

Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung

Christa Dufter¹⁽¹⁾ Andrej Guminski¹⁽¹⁾, Clara Orthofer²⁽²⁾, Serafin von Roon¹⁽¹⁾,
Anna Gruber¹⁽¹⁾

⁽¹⁾ Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Am Blütenanger 71, 80995 München,
+49 89 158121-37, cdufter@ffe.de, www.ffegmbh.de

⁽²⁾ Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München
+49 89 289-23943, clara.orthofer@tum.de, www.ewk.ei.tum.de

Kurzfassung:

Der kontinuierlich wachsende Anteil Erneuerbarer Energien bedeutet neue Herausforderungen für das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch. Während bisher vorrangig Anpassungen der Erzeugung vorgenommen wurden, wird künftig die Anpassung der Verbrauchsseite an Bedeutung gewinnen. Insbesondere industrielle Anlagen können hier einen Beitrag leisten. In verschiedenen Studien wurden bereits die Potenziale energieintensiver Prozesse untersucht. Allerdings zeigen sich hier Unstimmigkeiten über die genaue Höhe dieser Potenziale. Diese sind vorrangig in der Wahl unterschiedlicher Methoden und Annahmen begründet. In dieser Studie wird daher eine Metastudienanalyse durchgeführt, um relevante Aspekte bei der Erhebung von Flexibilitätspotenzialen zu identifizieren und geeignete Lösungen zu entwickeln.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03SFK300 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Keywords: Lastflexibilisierung, Demand Side Management, Demand Response, Flexibilitätspotenziale, strom- / energieintensive Prozesse, energieintensive Industrie, Metastudienanalyse

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Durch den steigenden Anteil Erneuerbarer Energien gewinnt die Lastflexibilisierung in der Industrie als Möglichkeit den Stromverbrauch an die Erzeugung anzupassen zunehmend an

¹ Jungautor

Bedeutung. Es existiert bereits eine Vielzahl an Studien, die entsprechende Potenziale verschiedener Branchen untersuchen. Allerdings werden hier teilweise deutliche Streuungen bei den ausgewiesenen Potenzialen ersichtlich. Gründe hierfür sind die Anwendung unterschiedlicher Methoden sowie ein fehlendes übereinstimmendes Verständnis zentraler Potenzialbegriffe. Aufbauend auf einer Metastudienanalyse werden daher einheitliche Definitionen relevanter Begrifflichkeiten sowie eine transparente Methode zur Potenzialerhebung ausgearbeitet. Fokus der vorliegenden Studie sind bedeutende Prozesse der Grundstoffindustrie. Die entwickelte Methodik soll jedoch sowohl auf andere Branchen als auch auf Querschnittstechnologien übertragbar sein.

2 Methodische Vorgehensweise

Zu Beginn werden wesentliche Kriterien festgelegt, die es bei der Entwicklung einer Methode zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen zu beachten gilt. Im Rahmen der Metastudienanalyse werden die verwendeten Methoden von 28 Studien analysiert (siehe Tabelle 2). In einem ersten Schritt werden die ausgewiesenen Flexibilitätspotenziale der verschiedenen Branchen bzw. Prozesse verglichen. Die Darstellung als Boxplot in Abbildung 1 zeigt die deutliche Streuung der angegebenen Potenziale. Gründe hierfür sind unterschiedliche Annahmen und methodische Herangehensweisen sowie ein fehlendes einheitliches Verständnis relevanter Begrifflichkeiten.

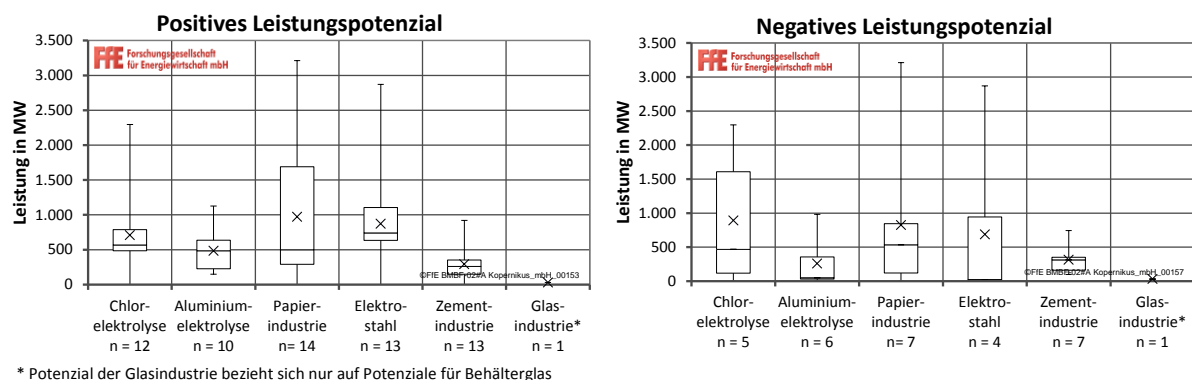


Abbildung 1: Flexibilitätspotenziale der analysierten Studien dargestellt als Boxplot² (eigene Darstellung auf Basis von [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14])

Daher werden im zweiten Schritt acht relevante Problemfelder identifiziert, anhand derer die Methoden zur Potenzialerhebung im Detail verglichen werden. Der Fokus liegt hierbei auf den stromintensiven Prozessen. Einige Studien erheben zusätzlich Potenziale für Querschnittstechnologien, die angewendeten Methoden werden jedoch nicht näher betrachtet. Um die weitere eingehende Analyse zu ermöglichen, wird der Vergleich auf 14 Studien beschränkt. Hieraus ergeben sich teilweise deutliche Unterschiede zwischen den methodischen Ansätzen der einzelnen Studien. Das Ziel der dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Studie ist daher die Entwicklung einer transparenten und einheitlichen Methodik zur Erhebung von Lastflexibilisierungspotenzialen.

² n entspricht der Anzahl an berücksichtigten Studien je Branche / Prozess.

2.1 Kriterien für die Methodik zur Potenzialerhebung

Bei der Entwicklung der Methodik werden insbesondere folgende drei Kriterien beachtet:

- Vorrangiges Ziel ist die branchenübergreifende Anwendbarkeit. Der Fokus der Metastudienanalyse liegt zwar auf Studien zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen in der Grundstoffindustrie, die entwickelte Methodik ist jedoch auch für andere Branchen sowie für Querschnittstechnologien anwendbar.
- Ein hohes Maß an Transparenz wird durch die eindeutige Definition und Abgrenzung relevanter Begrifflichkeiten sowie die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise garantiert.
- In allen Schritten der Methodenentwicklung wird auf die Ausrichtung der Ergebnisse auf die Zielgruppe geachtet. Hier stehen besonders die Politik sowie Entwickler von Simulationsmodellen im Vordergrund. Aber auch einzelne Betriebe der analysierten Branchen, welche ihre Flexibilität vermarkten wollen, sollen bei der Bestimmung ihrer Potenziale unterstützt werden.

2.2 Metastudienanalyse

Grundlage für die Metastudienanalyse bildet die Identifikation relevanter Aspekte, anhand derer die Methoden zur Potenzialerhebung verglichen werden. Die Auswahl dieser Aspekte basiert zum einen auf ihrer Relevanz für die Höhe der ausgewiesenen Potenziale. Zum anderen ergibt sie sich aus der Identifikation von Unterschieden und Widersprüchen zwischen den Methoden der untersuchten Studien. Diese Unterschiede umfassen ferner Unsicherheiten aufgrund von fehlender oder unzureichender Beschreibung der verwendeten Methode bzw. einzelner Teilschritte derselben. Letztendlich ergeben sich die folgenden acht Aspekte:

Tabelle 1: Übersicht über identifizierte Problemfelder und deren Fragestellungen

Problemfelder		Entscheidende Fragestellungen
Potenzialbegriffe		Welche Potenzialbegriffe werden verwendet?
Erhobene Parameter		Welche Parameter werden für die Bestimmung der verschiedenen Potenziale erhoben?
Art der Laständerung		Wird zwischen Lastreduktion und -erhöhung unterschieden? Wird die Option „Produktionsausfall“ mit berücksichtigt oder wird die uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung gesetzt?
Betrachtungszeitraum		Werden Potenziale auf Basis der heute installierten Anlagen erhoben oder werden zukünftige Entwicklungen berücksichtigt?
Art und Bilanzraum der Datenerhebung		Werden Potenziale für gesamte Industrien oder separat für einzelne Prozesse erhoben?
Bilanzraum ausgewiesener Potenziale		Werden die erhobenen Potenziale für einzelne Prozesse oder gesamte Industrien ausgewiesen?
Berechnungsmethode		Erfolgt eine Hochrechnung der erhobenen Potenziale? Auf welcher Basis erfolgt diese?
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Werden Potenziale auf Basis techno-ökonomischer Randbedingungen (bspw. für verschiedene Vermarktungsoptionen) separat erhoben?
	Zeitlich	Wird unterschieden wann Potenziale zur Verfügung stehen?
	Örtlich	Werden Potenziale georeferenziert erhoben?

Für den detaillierten Vergleich der Methoden zur Potenzialerhebung werden 14 Studien ausgewählt. Für die Auswahl sind zwei Kriterien entscheidend. Zum einen werden nur Studien aufgenommen, deren Fokus explizit auf der Erhebung von Potenzialen und nicht auf Marktsimulationen, bei denen Flexibilitätspotenziale nur einen kleinen Teil ausmachen, liegt. Zum anderen muss ein ausreichender Informationsgehalt gegeben sein, der eine detaillierte Analyse erlaubt. Hieraus ergibt sich, dass nicht alle Studien, deren Potenziale in Abbildung 1 enthalten sind, in die umfassenden Metastudienanalyse aufgenommen werden. Der Vergleich der Studien anhand der identifizierten Problemfelder ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Vielzahl verschiedener Potenzialbegriffe

Insgesamt werden in den analysierten Studien 15 verschiedene Potenzialbegriffe verwendet. Diese lassen sich folgendermaßen zusammenfassen: theoretische Größen, Berücksichtigung von technischen, wirtschaftlichen und sozialen Aspekten, realisierte Potenziale sowie verschiedene Mischformen. Letztendlich ergeben sich hieraus vor allem fünf Probleme.

Erstens werden für gleiche Potenziale unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Dies wird besonders deutlich bei Potenzialen, welche wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Hier existieren die Begriffe wirtschaftlich, wirtschaftlich realisierbar, ökonomisch und ökonomisch nutzbar, welche synonym verwendet werden [1, 2, 4, 7, 8, 12, 14, 15, 16, 17].

Zweitens definieren einzelne Studien eigene Potenziale, die in dieser Form in anderen Studien nicht erfasst werden. So lässt sich aufgrund der erhobenen Parameter darauf schließen, dass das in [12] erhobene soziotechnische Potenzial zwischen dem technischen und realisierbaren Potenzial aus [4, 7, 16] einzuordnen ist. Diese spezifischen Potenzialbegriffe sind allerdings nur begrenzt vergleichbar.

Drittens werden identische Bezeichnungen verwendet, aber bei der Potenzialerhebung unterschiedliche Aspekte berücksichtigt bzw. Annahmen zugrunde gelegt. [15] versteht unter technischem Potenzial, dasjenige welches unter Berücksichtigung der Anlagencharakteristik realisiert werden kann. In [12] wird es hingegen weiter eingeschränkt, da die Laständerung für eine Abrufdauer von mindestens einer Stunde möglich sein muss. In [13] werden hingegen technisches und theoretisches Potenzial gleichgesetzt. Das fehlende einheitliche Verständnis bezüglich der Begrifflichkeiten erschwert die Vergleichbarkeit der ausgewiesenen Potenziale zwischen den Studien.

Viertens enthalten nicht alle Studien vollständige Definitionen der erhobenen Potenziale bzw. Informationen über berücksichtigte Aspekte. So wird beispielsweise in [11, 13] festgehalten, dass das technische Potenzial untersucht wird, eine genaue Definition oder Angaben zu berücksichtigten Aspekten fehlen hingegen.

Fünftens existiert kein einheitliches Verständnis bezüglich der Beziehungen der einzelnen Potenzialbegriffe untereinander. In [12, 14, 15] ergeben sich die einzelnen Potenziale jeweils als Teilmengen übergeordneter Potenziale. [16] definiert sowohl das wirtschaftliche als auch das akzeptierte Potenzial als Teilmenge des technischen Potenzials. Das realisierbare Potenzial ergibt sich dann wiederum aus der Schnittmenge dieser beiden. Werden Potenziale nur aus Teilmengen übergeordneter Potenziale gebildet, kann beispielsweise der

Fall eines wirtschaftlichen Potenzials, welches aufgrund regulatorischer Hemmnisse (noch) nicht umgesetzt werden kann, nicht dargestellt werden.

Kein einheitliches Verständnis und Intransparenz bezüglich zu erhebender Parameter

Die abweichenden Definitionen der verschiedenen Potenzialbegriffe deuten bereits darauf hin, dass bei der Erhebung der entsprechenden Potenziale unterschiedliche Parameter berücksichtigt werden. Vereinfachend können die relevanten Parameter in folgende Gruppen zusammengefasst werden: Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Speicherdaten, Kosten, Erlöse sowie weiche Faktoren. Da nicht immer detaillierte Informationen zu den erhobenen Parametern bereitgestellt werden, ist eine genauere Gruppierung nicht möglich. Stromverbrauchsdaten und technische Kennzahlen sind in fast allen Studien Gegenstand der Untersuchung. Auch Kosten und weiche Faktoren werden häufig erhoben. Daten zu Speichern und Erlösen werden hingegen lediglich in je einer Studie abgefragt. Diese Unterschiede beruhen letztendlich darauf, welche Art von Potenzial – technisch, wirtschaftlich etc. – erhoben wird.

Maßgeblich ist darüber hinaus auch, inwiefern die betreffenden Studien genaue Informationen zu den einzelnen erhobenen Parametern oder lediglich ungefähre Angaben zu Parametergruppen enthalten. In [12, 18] ist der jeweils verwendete Fragebogen im Anhang verfügbar. [1, 4, 6, 7, 16] stellen zwar keinen Fragebogen zur Verfügung, es sind jedoch Informationen zu den erhobenen Parametern in Form von Auflistungen oder Erläuterungen enthalten. Die Notwendigkeit zur Angabe erhobener Parameter ist auch durch die Methode der Potenzialerhebung bedingt. Werden beispielsweise eine Metaanalyse oder Hochrechnung vorheriger Studienergebnisse durchgeführt, sind genaue Angaben zu erhobenen Parametern nicht notwendig bzw. möglich [2, 15]. Die übrigen fünf analysierten Studien enthalten indessen keine oder nur begrenzte Informationen [8, 11, 13, 14, 17]. Dies schränkt die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der angewandten Methoden ein.

Art der Laständerung

Bei den Arten der Laständerung, welche in den analysierten Studien untersucht werden, sind zwei kritische Aspekte erkennbar. Zum einen wird nicht immer klar zwischen Potenzialen der Lastreduktion und Lasterhöhung unterschieden. [2, 6] fassen diese unter Potenzialen für Lastverschiebung, Lastmanagement oder ähnlichen Begriffen zusammen. Aus dem Kontext wird klar, dass es sich hier um Potenziale zur Lastverschiebung handelt, bei der die Last zunächst reduziert wird und dann eine Phase des Ausgleichs durch entsprechende Lasterhöhung erfolgt. Potenziale für Lasterhöhung werden somit nicht angegeben. [18] weisen Verschiebepotenziale aus, wobei es sich letztendlich um Potenziale zur Lastreduktion handelt. [4, 7, 17] begrenzen ihre Analyse auf Potenziale zur Lastreduktion. Die übrigen Studien differenzieren zwischen Lastreduktion und -erhöhung.

Zum anderen unterscheiden sich die analysierten Studien inwiefern mögliche Produktionsausfälle aufgrund von Lastreduktion berücksichtigt werden. [1, 16, 18] weisen ein technisches Potenzial aus, welches den Produktionsausfall explizit zulässt. Die in [11, 13] ausgewiesenen Potenziale beinhalten ebenfalls den Produktionsausfall, was sich in diesen beiden Fällen jedoch nur aus dem Kontext ergibt. [2, 4, 7, 17] setzen die weitgehend uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung und schließen somit den

Produktionsausfall bei der Potenzialerhebung eindeutig aus. In [6, 12³, 15] werden die Fälle mit und ohne Produktionsausfall untersucht und die entsprechenden Potenziale separat ausgewiesen. [8, 14] gehen hingegen nicht darauf ein wie bei der Potenzialerhebung mit möglichen Produktionsausfällen durch Lastreduktion umgegangen wird. Die analysierten Studien wählen folglich unterschiedliche Ansätze inwiefern ein möglicher Produktionsausfall berücksichtigt wird.

Betrachtungszeitraum

Die Frage, ob die Erhebung auf Basis heute installierter Anlagen erfolgt oder ob zukünftige technische Entwicklungen mit berücksichtigt werden, hat erheblichen Einfluss auf die ausgewiesenen Potenziale. [1, 11, 12, 15, 16] geben explizit an, dass die ausgewiesenen Potenziale eine Momentaufnahme auf Basis aktuell installierter Anlagen darstellen. Zukünftige Flexibilitätspotenziale, welche erst durch technische Weiterentwicklungen oder Veränderungen an Prozessen und Anlagen möglich werden, sind somit nicht Gegenstand der Untersuchung. [18] unterscheiden drei Fälle: Potenziale, die bereits heute genutzt werden können, solche, welche nur durch Neuerrichtungen von Anlagen oder Erneuerung wesentlicher Anlagenteile gehoben werden können und solche, die erst mittel- bis langfristig zur Verfügung stehen, da weiterer Forschungsbedarf oder die Errichtung von Demonstrationsanlagen notwendig sind. In [6] werden über die Entwicklung der spezifischen Verbräuche und Produktionsmengen zukünftige Potenziale für 2020, 2025 und 2030 berechnet. In den übrigen Studien werden keine direkten Angaben diesbezüglich gemacht. Allerdings lässt sich meist aus dem Kontext ableiten, dass sich die Erhebungen ebenfalls auf aktuelle Potenziale beziehen. In einigen Fällen werden Potenziale aus Stromverbräuchen und installierten Leistungen bestimmter Jahre abgeleitet. In anderen Fällen lässt die Durchführung von Befragungen darauf schließen, dass der Erhebung Anlagen, welche dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, zugrunde gelegt werden. Wird bei Befragungen nicht explizit erwähnt, dass auch technische Weiterentwicklungen mit einbezogen werden, kann davon ausgegangen werden, dass dies nicht der Fall ist. Nichtsdestotrotz werden diese Rückschlüsse nur auf Basis der veröffentlichten Dokumente getroffen und es bleibt offen, ob die analysierten Studien tatsächlich identische Annahmen über den technischen Ausstattungsgrad der installierten Anlagen treffen.

Art und Bilanzraum der Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgt in den analysierten Studien auf drei Arten: bottom-up, in einer Kombination aus top-down und bottom-up oder auf Basis einer Metaanalyse. Die gewählte Art der Datenerhebung beeinflusst die Höhe der ausgewiesenen Potenziale, da unterschiedliche Aspekte Eingang in die Erhebung finden. [6, 8, 12, 16, 18]⁴ wählen einen bottom-up Ansatz. Hierzu werden telefonische oder Vor-Ort-Befragungen von Experten und Unternehmen durchgeführt. In den beiden Studien der FfE [6, 16] fließen zudem Datenauswertungen aus Begehungen ein. Die ausgewiesenen Potenziale werden dann

³ In [12] wird der Produktionsausfall bei der Erhebung des technischen Potenzials berücksichtigt. Beim soziotechnischen Potenzial wird hierauf hingegen verzichtet.

⁴ Der Fokus der Potenzialerhebung liegt in dieser Studie auf dem bottom-up Ansatz. Allerdings wird zunächst zusätzlich eine grobe Abschätzung der Flexibilitätspotenziale über einen top-down Ansatz durchgeführt.

durch entsprechende Aggregation der Daten bestimmt. In [1, 2, 4, 7⁵, 11, 13] werden die Flexibilitätspotenziale in einer Kombination aus top-down und bottom-up Ansatz erhoben. In einem ersten Schritt wird hierbei top-down der mittlere Leistungsbedarf ermittelt. Hierzu wird über Tonnage und spezifischen Verbrauch der Jahresstromverbrauch berechnet. Unter Berücksichtigung der Volllaststunden ergibt sich hieraus der mittlere Leistungsbedarf. In einem zweiten Schritt wird dann durch Multiplikation mit dem flexibilisierbaren Anteil das Flexibilitätspotenzial bestimmt. Dieser flexibilisierbare Anteil stammt aus Befragungen und wird somit bottom-up bestimmt. Eine Metaanalyse zur Potenzialerhebung wird in [15] angewendet. Zu diesem Zweck werden Potenziale aus drei Studien nach ihrer Umsetzbarkeit kategorisiert und um Expertenschätzungen ergänzt. Eine genaue Beschreibung wie die Daten bzw. Potenziale aus den drei entsprechenden Studien in die Berechnung der ausgewiesenen Potenziale einfließen ist in dieser Studie nicht enthalten. In [14] ist die Art der Datenerhebung nicht eindeutig bestimmbar. Vermutlich ergeben sich die Potenziale ebenfalls aus der Aggregation von Daten vorrangiger Studien, da nicht auf Ergebnisse der selbst durchgeführten Befragung verwiesen wird.

Der Bilanzraum ergibt sich größtenteils bereits implizit aus der Art der Datenerhebung. In den Studien, welche einen bottom-up Ansatz über eine Befragung wählen, ist der Bilanzraum der Prozess bzw. die Anlage des betreffenden Betriebs. Wird hingegen eine Kombination aus top-down und bottom-up verfolgt, ist der zugehörige Bilanzraum der Prozess im gesamten Untersuchungsgebiet, also in den meisten Fällen ganz Deutschland. Der mittlere Leistungsbedarf ergibt sich hierbei aus den deutschlandweiten Produktionsmengen, dem durchschnittlichen spezifischen Stromverbrauch und den Betriebsstunden. Nur die Ermittlung des flexibilisierbaren Anteils bezieht sich auf die Befragung einzelner Betriebe.

Bilanzraum ausgewiesener Potenziale

Zusätzlich zum Bilanzraum der Datenerhebung sind auch beim Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale Diskrepanzen erkennbar. Mögliche Ausprägungen sind hier einzelne Prozesse, Branchen sowie die energieintensive Industrie als Ganzes. [1, 2, 6, 7, 16] wählen den engsten Bilanzraum und geben die erhobenen Potenziale auf Prozessebene – beispielsweise für die Aluminiumelektrolyse – an. Letztere Studie bildet hier noch einmal eine Ausnahme, da nicht das deutschlandweit hochgerechnete Potenzial des Prozesses, sondern das Potenzial eines einzelnen typischen Prozesses bzw. einer typischen Anlage ausgewiesen wird. Auch in [12] ist der Bilanzraum der ausgewiesene Prozess. Allerdings werden hier aus Datenschutzgründen die Potenziale einzelner Prozesse (z. B. Aluminiumelektrolyse und Luftzerlegung) zusammengefasst. Den weitesten Bilanzraum setzt [15]. Hier werden die erhobenen Potenziale aus der Metaanalyse auf Sektoren aggregiert und so lediglich ein Potenzial für die gesamte energieintensive Industrie angegeben. In den übrigen Studien ist der Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale die jeweilige Branche – beispielsweise die Chemieindustrie.

Auch in diesem Fall erschwert die Wahl unterschiedlicher Bilanzräume die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Darüber hinaus zeigt der Vergleich, dass der Bilanzraum der Datenerhebung und der Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale in einigen Fällen nicht

⁵ Die Potenziale werden top-down erhoben und anschließend bottom-up (durch Befragung) validiert.

übereinstimmen. Es ist fraglich, inwiefern eine Datenerhebung auf Prozessebene eine Hochrechnung der entsprechenden Potenziale auf eine gesamte Branche überhaupt zulässt. Wird beispielsweise das Potenzial des Holzschleifers untersucht und dieses dann auf die gesamte Papierindustrie übertragen, so ist dies als obere Grenze zu verstehen.

Berechnungsmethode

Die Berechnungsmethode gibt an, wie die erhobenen Potenziale hochgerechnet bzw. skaliert werden. Hierbei sind zwei Aspekte maßgeblich: die Basis sowie die Kennzahl, über die hochgerechnet wird.

[4, 7] wählen einen top-down Ansatz, wodurch eine Hochrechnung der erhobenen Potenziale nicht notwendig ist. Die Berechnungen in [14] basieren auf den deutschlandweiten Potenzialen vorangegangener Studien. Auch hier bedarf es folglich keiner Hochrechnung der Potenziale. In [15] wird die Vorgehensweise umgekehrt. Das deutschlandweite Potenzial wird auf Basis dreier Studien ermittelt und dann über Produktionskapazitäten auf Nordrhein-Westfalen skaliert. Schließlich wird in [16] ganz auf eine Hochrechnung verzichtet und das Flexibilitätspotenzial für einen typischen Prozess bzw. eine typische Anlage ausgewiesen. In jener Studie wird insbesondere auf die Schwierigkeiten bei der Hochrechnung aus Erhebungen einer ausgewählten Stichprobe eingegangen. Enthält die Stichprobe hauptsächlich Unternehmen, die sich bereits in der Vermarktung befinden, so besteht die Gefahr einer Überschätzung der Flexibilitätspotenziale. Es ist anzunehmen, dass sich zunächst Unternehmen mit vergleichsweise niedrigen Implementierungs- und Betriebskosten bzw. hohen Erlösen zur Vermarktung entschließen. Diese Unternehmen sind jedoch höchstwahrscheinlich nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Industriebetriebe. Wird die Stichprobe jedoch von Unternehmen dominiert, die noch nicht an einer Vermarktung teilnehmen, so ist eine Unterschätzung der Potenziale zu erwarten. Es wird angenommen, dass im Verlauf der Implementierung von Flexibilisierungsmaßnahmen weitere Potenziale aufgedeckt werden, welche die erste Einschätzung der Unternehmen übersteigen. Letztendlich können insbesondere Hochrechnungen aus kleinen Stichproben zu verfälschten Ergebnissen führen.

Die übrigen Studien rechnen die erhobenen Potenziale über verschiedene Kennzahlen hoch. Hierzu zählen Produktionsmengen und -kapazitäten, Stromverbrauch sowie Leistung. Während in einigen Fällen detaillierte Angaben gemacht werden, bleibt in anderen offen, welche Größen für die jeweilige Branche gewählt werden. Die Berechnungsmethode und die Wahl der Kennzahlen beeinflussen die Höhe der ausgewiesenen Potenziale und sind daher für deren deutliche Streuung mit verantwortlich.

Techno-ökonomische, zeitliche und örtliche Differenzierung

Schließlich zeigt sich bei der Analyse der Studien, dass verschiedene Differenzierungen nach techno-ökonomischen, zeitlichen und örtlichen Gesichtspunkten vorgenommen werden.

Die größte Vielfalt zeigt sich hier bei der Differenzierung nach techno-ökonomischen Aspekten. [17, 18] weisen die erhobenen Potenziale separat für verschiedene Abrufdauern aus. [12] differenzieren die Potenziale zudem nach zehn Nutzungsformen, welche in Anlehnung an verschiedene Vermarktungsoptionen definiert werden. [4, 6] entwickeln Kosten-Potenzial-Kurven, in denen die Potenziale aufsteigend nach ihren Kosten sortiert werden. [1, 2, 7, 16] berücksichtigen verschiedene Aspekte bei der Erhebung, weisen die Potenziale jedoch nicht explizit differenziert aus.

Eine zeitliche Differenzierung der Potenziale steht in den analysierten Studien nicht im Fokus, da die Produktion in der Grundstoffindustrie typischerweise keinen tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen unterliegt. Eine Ausnahme sind hier lediglich Zementwerke, deren Produktion in den Wintermonaten geringer ist, zudem wird vorwiegend nachts produziert.

Eine örtliche Differenzierung der ausgewiesenen Potenziale wird in [6] realisiert. Nichtsdestotrotz wird die örtliche Verfügbarkeit auch in anderen Studien beachtet. Insbesondere wenn Unternehmensbefragungen Teil der Erhebung sind, ist davon auszugehen, dass die Potenziale zumindest teilweise standortscharf vorliegen.

3 Lösungsvorschläge für die identifizierten Problemfelder zur Entwicklung einer Methodik zur Potenzialerhebung

Einheitliche Definition und klare Abgrenzung der Potenzialbegriffe

In einem ersten Schritt erfolgt die Auswahl von fünf relevanten Potenzialbegriffen, für die einheitliche Definitionen festgelegt werden. Abbildung 2 stellt dar wie sich die einzelnen Potenziale aus Schnittmengen bzw. Teilmengen übergeordneter Potenziale ergeben.

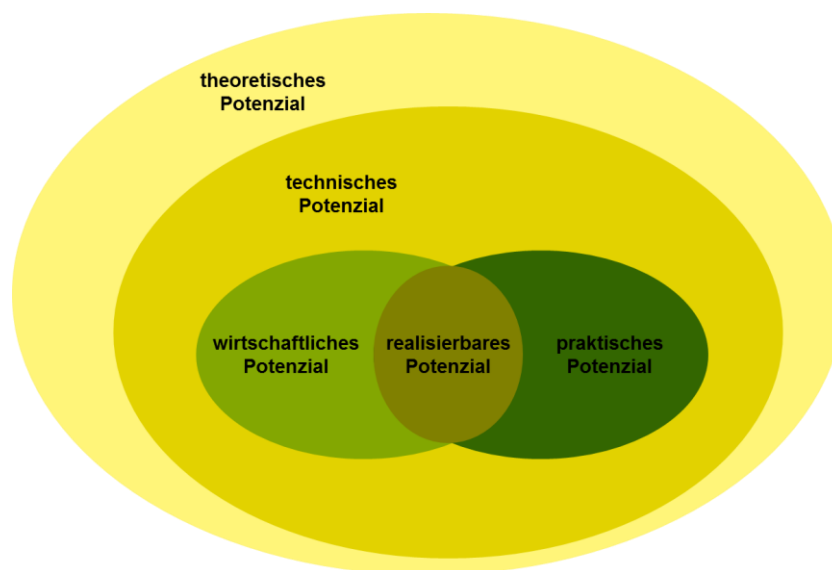


Abbildung 2: Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe

Das theoretische Potenzial ist eine rein rechnerische Größe. Es wird zu jedem Zeitpunkt durch die installierte Leistung der Anlage und die Ist-Last bestimmt. Beim technischen Potenzial werden hingegen zusätzlich sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen berücksichtigt. Es stellt somit die Last dar, welche aus technischer Sicht zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Das wirtschaftliche Potenzial ist eine weitere Teilmenge des technischen Potenzials. Es entspricht dem Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich genutzt werden kann. Dies ist der Fall, wenn unter Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes die durch die Flexibilisierung generierten Erlöse die entsprechenden Kosten übersteigen. Beim praktischen Potenzial werden zusätzlich unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mit einbezogen. Das realisierbare Potenzial ergibt sich schließlich als Schnittmenge des wirtschaftlichen und des praktischen Potenzials.

Es ist damit das Potenzial, das betriebswirtschaftlich sinnvoll von Unternehmen genutzt und gleichzeitig auch von den Unternehmen selbst für Flexibilisierungen freigegeben werden kann.

Es ist zu beachten, dass alle fünf Potenzialbegriffe unabhängig vom Zeithorizont definiert sind und daher sowohl für heutige als auch zukünftige Zeitpunkte erhoben werden können. Die Unterscheidung der Betrachtungszeiträume wird über Definition von Flexibilitätspotenzialen und Flexibilitätsperspektiven realisiert (siehe Abschnitt zur klaren Abgrenzung der Betrachtungszeiträume).

Eindeutige Zuordnung der zu erhebenden Parameter je Potenzialbegriff

Um die Transparenz der Potenzialerhebung zu gewährleisten, werden den Potenzialbegriffen jeweils Parameter zugeordnet, die für deren Erhebung abgefragt werden müssen. Abbildung 3 stellt diese Zuordnung graphisch dar.

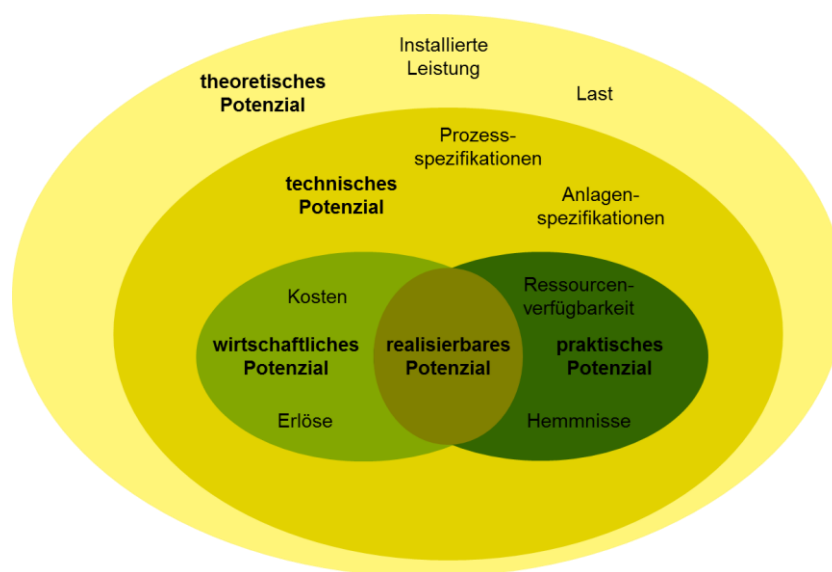


Abbildung 3: Zuordnung der zu erhebenden Parameter je Potenzialbegriff

Das theoretische Potenzial ist demnach aus der installierten Leistung der Anlage und der Last zum entsprechenden Zeitpunkt ableitbar.

$$\text{Positives Potenzial} = \text{Ist-Last} \quad (1)$$

$$\text{Negatives Potenzial} = \text{Installierte Leistung} - \text{Ist-Last} \quad (2)$$

Da die Erhebung des technischen Potenzials sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen einschließt, müssen hierfür Prozess- und Anlagenspezifikationen abgefragt werden. Hierzu zählen beispielsweise Vorankündigungszeiten und Sperrzeiten bis zur nächsten Laständerung sowie die maximale Abrufdauer. Darüber hinaus sind bei Bedarf Daten zu Materialspeichern für Vorprodukte und Produkte zu erfassen. Zur Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials müssen zusätzlich mit der Flexibilisierung verbundene Kosten und Erlöse erhoben werden. Die Erlöse setzen sich aus möglichen Einsparungen bei den Stromkosten und Erlösen, welche durch die Vermarktung der Flexibilität generiert werden, zusammen. Zu den Kosten zählen Investitionen, fixe und variable Betriebskosten sowie Opportunitätskosten für den Fall verminderter Produktion. Die notwendigen Investitionen müssen sich hierbei innerhalb einer definierten Dauer amortisieren. Diese

Amortisationsdauer kann zwischen Betrieben bzw. Anlagentypen variieren. Beim praktischen Potenzial werden unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mitbetrachtet. Hierzu zählen beispielsweise tarifrechtliche Bestimmungen, welche einer Anpassung der Produktion entgegenstehen können. Des Weiteren werden Ressourcenverfügbarkeit sowie Planbarkeit bzw. Prognosesicherheit der Laständerung berücksichtigt. Unter Ressourcen sind hierbei die Verfügbarkeit von Mitarbeitern und das Vorhandensein von Rohstoffen im Prozess vorgelagerten Speicher zu verstehen. Ein ausreichend großer nachgelagerter Produktspeicher findet hingegen Eingang in die Ermittlung des technischen Potenzials, da sich hieraus unter Umständen sicherheitsrelevante Probleme ergeben können. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Lasterhöhung bei der Chlorelektrolyse zu einer Mehrproduktion von Chlor führt, die vom nachgelagerten Speicher nicht mehr aufgenommen werden kann. Das realisierbare Potenzial ergibt sich aus der Schnittmenge des wirtschaftlichen und des praktischen Potenzials. Daher müssen für dessen Bestimmung alle Parameter dieser beiden Potenziale erhoben werden.

Analyse verschiedener Arten der Laständerung

Im Rahmen der Studie bezeichnet eine Laständerung die Änderung der bezogenen Leistung gegenüber der bezogenen Leistung im Referenzbetrieb. Diese ist nach oben durch die Kapazität und nach unten durch die Teillastfähigkeit der Anlage begrenzt.

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die klare Unterscheidung zwischen Lastreduktion und -erhöhung. Ersteres wird in Anlehnung an die Definition des Regelleistungsmarkts auch als positives Leistungspotenzial bezeichnet und bedeutet das Herunterfahren bzw. Reduzieren von Stromverbrauchern, so dass sich die bezogene Strommenge aus dem Netz reduziert. Zweiteres, auch negatives Leistungspotenzial genannt, ist das Hochfahren bzw. Erhöhen von Stromverbrauchern. Aus Sicht des Stromnetzes bewirkt dies eine Erhöhung der bezogenen Strommenge aus dem Stromnetz. Die alleinige Ausweisung eines dieser beiden Potenziale zur Lastflexibilisierung ist nicht ausreichend, da Reduktion und Erhöhung der Last in der Regel nicht in gleichem Maße möglich sind. Bei der Lastreduktion muss zusätzlich ein möglicher Ausgleichbedarf berücksichtigt werden. Bei Querschnittstechnologien (z. B. Beleuchtung) ist eine Lastreduktion teilweise auch ohne späteren Ausgleich möglich. Bei stromintensiven Prozessen führt die Lastreduktion ohne folgenden Ausgleich jedoch häufig zu Produktionsausfall. Demzufolge sind im Wesentlichen zwei Aspekte von Bedeutung. Im ersten Schritt ist zu klären, ob durch die Lastreduktion ein Ausgleichbedarf entsteht. Ist dies der Fall, ist weiterhin ausschlaggebend, ob dieser Bedarf bedient wird, um zu beurteilen, ob es zu einem Produktionsausfall kommt. Entscheidend ist in diesem Kontext immer auch innerhalb welches Zeitrahmens die Lastreduktion ausgeglichen werden muss, um einen Produktionsausfall zu vermeiden.

Klare Abgrenzung der Betrachtungszeiträume

Um eindeutig zwischen Flexibilitäten, die bereits heute zur Verfügung stehen, und solchen, welche erst zukünftig realisiert werden können, abzugrenzen, werden die Begriffe Flexibilitätspotenziale und Flexibilitätsperspektiven eingeführt. Erstere bezeichnen die flexibilisierbare Last der aktuell installierten Anlagen unter heutigen Rahmenbedingungen. D.h. es ist lediglich die Nachrüstung von entsprechender Hard- und Software notwendig, um eine flexible Fahrweise der Anlage zu ermöglichen. Flexibilitätsperspektiven hingegen

bezeichnen zukünftige Potenziale, die erst durch technische Eingriffe am Prozess umgesetzt werden können. Hierbei sind folgende drei Fälle zu unterscheiden. Erstens kann durch einen Energieträgerwechsel – d.h. durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung –zusätzliche Flexibilität geschaffen werden. Zweitens fallen die Erweiterung von Stoff- und Energiespeichern unter Flexibilitätsperspektiven. Durch die Vergrößerung eines Produktspeichers kann beispielsweise die Abrufdauer einer Lasterhöhung verlängert werden, da ausreichende Lagerkapazitäten für die Mehrproduktion zur Verfügung stehen. Somit steigt das technische Potenzial der Lasterhöhung. Drittens zählen der Umbau bzw. die Weiterentwicklung von Anlagen bzw. des gesamten Prozesses, welche die Flexibilität erhöhen, zu möglichen Flexibilitätsperspektiven.

Identischer Bilanzraum der Datenerhebung und der ausgewiesenen Potenziale

Die Erhebung der Potenziale erfolgt bottom-up über Referenzprozesse. Diese sind für eine Branche repräsentative Prozesse und werden entsprechend parametrisiert. Das Potenzial des Referenzprozesses wird anschließend über geeignete Kennzahlen wie z. B. Produktionsmengen oder den Stromverbrauch auf Deutschland hochgerechnet. Das ausgewiesene Potenzial bezieht sich auch nach der Hochrechnung nicht auf die gesamte Branche, sondern weiterhin auf den jeweiligen Referenzprozess. Durch den Ansatz über Referenzprozesse wird eine Überschätzung bzw. Unterschätzung bei der Hochrechnung der erhobenen Potenziale vermieden.

Techno-ökonomische, zeitliche und örtliche Differenzierung

Idealerweise werden bei der Potenzialerhebung techno-ökonomische Differenzierungen sowie zeitliche und örtliche Verfügbarkeit bedacht. Werden die Parameter auf geeignete Weise ausgewählt und abgefragt, so können im Nachhinein verschiedene techno-ökonomische Differenzierungen – wie beispielsweise nach der Abrufdauer oder nach Vermarktungsoptionen – sowie die Erstellung von Kosten-Potenzial-Kurven realisiert werden. Um der zeitlichen Verfügbarkeit gerecht zu werden, müssen tageszeitliche, wochentags und jahreszeitliche Abhängigkeiten des Lastverlaufs in die Erhebung miteinfließen. Die Beachtung der örtlichen Verfügbarkeit kann über die Ausweisung georeferenzierter Potenziale umgesetzt werden. Selbstverständlich können nicht all diese Aspekte gleichzeitig berücksichtigt werden. Vielmehr muss in Hinblick auf die einzelnen Zielgruppen stets sorgfältig abgewogen werden, welche Differenzierungen der Potenziale am geeignetsten sind.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Metastudienanalyse zeigt, dass sich die Methoden zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen hinsichtlich getroffener Annahmen und Vorgehensweisen unterscheiden. Insgesamt werden acht Aspekte identifiziert, welche die Höhe der ausgewiesenen Potenziale maßgeblich beeinflussen. Auf Basis dieser Aspekte wird eine transparente Methode zur Erhebung von Lastflexibilisierungspotenzialen ausgearbeitet. Der Fokus der Methode liegt auf den Branchen der Grundstoffindustrie, sie ist jedoch auch für die Potenzialerhebung in anderen Branchen sowie für Querschnittstechnologien anwendbar.

Zukünftig sind insbesondere für die Hochrechnung von Flexibilitätpotenzialen weitere Untersuchungen notwendig. Hier müssen belastbare Zusammenhänge identifiziert werden, die eine möglichst verlässliche Hochrechnung über geeignete Kennzahlen erlauben.

Literatur

- [1] Deutsche Energie-Agentur (dena): dena-Netzstudie II - Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin: dena, 2010
- [2] Buber, Tim; Gruber, Anna; von Roon, Serafin; Klobasa, Marian: Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 3.2013 - Energiewende in Deutschland - Chancen und Herausforderungen. Berlin: DIW Berlin - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., 2013
- [3] Scholz, Yvonne; Gils, Hans Christian; Pregger, Thomas; Heide, Dominik; Cebulla, Felix; Cao, Karl-Kien; Hess, Denis; Borggreffe, Frieder: Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung. Stuttgart: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2014
- [4] Klobasa, Marian: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Zürich: Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich (ETH), 2007
- [5] Paulus, Moritz; Borggreffe, Frieder: The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany in: Applied Energy. Köln: Institute of Energy Economics (EWI), 2010
- [6] Pellingner, Christoph; Schmid, Tobias; et al.: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Teilbericht: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2016
- [7] Buber, Tim; Gruber, Anna; von Roon, Serafin; Hüneke, Marie; Klobasa, Marian; Angerer, Gerhard; Schleich, Joachim; Friedrichsen, Nele; Lüllmann, Arne: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Berlin: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) 2013
- [8] Steurer, Martin; Klemp, Nikolai; Hufendiek, Kai; Baumgart, Bastian; Steinhausen, Burkhard: Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland. Aachen: Trianel GmbH, 2015
- [9] Leitstudie Strommarkt - Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen. Köln: r2b energy consulting GmbH, 2014
- [10] Orioli, Victoria: Potentials of Industrial Demand Side Management. Dresden: Siemens AG, 2016

- [11] von Scheven, Alexander; Hartkopf, Thomas; Prella, Martin: Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt - Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien (TUD), 2012
- [12] Langrock, Thomas; Achner, Sigggi; Jungbluth, Christian; Marambio, Constanze; Michels, Armin; Weinhard, Paul; Baumgart, Bastian; Otto, Achim: Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015
- [13] Apel, Rolf et al.: Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration. Frankfurt am Main: Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), 2012
- [14] Arnold, Karin; Janßen, Tomke; Echternacht, Laura; Höller, Samuel; Voss, Theresa; Perrey - Covestro, Karen: FlexInd - Flexibilisation of industries enables sustainable energy systems. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, 2016
- [15] Langrock, Th.; Brühl, St.; Michels, A.: Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. Düsseldorf: EnergieAgentur.NRW, 2016
- [16] Gruber, Anna; Von Roon, Serafin; Fattler, Steffen: Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2016
- [17] von Roon, Serafin; Gobmaier, Thomas: Demand Response in der Industrie - Status und Potenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2010
- [18] Berger, Helmut; Eisenhut, Thomas; Polak, Sascha; Hinterberger, Robert: Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector - Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids in: Berichte aus Energie- und Umweltforschung 65/2011. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), 2011
- [19] Elsner, Peter; Erlach, Berit; Fishedick, Manfred: Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 - Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2015
- [20] Nabe, Christian: Flex-Efficiency - Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. Berlin: Agora Energiewende, 2016
- [21] Krzikalla, Norbert; Achner, Sigggi; Brühl, Stefan: Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien - Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie. Aachen: BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, 2011

- [22] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse in: Paper und Vortrag beim 13. Symposium Energieinnovation in Graz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014
- [23] Frontier Economics: Strommarkt in Deutschland – Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit?. Köln: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2014
- [24] Steurer, Martin; Fahl, Ulrich; Eberl, Thomas; Voß, Alfred: Identifikation und Bewertung des intelligenten Lastmanagementpotenzials in der Industrie in Baden-Württemberg. Stuttgart: EnBW Vertrieb GmbH Stuttgart, 2013
- [25] Atabay, Dennis: Energiespeichersysteme im Fabrikbetrieb in: Reinhart, G.. Augsburg: Seminar Energie und Produktion, 2015
- [26] Wille-Hausmann, Bernhard; Erge, Thomas; Klobasa, Marian: Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2009
- [27] Focken, Ulrich; Klobasa, Marian: Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2011
- [28] Graßl, Markus Albert: Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion. München: Dissertation, Technische Universität München, 2014

Anhang

Tabelle 2: Übersicht über 28 analysierte Studien

Autor / Institut	Jahr	Titel
acatech , Fraunhofer ICT, WI	2015	Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge
Agora, Ecofys	2016	Flex-Efficiency. Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern
BEE	2013	Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energien
BMVIT	2011	Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector
Dena	2010	dena Netzstudie II - Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025
DIW, FfE	2013	Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast
DLR	2014	Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung
Energieagentur NRW	2016	Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen
ETH Zürich (Klobasa)	2007	Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie
EWI (Paulus, Borggreffe)	2010	The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany
FfE	2010	Demand Response in der Industrie
FfE	2014	Regionale Lastmanagementpotenziale stromintensiver Prozesse
FfE	2016	Lastflexibilisierung in der Industrie und GHD – Teilprojekt aus Merit Order der Energiespeicherung 2030 (MOS 2030)
FfE	2016	Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern
FfE, Agora, Fraunhofer ISI	2013	Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland
Fraunhofer ISI (Focken, Klobasa)	2011	Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor
Fraunhofer ISI (Klobasa)	2009	Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement
Frontier Economics	2014	Strommarkt in Deutschland - Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit?
IER Universität Stuttgart	2013	Identifikation und Bewertung des intelligenten Lastmanagementpotenzials in der Industrie in Baden-Württemberg
IER Universität Stuttgart	2015	Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland
IfE TU München (Atabay)	2015	FOREnergy – Die Energieflexible Fabrik
r2b, Connect Energy Economics, Fraunhofer ISI, consentec	2014	Endbericht Leitstudie Strommarkt. Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse der Kapazitätsmechanismen
Siemens (Orioli)	2015	Potentials of industrial load management in Germany
TU Darmstadt	2012	Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix
TU München (Graßl)	2014	Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
UBA	2015	Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien
VDE	2012	Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland
Wuppertal Institut	2016	FlexInd - Flexibilisation of industries enables sustainable energy systems

Tabelle 3: Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder

	BMVIT 2011 [18]	DENA 2010 [1]	DIW 2013 [2]	EANRW 2016 [15]	ETH 2007 [4]	
Potenzialbegriffe	Technisch, wirtschaftlich	Technisch, ökonomisch nutzbar	Ökonomisch	Technisch, wirtschaftlich, erschlossen	Technisch, ökonomisch, technisch-ökonomisch, realisierbar	
Erhobene Parameter	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Technische Kennzahlen, Kosten, Speicherdaten	Technische Kennzahlen, weiche Faktoren	keine, da Potenzialerhebung aus Metastudienanalyse	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	
Art der Laständerung	Lastreduktion Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Keine Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Exklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive und exklusive Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusive Produktionsausfall	
Betrachtungszeitraum	Aktuell installierte Anlagen und zukünftige Potenziale	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)	Aktuell installierte Anlagen	Aktuelle installierte Anlagen (Berechnung für spezif. Jahr)	
Art und Bilanzraum der Datenerhebung	Top-down je Branche Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Metaanalyse auf Prozessebene	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess (für Bestimmung des flex. Anteils)	
Bilanzraum ausgewiesener Potenziale	Branche	Prozess	Prozess	Energieintensive Industrie	Branche	
Berechnungsmethode	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung über Stromverbrauch	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung je nach Branche über Produktionsmengen	Basis: Potenzial Süddeutschland Hochrechnung über Produktionsmengen auf Gesamtdeutschland	Basis: deutschlandweites Potenzial der energieintensiven Industrie aus Metaanalyse Skalierung auf NRW über Produktionskapazitäten zzgl. Aufschlag gemäß Expertenschätzung	Durchschnittlicher Leistungsbedarf (aus Produktionsmenge, spez. Stromverbrauch und Betriebsstunden) multipliziert mit flexiblem Anteil in %	
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Abrufdauer Kosten-Potenzial-Kurven für verschiedene Abrufdauern	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Kosten-Potenzial Kurven (für Betriebskosten)	Kosten-Potenzial Kurven (für Betriebskosten)
	Zeitlich	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeit, Werktag und Sonntag, Jahreszeit	Tageszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen
	Örtlich	Österreich	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland

		FFE 2016 [6]	FFE 2013 [7]	FFE 2016 [16]	FFE2010 [17]	IER 2015 [8]
	Potenzialbegriffe	Technisch	Technisch, wirtschaftlich/ökonomisch, realisierbar oder praktisch	Theoretisch, <u>technisch</u> , wirtschaftlich, akzeptiert, realisierbar	Theoretisch, <u>technisch</u> , wirtschaftlich, praktisch	Wirtschaftlich realisierbar, realisiert
	Erhobene Parameter	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten	Technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Mindestersparnis/-erlös	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Keine Angabe	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten
	Art der Laständerung	Keine Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive und exklusive Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive und exklusive Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Keine Angabe zum Produktionsausfall
	Betrachtungszeitraum	Aktuell installierte Anlagen, zusätzliche Ausweisung der Potenziale für 2020, 2025, 2030	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Keine Angabe	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
	Art und Bilanzraum der Datenerhebung	Bottom-up über Prozess	Top-down über Prozess und bottom-up Validierung	Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up über Prozess	Bottom-up über Prozess, top-down Validierung
	Bilanzraum ausgewiesener Potenziale	Prozess	Prozess	Einzelner Prozesses	Branche	Branche
	Berechnungsmethode	Basis: Potenzial je Standort Hochrechnung über Produktionsmengen je Standort	Basis: Anzahl der Standorte, Produktion und Stromverbrauch zur Ermittlung des maximalen Leistungsbedarfs, dann Anwendung flexibilisierbarer Anteil	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Ableitung für typische Prozesse, keine Hochrechnung	Basis: Stromverbrauch je Branche, Literaturangaben und Expertenschätzung zu flexibilisierbaren Anteilen	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung mittels statistischer Verfahren (keine Angabe zu verwendeten Kennzahlen)
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Kosten-Potenzial Kurven (variable Kosten, spezifische Gesamtkosten) für 1 h, 10 h, 1.000 h Abruf pro Jahr	- Abrufdauer, Betriebszustand, Vorankündigungszeiten - Abrufhäufigkeit - Eignung der Potenziale für einen Abruf im Rahmen von Redispatch, SRL	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Abrufdauer	Keine Angabe
	Zeitlich	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeit (Schichten), Werktag und Sonntag	Nein	Nein	Nein
	Örtlich	Landkreise Deutschland und Bezirke Österreich	Süddeutschland	n.z.	Deutschland	Deutschland

		TUD 2012 [11]	UBA 2015 [12]	VDE 2012 [13]	WI 2016 [14]
Potenzialbegriffe		Technisch	Technisch, soziotechnisch, wirtschaftlich, genutzt	Theoretisch, technisch, praktisch (theoretisches und technisches Potenzial sind identisch)	Theoretisch, technisch, technisch-ökonomisch, ökonomisch, sozioökonomisch, praktisch (Begriffe aus dem Englischen übersetzt)
Erhobene Parameter		Technische Kennzahlen	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten	Keine Angabe	Unklar
Art der Laständerung		Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall für technisches Potenzial, exklusive für soziotechnisches Potenzial	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Keine Angabe zum Produktionsausfall
Betrachtungszeitraum		Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuelle installierte Anlagen (Berechnung für spezif. Jahr)	Keine Angabe
Art und Bilanzraum der Datenerhebung		Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Unklar
Bilanzraum ausgewiesener Potenziale		Branche	Prozess	Branche	Branche
Berechnungsmethode		Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung über Leistung, Speicherkapazität oder Strombedarf	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung je Branche über Produktionsmengen, Produktionskapazität oder Stromverbrauch	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung (keine Angabe zu verwendeten Kennzahlen)	Metaanalyse
Differenzierung	Techno-ökonomisch	Keine Angabe	Vermarktungsoptionen	Keine Angabe	Keine Angabe
	Zeitlich	Nein	Saisonale Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Nein	Nein
	Örtlich	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland