „Demand Response in der Industrie: Status und Potenziale in Deutschland“, München, Dez. 2010.
- [34] I. Stadler, *Demand Response: Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien*. Zugl.: Kassel, Univ., Habil., 2006. Berlin: dissertation.de, 2006.
- [35] Z. A. Styczynski *et al.*, „Demand-Side-Management im Strommarkt: Technologiesteckbrief zur Analyse „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050““, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; RWTH Aachen, München, Energiesysteme der Zukunft, Nov. 2015.
- [36] M. Klobasa, „Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten“. Dissertation, ETH Zürich, Zürich, 2007.
- [37] Y. Scholz *et al.*, „Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung“, BMWI, DLR, Stuttgart, 2014.
- [38] A. Gruber, F. Biedermann, S. v. Roon und L. Carr, „Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse“ in *13. Symposium Energieinnovation*, Graz, 2014.

- [39] H. C. Gils, „Assessment of the theoretical demand response potential in Europe“, *Energy*, Jg. 67, S. 1–18, 2014. Zugriff am: 18. Januar 2019, doi: 10.1016/j.energy.2014.02.019.
- [40] H. C. Gils, „Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study“, *Applied Energy*, Jg. 162, S. 401–415, 2016. Zugriff am: 7. September 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.083.
- [41] P. Elsner, B. Erlach, M. Fishedick, B. Lunz und D. U. Sauer, „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge“. Analyse, Fraunhofer ICT, Wuppertal Institut, RWTH Aachen, acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München, Energiesysteme der Zukunft, Nov. 2015.
- [42] M. Steurer, N. Klemp, K. Hufendiek, B. Baumgart und B. Steinhausen, „Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland“, IER; Trianel, Stuttgart, Aachen, Nov. 2015.

7 Anhang

Tabelle 2: Ausgewertete Publikationen und vorgenommene Gruppierung

Autor und Jahr	Titel der Publikation	durchführende Institution	Publikationsgruppe
Apel et al. 2012 [7]	Demand Side Integration - Lastverschiebungspotenziale in Deutschland	VDE	1
Aryandoust et al. 2017 [10]	The potential and usefulness of demand response to provide electricity system services, in: Applied Energy, Vol. 2014, S. 749–766	ETH Zürich	2
Blum und Braun 2013 [19]	Potentialanalyse für das Demand Side Management im deutschen Industriesektor und die Integration in die Stromwirtschaft	Hochschule Karlsruhe - Technik und Wirtschaft	3
Buber et al. 2013 [8]	Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast	ISI; FfE	4
Focken et al. 2011 [20]	Kurz- bis mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor	energy & meteo; Fraunhofer ISI	5
Gruber et al. 2014 [38]	Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse	FfE	4
Gils 2014 [39]	Assessment of the theoretical demand response potential in Europe, in: Energies, Vol. 57, S. 1-18	DLR, Institut für Technische Thermodynamik	6
Gils 2015 [6]	Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage	DLR, Institut für Technische Thermodynamik	6
Gils 2016 [40]	Economic potential for future demand response in Germany – Modeling approach and case study, in: Applied Energy, Vol. 162, S. 401-415	DLR, Institut für Technische Thermodynamik	6
Gobmaier et al. 2012 [21]	Simulationsgestützte Prognose des elektrischen Lastverhaltens	FfE	7
Grote et al. 2013 [22]	Einfluss des Demand Side Managements auf den Kraftwerkseinsatz in Europa	IAEW (RWTH Aachen)	8
Gruber 2017 [23]	Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien (Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse)	FfE	9
Haasz 2017 [24]	Entwicklung von Methoden zur Abbildung von Demand Side Management in einem optimierenden Energiesystemmodell. Fallbeispiele für Deutschland in den Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte	IER	10
Henning und Sauer 2015 [25] (Elsner et al. 2015 [41])	Demand-Side Management im Wärmemarkt - Technologiesteckbrief zur Analyse "Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050"	Fraunhofer ISE; KIT; ISEA, RWTH Aachen	11
Klobasa 2007 [36] / Klobasa 2009 [9]	Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungs- technischen Kostengesichtspunkten	ISI	12
Klobasa et al. 2013 [4]	Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland	ISI; FfE	4
Krzikalla et al. 2013 [26]	Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien	BET	13

Autor und Jahr	Titel der Publikation	durchführende Institution	Publikationsgruppe
Ladwig 2018 [5]	Demand Side Management in Deutschland zur Systemintegration erneuerbarer Energien	EE ² TU Dresden	14
Langrock et al. 2015 [27]	Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien	BET; Trianel	15
Liebe und Wissner 2015 [28]	Der flexible Verbraucher - Potenziale zur Lastverlagerung im Haushaltsbereich	WIK	16
Molly et al. 2010 [29]	dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025	EWI; IWES; FH Köln; Uni Kassel	17
Paulus und Borggrefe 2011 [30]	The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany	EWI	18
Pellinger und Schmid 2016 [31]	Verbundforschungsvorhaben Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030, Teil 2: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher	FfE	19
r2b 2014 [32]	Endbericht Leitstudie Strommarkt. Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen	r2b	20
Roon und Grobmaier 2010 [33]	Demand Response in der Industrie - Status und Potenziale in Deutschland	FfE	21
Scholz et al. 2014 [37]	Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschieb-bare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung	DLR	6
Stadler 2006 [34]	Demand Response - Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien	Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik	22
Steurer et al. 2015 [42]	Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland	IER; Trianel	23
Steurer 2017 [3]	Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung	IER	23
Styczynski und Sauer 2015 [35] (Elsner et al. 2015 [41])	Demand-Side Management im Strommarkt - Technologiesteckbrief zur Analyse "Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050"	Institut für Elektrische Energiesysteme, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg; ISEA, RWTH Aachen	24

Tabelle 3: Lagemaße für das durchschnittliche positive Lastmanagementpotenzial im Industriesektor im Status quo (gerundete Werte in MW; Abbildung 3)

	AL	CL	HS	PA	ES	ZM	AP	BL	CaC ₂	PK	DL	GL	KA	GU	PM
Anz.	13	11	12	7	14	12	5	13	4	12	3	3	9	3	3
MW	506	558	236	1.050	871	294	523	157	50	463	607	25	13	115	160
Std.	308	274	58	688	200	107	167	306	32	507	865	10	33	86	11
Min.	148	64	133	110	400	45	391	6	12	200	0	15	0	29	149
25%	277	475	208	508	750	248	400	6	32	270	112	20	0	72	155
Med.	484	556	234	1.214	854	313	449	22	51	326	224	25	0	115	160
75%	842	622	251	1.656	1.018	351	588	147	69	378	911	30	0	158	166
Max.	983	1.149	357	1.700	1.166	424	785	1.075	87	2.050	1.598	35	99	201	171

Datenquellen: [3, S. 171-174, 182-195, 223]; [5, S. 205]; [6, S. 196]; [7, S. 37, 41, 46-47, 50, 57, 111-113]; [8, S. 92]; [9, S. 53-67, 69]; [20, S. 33-34, 38, 47]; [22, S. 33]; [23, S. 57, 60, 94]; [27, S. 123, 133-134]; [29, S. 422-425, 460, 525-527]; [30, S. 434-435]; [31, S. 213-214, 216-217]; [32, S. 54]; [33, S. 15]; [34, S. 94-95, 162]; eigene Berechnungen

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Prozesse und Querschnittstechnologien: AL: Primäraluminiumelektrolyse; CL: Chlor-Alkali-Elektrolyse; HS: Holzstoffherstellung; PA: Papiermaschinen; ES: Elektrostahlherstellung; ZM: Zementherstellung; AP: Altpapieraufbereitung; BL: Belüftung gesamt; CaC₂: Calciumcarbidherstellung; PK: Prozesskälte gesamt; DL: Druckluft gesamt; GL: Glasindustrie (gesamt); KA: Klimaanlage; GU: Guss (Aluminium, Eisen); PM: Primärmetalle (Zink, Kupfer, Silizium, Graphit)

Tabelle 4: Lagemaße für die Verschiebedauern im Industriesektor im Status quo (gerundete Werte in h; Abbildung 4)

	AL	CL	HS	PA	ES	ZM	LZ	PI	AP	KU	ZI	CaC ₂	PK LM	GL	GU	PM
Anz.	12	13	13	9	12	13	5	3	9	3	3	9	3	6	6	6
MW	3,1	3,8	9,9	13,0	1,7	19,3	13,6	1,2	9,8	0,0	0,0	10,7	10,7	10,7	5,5	5,9
Std.	2,6	4,1	9,9	10,4	1,9	19,3	15,6	1,0	11,9	0,0	0,0	11,4	11,7	2,6	1,2	1,6
Min.	0,0	0,0	1,5	4,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	3,4	2,0	6,4	3,3	3,2
25%	0,0	0,0	4,0	6,6	0,0	4,0	4,0	0,8	4,0	0,0	0,0	4,8	4,0	10,6	5,2	5,1
Med.	3,9	2,0	7,8	11,2	1,0	21,4	4,0	1,5	4,3	0,0	0,0	6,0	6,0	11,0	6,0	6,9
75%	5,1	5,8	10,8	11,2	2,7	24,0	24,0	1,8	5,9	0,0	0,0	6,2	15,0	11,0	6,0	7,0
Max.	6,1	10,4	36,0	36,0	4,7	72,0	36,0	2,0	36,0	0,0	0,0	36,0	24,0	14,4	6,5	7,0

Datenquellen: [3, S. 202]; [5, S. 23]; [10, S. 752]; [22, S. 33]; [29, S. 424, 460]; [30, S. 435]; [31, S. 213]; [37, S. 50, 175]

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Prozesse und Querschnittstechnologien: AL: Primäraluminiumelektrolyse; CL: Chlor-Alkali-Elektrolyse; HS: Holzstoffherstellung; PA: Papiermaschinen; ES: Elektrostahlherstellung; ZM: Zementherstellung; LZ: Luftzerlegung; PI: Papierindustrie (gesamt); AP: Altpapieraufbereitung; KU: Primärkupferherstellung; ZI: Zinkelektrolyse; CaC₂: Calciumcarbidherstellung; PK LM: Prozesskälte Lebensmittelindustrie; GL: Glasindustrie (gesamt); GU: Guss (Aluminium, Eisen); PM: Primärmetalle (Zink, Kupfer, Silizium, Graphit)

Tabelle 5: Lagemaße für das durchschnittliche negative Lastmanagementpotenzial im Haushaltssektor im Status quo (gerundete Werte in MW; Abbildung 5)

	KS	GS	TR	WM	KA	WP	NSp	KG	WW	GG	UP	Weiß
Anz.	14	12	12	12	12	13	14	4	15	14	11	3
MW	-286	-1.856	-2.405	-2.499	-861	-548	-3.512	-740	-1.744	-141	-96	-8.401
Std.	445	4.416	6.418	7.016	600	478	7.474	277	2.326	203	319	9.243
Min.	-1.368	-15.863	-22.743	-24.770	-2.620	-1.333	-21.000	-980	-8.507	-530	-1.058	-19.070
25%	-500	-619	-629	-510	-748	-1.067	-1.823	-980	-2.522	-300	0	-11.185
Med.	0	-485	-359	-380	-748	-637	0	-740	-754	0	0	-3.300
75%	0	-485	-359	-380	-748	0	0	-500	-174	0	0	-3.066
Max.	0	-485	-359	-380	0	0	0	-500	-174	0	0	-2.832

Datenquellen: [3, S. 171-174, 184-195]; [6, S. 197]; [7, S. 97-98]; [22, S. 33]; [24, S. 74, 76-77, 81]; [28, S. 22, 27]; [29, S. 414-418]; [31, S. 109, 112, 142]; [34, S. 114, 116, 169]; [35, S. 13, 15, 17-18, 20, 22]; eigene Berechnungen

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Haushaltsanwendungen: KS: Kühlschrank; GS: Geschirrspüler; TR: Trockner; WM: Waschmaschine; KA: Klimaanlage; WP: Wärmepumpen; NSp: Nachtspeicher; KG: Kühl- / Gefrierkombination; WW: Warmwasser; GG: Gefriergerät; UP: Umwälzpumpen; Weiß: Weiße Ware (ohne Kühlung) gesamt

Tabelle 6: Lagemaße für die spezifischen Investitionsausgaben im Haushaltssektor im Status quo (gerundete Werte in €₂₀₁₈/kW; Abbildung 6)

	KS	GS	TR	WM	KA	WP	NSp	WW	GG	UP
Anz.	5	4	4	4	4	5	7	9	4	7
MW	972	77	77	77	174	36	27	300	351	1.961
Std.	1.433	32	32	32	58	75	15	383	650	3.010
Min.	58	31	31	31	131	0	2	21	23	131
25%	64	70	70	70	142	0	22	40	25	153
Med.	71	88	88	88	153	0	26	146	27	260
75%	1.325	95	95	95	185	9	35	475	353	2.578
Max.	3.341	102	102	102	260	170	47	1.200	1.325	7.874

Datenquellen: [3, S. 171-174, 184-195]; [5, S. 30]; [6, S. 106]; [29, S. 427, 532]; [35, 14, 16-17, 19, 21-23]; eigene Berechnungen

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Haushaltsanwendungen: KS: Kühlschrank; GS: Geschirrspüler; TR: Trockner; WM: Waschmaschine; KA: Klimaanlage; WP: Wärmepumpen; NSp: Nachtspeicher; WW: Warmwasser; GG: Gefriergerät; UP: Umwälzpumpen

Tabelle 7: Lagemaße für die Projektion der durchschnittlichen positiven schaltbaren Leistungen im Haushaltssektor (gerundete Werte in MW; Abbildung 7)

	Status quo				2020				2025			
	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	WP	NSp
Anz.	14	12	13	14	12	12	13	13	9	9	9	9
MW	1.075	1.343	754	2.797	1.006	2.267	1.647	2.332	935	3.201	1.430	2.366
Std.	350	698	510	1.865	158	1.929	1.537	1.548	0	0	703	1.257
Min.	500	0	0	0	554	0	0	0	935	3.201	676	860
25%	820	1.496	448	1.285	1.035	2.154	640	1.040	935	3.201	676	860
Med.	1.317	1.496	722	2.215	1.080	2.154	1.255	2.000	935	3.201	1.326	2.482
75%	1.317	1.496	878	3.704	1.080	2.154	2.168	3.000	935	3.201	2.289	3.757
Max.	1.317	2.620	1.516	5.607	1.080	7.800	5.950	4.542	935	3.201	2.289	3.757

	2030				2035				2040			
	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	KS	KA	KS	KA	KS	KA
Anz.	11	12	11	12	9	9	9	9	9	9	9	9
MW	830	4.635	1.993	1.519	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
Std.	59	2.850	2.213	1.144	0	0	0	0	0	0	0	0
Min.	803	0	0	0	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
25%	803	4.907	721	693	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
Med.	803	4.907	1.413	1.535	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
75%	803	4.907	2.441	2.257	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790
Max.	950	11.420	8.200	3.028	764	5.790	764	5.790	764	5.790	764	5.790

	2045				2050			
	KS	KA	WP	NSp	KS	KA	WP	NSp
Anz.	9	9	9	9	9	10	9	10
MW	698	8.063	1.961	388	672	8.206	2.197	232
Std.	0	0	963	206	0	2.860	1.080	124
Min.	698	8.063	927	141	672	66	1.039	77
25%	698	8.063	927	141	672	9.111	1.039	113
Med.	698	8.063	1.817	407	672	9.111	2.037	222
75%	698	8.063	3.138	617	672	9.111	3.517	336
Max.	698	8.063	3.138	617	672	9.111	3.517	412

Datenquellen: [3, S. 171-174, 184-195]; [6, S. 196]; [7, S. 97-98]; [9, S. 85]; [21, S. 90-91]; [22, S. 33]; [24, S. 74]; [26, S. 33-34]; [28, S. 22, 27]; [29, S. 414-415, 417]; [31, S. 100, 109, 112]; [34, S. 114]; [35, S. 13, 18]; [37, S. 158, 160, 162]; eigene Berechnungen

Anz.: Anzahl; MW: arithmetischer Mittelwert; Std.: Standardabweichung; Min.: Minimum; 25%: unteres Quartil; Med.: Median; 75%: oberes Quartil; Max.: Maximum

Abkürzungen für Haushaltsanwendungen: KS: Kühlschranks; KA: Klimaanlage; WP: Wärmepumpen; NSp: Nachtspeicher