

FFE

Regionale Lastmanagementpotenziale

Quantifizierung bestehender und zukünftiger
Lastmanagementpotenziale in Deutschland

2021

Regionale Lastmanagementpotenziale

Quantifizierung bestehender und
zukünftiger Lastmanagementpotenziale in
Deutschland

Herausgeber:



Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH
Am Blütenanger 71, 80995 München
+49 (0) 89 158121-0
Mail: info@ffe.de
Web: www.ffegmbh.de



Guidehouse Germany GmbH

Albrechtstraße 10 c, 10117 Berlin
+49 (0) 30 7262 1410
Mail: konstantin.staschus@guidehouse.com
Web: www.guidehouse.com

Abschlussbericht zum Projekt:
Regionale Lastmanagementpotenziale
Quantifizierung bestehender und zukünftiger Lastmanagementpotenziale in
Deutschland

Veröffentlicht am:

17.12.2021

FfE-Auftragsnummer:

Ten-11

Bearbeiter/in FfE:

Jetter, Fabian
Veitengruber, Frank
Dr. Schmid, Tobias
Guminski, Andrej
Dr. von Roon, Serafin
Hübner, Tobias

Bearbeiter/in Guidehouse:

Staschus, Konstantin
Creuzburg, Philipp
Sach, Thobias

Management FfE GmbH:

Geschäftsführer:

Dr.-Ing. S. von Roon
Dr.-Ing. Anna Gruber
Andrej Guminski

Management Guidehouse:

Managing Directors:

Scott McIntyre
Edward Eich
Deborah Ricci
Shamir Patel

Inhalt

1	Zielsetzung und Arbeitsschritte	10
2	Kategorisierung der Lastmanagementpotenziale.....	11
2.1	Methodik.....	12
2.1.1	Auswahl relevanter Lastmanagementkategorien	12
2.1.2	Bestimmung der Potenziale.....	13
2.1.3	Interviewauswahl und -vorgehensweise.....	14
2.1.4	Ermittlung der Kosten.....	14
2.2	Ergebnisse.....	16
2.2.1	Industrieprozesse.....	16
2.2.2	Industrielle Querschnittstechnologien und weitere Anwendungsbereiche für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.....	24
2.3	Experteninterviews zu Flexibilitätspotenzialen in der Industrie.....	27
2.3.1	Behälterglasproduktion	27
2.3.2	Grundstoffchemie.....	27
2.3.3	Herstellung von Sekundäraluminium	28
2.3.4	Validierung der Flexibilitätspotenziale in der Primär-Aluminiumindustrie	29
2.3.5	Validierung der angebotenen Flexibilitäten im Rahmen der AbLaV	30
2.4	Kostenpotenzialkurven.....	31
3	Szenarien.....	34
3.1	Methodik.....	34
3.2	Narrativ der Szenarien.....	35
3.3	Erschließungsraten.....	37
3.4	Entwicklung der Lastmanagementpotenziale bis 2045	39
3.4.1	Szenario B – Basisszenario	39
3.4.2	Szenario A – Wasserstoff	42
3.4.3	Szenario C – Elektrifizierung	45
4	Regionalisierung der Lastmanagementpotenziale.....	48
4.1	Methodik.....	48
4.2	Ergebnisse.....	49
5	Zeitliche Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale	53
6	Fazit.....	56
7	Literatur	59
8	Anhang.....	65

Management Summary

Im Zuge des Ausbaus volatiler, erneuerbarer Energieerzeugung ist es zunehmend von Bedeutung, einen netzdienlichen Betrieb auf Verbraucherseite zu etablieren. Im Rahmen des Gutachtens wurden szenarienabhängig sowohl heutige als auch zukünftige Lastmanagementpotenziale bis 2045 kategorisiert, quantifiziert sowie die regionale und zeitliche Verfügbarkeit bestimmt. Der Fokus liegt auf den Branchen Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Diese konnten zusätzlich anhand durchgeführter Branchen- und Experteninterviews vertieft sowie insbesondere für den kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont validiert werden.

Im Basisjahr 2019 liegt für eine Abrufdauer von einer Stunde ein positives Lastmanagementpotenzial von 1,2 GW vor, das aktuell von im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) präqualifizierten Industrieprozessen der Branchen Aluminium, Papier und Chemie bereitgestellt wird. Zur Beschreibung der Entwicklung der zukünftigen Potenziale dient neben einem Basisszenario, das sich an der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ orientiert, zusätzlich ein Szenario mit einem erhöhten Wasserstoffeinsatz sowie ein Szenario, das sich durch eine hohe Elektrifizierung auszeichnet. Bis 2045 findet in allen Szenarien ein signifikanter Anstieg auf bis zu 13,5 GW der erschlossenen Lastmanagementpotenziale statt. Hiervon gewinnen insbesondere industrielle Querschnittstechnologien sowie GHD zunehmend an Bedeutung, bis deren Potenziale spätestens ab 2035 gegenüber den Lastmanagementpotenzialen industrieller Prozesse dominieren könnten. Das Ergebnis der Regionalisierung zeigt, dass zwar zwischen den Szenarien regionale Unterschiede in der Höhe und kategoriellen Zusammensetzung der Lastmanagementpotenziale bestehen, diese aber in allen Szenarien bis 2045 insbesondere in Nordrhein-Westfalen, Hamburg, Niedersachsen, im südlichen Bayern und in Baden-Württemberg verfügbar sind. Die zeitliche Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale ist insbesondere dann gegeben, wenn die Technologien zu Produktionszeiten eine hohe durchschnittliche Auslastung aufweisen. Die Kosten des Flexibilitätsabrufs werden basierend auf einer Literaturanalyse nach Art des Flexibilitätsabrufs unterschieden, also Lastverschiebung, Lastreduktion und Lastabschaltung. Es zeigt sich, dass für alle Industrieprozesse verschiedene Flexibilitätspotenziale zu unterschiedlichen Kosten abgerufen werden können – geringere Potenziale zu geringeren Kosten (im Bereich weniger hundert EUR/MWh) und deutlich höhere Potenziale, wenn ein Produktionsausfall in Kauf genommen wird und die Abrufkosten damit deutlich höher ausfallen (im Bereich von 1.000 EUR/MWh). Bei Querschnittstechnologien und im Bereich Gewerbe wird analog zwischen verschiedenen Flexibilitätspotenzialen bei unterschiedlichen Kostenniveaus unterschieden. Die Abrufkosten für Lastverschiebung bzw. -reduktion sind hierbei durchgängig sehr niedrig, da ein Einfluss des Flexibilitätsabrufs auf die Produktion ausgeschlossen wird. Für die Lastabschaltung zeigen sich auch in den Bereichen Querschnittstechnologien und Gewerbe höhere Potenziale bei entsprechend deutlich erhöhten Abrufkosten.

In the course of the expansion of volatile, renewable energy generation, it is increasingly important to establish grid-serving operation on the consumer side. Within the scope of the report, both current and future load management potentials up to 2045 were categorized

and quantified, and the regional and temporal availability were determined, depending on the scenario. The focus is on the sectors industry as well as trade, commerce and services (GHD). These were additionally validated on the basis of industry and expert interviews, particularly for the short- to medium-term time horizon.

In the base year 2019, there is a positive load management potential of 1.2 GW for a period of one hour, which is currently provided by industrial processes in the aluminum, paper and chemical sectors that have been prequalified under the "Verordnung zu abschaltbaren Lasten" (AbLaV). In order to describe the development of future potentials, a base scenario based on the "Climate Neutral Germany 2050" study is used, as well as a scenario with increased use of hydrogen and a scenario characterized by a high level of electrification. By 2045, there is a significant increase in all scenarios to up to 13.5 GW of tapped load management potential. Of these, industrial cross-cutting technologies and GHD in particular are becoming increasingly important, until their potentials could dominate over the load management potentials of industrial processes from 2035 at the latest. The result of the regionalization shows that although there are regional differences in the amount and categorical composition of the load management potentials between the scenarios, they are available in all scenarios until 2045, especially in North Rhine-Westphalia, Hamburg, Lower Saxony, southern Bavaria and Baden-Württemberg. The temporal availability of the load management potentials is particularly given if the technologies have a high average utilization at production times. Based on a literature analysis, the variable costs of the flexibility dispatch are differentiated according to the type of flexibility, i.e. load shifting, load reduction and load shedding. Thus, for all industrial processes different flexibility potentials can be dispatched at different costs - lower potentials through load shifting and reduction at lower costs (in the range of a few hundred EUR/MWh) and significantly higher potentials if a production outage and thus high dispatch costs are accepted (in the range of 1.000 EUR/MWh). For cross-sectional technologies and in the commercial sector, an analogous distinction is made between different flexibility potentials at different cost levels. Here, the variable costs for load shifting and load reduction are consistently very low, close to zero, since an influence of the flexibility dispatch on production is excluded. For load shedding, higher potentials are identified in the cross-section technologies and commercial sectors, as well, with correspondingly significantly higher variable costs.

Ausgangssituation

Das europäische Energieversorgungssystem befindet sich in einem anhaltenden Transformationsprozess, der vor allem durch einen starken Anstieg der installierten Leistungen erneuerbarer Energien und durch die Abkehr von ganzen Erzeugungstechnologien, unter anderem der Kernenergie und der Kohleverstromung, in Deutschland gekennzeichnet ist. In zunehmend von volatil einspeisenden regenerativen Energien geprägten Energiesystemen stellt der Stromverbrauch keine unveränderliche Größe mehr dar und es ist zu erwarten, dass sich Teile des Stromverbrauchs – insbesondere in der Industrie – zukünftig immer stärker flexibel am Angebot der Stromerzeugung ausrichten.

Um diesen Sachverhalt im Rahmen des Netzentwicklungsplans Strom (NEP), der Bedarfsanalyse sowie der Untersuchung zur Versorgungssicherheit in Deutschland und Europa zu berücksichtigen, werden von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) Szenarien zur Entwicklung der Höhe und Verortung der Lastmanagementpotenziale benötigt. Daher

wurden die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE) und Guidehouse mit der Erstellung eines gemeinsamen Gutachtens beauftragt, in dem sowohl bestehende als auch mittel- bis langfristige Lastmanagementpotenziale in Deutschland systematisch beschrieben, quantifiziert und verortet werden.

Die folgenden Arbeiten wurden im Rahmen der Studie von den Unternehmen durchgeführt:

FfE:

- Auswahl der für das Lastmanagement wichtigsten Prozesse und Technologien sowie deren Beschreibung anhand technischer Parameter
- Durchführung von Experteninterviews
- Erstellung von Szenarien und Ausweisung der derzeitigen und zukünftigen (praktischen) Lastmanagementpotenziale
- Ermittlung der räumlichen- und zeitlichen Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale

Guidehouse:

- Erhebung von Kosten zu den betrachteten Kategorien und Arten des Lastmanagements
- Jährliche Erschließungsraten zur Ableitung des voraussichtlich erschlossenen Potenzials unter Berücksichtigung von technoökonomischen und regulatorischen Hemmnissen
- Durchführung von Experteninterviews

1 Zielsetzung und Arbeitsschritte

Im Rahmen des Gutachtens sollen sowohl bestehende als auch zukünftige Lastmanagementpotenziale anhand von Kosten- und Technologieparametern systematisch beschrieben und quantifiziert werden. Der Fokus liegt dabei auf den Verbrauchssektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Das Aufzeigen der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale ist hierbei ein weiteres Ziel der Studie. Das Erreichen der genannten Ziele erfolgte in mehreren Arbeitsschritten, deren Inhalt im Folgenden skizziert und in Abbildung 1-1 dargestellt sind.



Abbildung 1-1: Arbeitsschritte

Das Gutachten hat den Anspruch die für das Lastmanagement relevantesten Prozesse und Technologien zu berücksichtigen. Um diese zu identifizieren, wird zunächst eine Metastudienanalyse durchgeführt (Kapitel 2.1.1). Für diese sog. Lastmanagementkategorien werden für den Status Quo sowohl technische als auch wirtschaftliche (Flexibilitäts-) Parameter erfasst (Kapitel 2.2). Um diese Parameter sowie weitere in der Studie getroffenen Annahmen zu validieren, wurden Experteninterviews mit Industrieunternehmen durchgeführt (Kapitel 2.1.3).

Zur Beschreibung der Entwicklung der zukünftigen Potenziale dient neben einem Basisszenario, das sich an der Studie Klimaneutrales Deutschland 2050 orientiert, zusätzlich ein Szenario mit einem erhöhten Wasserstoffeinsatz sowie ein Szenario, das sich durch eine hohe Elektrifizierung auszeichnet (Kapitel 3.2). Anhand der aus den Narrativen der Szenarien abgeleiteten Kennzahlen, wie Produktionsmengen, wurde das Potenzial der jeweiligen Kategorien und Arten des Lastmanagements für verschiedene Zeithorizonte bis 2045 ausgewiesen (Kapitel 3.4). Dabei wird anhand von jährlichen Erschließungsraten das erschlossene Potenzial ermittelt, das dem Markt tatsächlich zur Nutzung zur Verfügung steht (Kapitel 3.3).

Durch die anschließende Regionalisierung wird deren räumliche Verfügbarkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Lastmanagementgruppe ermittelt (Kapitel 4). Abschließend wird die Charakteristik der zeitlichen Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale anhand von Verfügbarkeitszeitreihen ausgewiesen (Kapitel 0).

2 Kategorisierung der Lastmanagementpotenziale

Das Gutachten hat den Anspruch die für das Lastmanagement relevantesten Prozesse und Technologien zu berücksichtigen und deren Lastmanagementpotenzial zu erfassen. Als Lastmanagementpotenzial wird hierbei eine reduzierbare, verschiebbare oder abschaltbare Leistung verstanden, die unter Abwägung technischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Entwicklungen dem Strommarkt voraussichtlich zur Verfügung stehen wird. Hierbei wird zwischen Industrieprozessen (IND), industriellen Querschnittstechnologien (QST) und GHD-Prozessen unterschieden, die nachfolgend *Lastmanagementgruppen* genannt werden. Die einzelnen Prozesse und Technologien, die sich für das Lastmanagement eignen, werden hingegen als *Lastmanagementkategorien* bezeichnet.

Für jeden Bereich erfolgt wiederum eine Differenzierung nach der Art der Laständerung: Im Fall der Industrieprozesse bedeutet eine *Lastabschaltung* einen kompletten Lastverzicht mit Produktionsausfall. Im Gegensatz dazu entstehen bei einer *Lastreduktion* oder *Lastverschiebung* sowohl für die Produktion als auch den normalen Anlagenbetrieb keine Produktionsausfälle. Für die im Zuge der Metastudienanalyse als relevant eingestuften Lastmanagementkategorien (siehe nachfolgendes Kapitel 2.1.1) werden sowohl technische als auch wirtschaftliche Parameter erfasst, welche zusammenfassend in Tabelle 2-1 aufgelistet sind.

Tabelle 2-1: Überblick zu erhobenen Parametern der Lastmanagementkategorien

Technische Parameter	Wirtschaftliche Parameter
<ul style="list-style-type: none">• Produktionsmengenspezifischer Stromverbrauch• Maximal installierte Leistung• Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung nach Potenzialart• Maximale Abrufdauer• Maximale Verschiebedauer• Mindeststillstandszeit zwischen zwei Flexibilitätsabrufen / Zeit, innerhalb derer kein weiterer Abruf erfolgen darf• Maximale Abrufhäufigkeit pro Jahr	<ul style="list-style-type: none">• Investitionskosten• Jährliche Fixkosten• Abrufkosten nach Potenzialart

Die Kategorisierung der Lastmanagementpotenziale erfolgt in Kapitel 2.2 in Form von Steckbriefen, in denen systematisch die Kosten- und Technologieparameter beschrieben werden.

Darüber hinaus wurden zur Validierung der im Laufe des Projektes und früheren NEPs verwendeten Annahmen Experteninterviews durchgeführt, deren Erkenntnisse in Kapitel 2.3 dargestellt sind. Die Auswahl der Interviewpartner erfolgte hierbei entsprechend den Branchen der energieintensiven Industrie, da hier derzeit die höchsten Lastmanagementpotenziale zu finden sind. Die zur Potenzialanalyse relevanten wirtschaftlichen Rahmendaten werden in Kapitel 2.4 näher beschrieben.

2.1 Methodik

Im Folgenden wird die Methodik, die zur Ermittlung und Ausweisung der aktuellen Lastmanagementpotenziale, der Interviews und der Kostenermittlung Verwendung findet, dargestellt.

2.1.1 Auswahl relevanter Lastmanagementkategorien

Um die relevantesten Lastmanagementprozesse und -technologien zu identifizieren, für die im Rahmen des Projektes eine tiefergehende Analyse erfolgen soll, wird eine Metastudienanalyse durchgeführt. Der Fokus liegt hierbei auf bereits in vorhergehenden Studien ausgewiesenen Lastmanagementpotenzialen mit der Zielsetzung, diejenigen bestehenden Prozesse und Technologien zu ermitteln, die einen maßgeblichen Beitrag zur verbraucherseitigen Bereitstellung des (industriellen) Flexibilitätspotenzials leisten können. Zu den analysierten Literaturquellen zählen insbesondere /IPA-01 19/, /FFE-12 18/, /AIT-01 21/, /GRUB-01 17/, /STEU-01 17/, /FFE-01 16/, /FFE-49 16/.

Den in der Literatur ausgewiesenen Flexibilitätspotenzialen liegt zum Teil eine unterschiedliche Methodik zur Potenzialberechnung zugrunde. Vor diesem Hintergrund sind Lastmanagementpotenziale unterschiedlicher Literaturquellen für einen flexibilitätsrelevanten Prozess unter Umständen nicht direkt miteinander vergleichbar. Im Rahmen des Projektes werden anhand einer Literaturrecherche die Prozesse und Technologien ausführlicher betrachtet, die in Tabelle 2-2 zusammenfassend aufgelistet sind und im weiteren Verlauf als Lastmanagementkategorien bezeichnet werden. Zusätzlich sind deren Abkürzungen, die ggf. im Folgenden Verwendung finden, in runden Klammern dargestellt.

Tabelle 2-2: Flexibilitätsrelevante Lastmanagementkategorien

Industrieprozesse	Industrielle QST	GHD
<ul style="list-style-type: none"> • Papierherstellung (Papier) • Holzstoffherstellung (Holzstoff) • Chlorelektrolyse (Chlor) • HVC (Olefine & Aromaten) • Hohlglasherstellung (Hohlglas) • Flachglasherstellung (Flachglas) • Roh- und Zementmühlen (Zement) • Primärstahlherstellung (Primärstahl) • Sekundärstahlherstellung (Sekundärstahl) • Primäraluminiumherstellung (Aluminium) <p>Prospektiv:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Papierherstellung: insbes. Wärmepumpen & Elektrodenheizkessel (Papier prospektiv) • Elektrischer Steamcracker • Elektrische Hohlglasherstellung • Elektrische Flachglasherstellung • Stahlherstellung mit H₂ und Elektrolichtbogenofen (H₂-Stahl & EAF) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lüftung • Klimakälte • Prozesskälte • Raumwärme und elektr. Warmwasserbereitung (RW und WW) • Beleuchtung • Druckluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Rechenzentren (RZ) • Abwasserentsorgung (Abwasser) • Trinkwasserversorgung (Wasser) • Prozesskälte im Lebensmitteleinzelhandel (PK-Lebensmittel)

Grundsätzlich sind für die ausgewiesenen Prozesse und Technologien alle stromintensiven Prozessschritte zur potenziellen Flexibilisierung von Interesse. Hierfür eignen sich insbesondere Anlagen mit elektrischen Antrieben sowie hoher elektrischer Anschlussleistung.

2.1.2 Bestimmung der Potenziale

Für die zuvor ausgewählten Lastmanagementkategorien wird in einem ersten Schritt jeweils die installierte Leistung für das Basisjahr 2019 bestimmt. Im Fall der Produktionsprozesse erfolgt dies mittels einer Literaturrecherche. Die installierte Leistung der industriellen Querschnittstechnologien und GHD-Technologien wird anhand deren recherchierten Stromverbräuchen und Vollbenutzungsstunden berechnet.

In einem zweiten Schritt erfolgt anhand einer Literaturrecherche und unter anderem basierend auf umfangreichen Erkenntnissen aus dem Projekte Kopernikus SynErgie (/BMBF-01 20/) die Bestimmung der Lastmanagementpotenziale. Hierfür sind die drei Arten der Laständerung je Prozess bzw. Technologie, die anteilig zur ausgewiesenen installierten Leistung zu verstehen sind, ausgewiesen. Sie entsprechen zudem grundsätzlich einem positiven Flexibilitätspotenzial. Es gelten folgende Charakteristika:

- Eine Lastreduktion ohne Produktionsverlust ist entweder aufgrund von Speicherfähigkeiten im Produktionsprozess oder durch Hybridisierung in Form eines Energieträgerwechsels (z. B. energieflexible Beheizung Glasschmelze) möglich. Im Fall von industriellen Querschnittstechnologien und GHD ist eine Lastreduktion nur bei Ausschluss einer Lastverschiebung möglich.
- Bei einer Lastverschiebung wird die flexibilisierte Energiemenge im Produktionsverlauf wieder ausgeglichen. Dies kann entweder durch Vorziehen oder Nachholen der Produktion erfolgen.
- Die Lastabschaltung bedeutet eine Abschaltung der durchschnittlichen Auslastung je Produktionsprozess oder Technologie und hat einen nicht aufholbaren Produktionsverlust zur Folge.
- Jeder Art der Laständerung liegen unterschiedliche spezifische Abrufkosten zugrunde, die sowohl in den Steckbriefen in Kapitel 2.2 ausgewiesen als auch in Kapitel 2.4 ausführlicher beschrieben sind.

Je Kategorie werden die Lastmanagementpotenziale in Form eines praktischen und eines erschlossenen Potenzials ausgewiesen. Ausgehend vom theoretischen Potenzial als rein rechnerische Größe, sind untergeordnete Potenziale als Teilmengen zu verstehen, vgl. Abbildung 2-1. Beim technischen Potenzial werden zusätzlich sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen berücksichtigt. Dies entspricht der Last, die aus technischer Sicht abgeschaltet werden kann. In Ergänzung dazu werden beim praktischen Potenzial zusätzlich unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mit einbezogen. /FFE-05 17/

Entgegen den bisher genannten statischen Potenzialgrößen ist das erschlossene Potenzial dynamisch und signalisiert im Fall einer Lastverschiebung oder -reduktion das dem Markt zur Verfügung stehende Energieflexibilitätpotenzial. Hierzu findet ausgehend vom praktischen Potenzial eine zeitliche Erschließungsrate Berücksichtigung, siehe auch Kapitel 3.3.

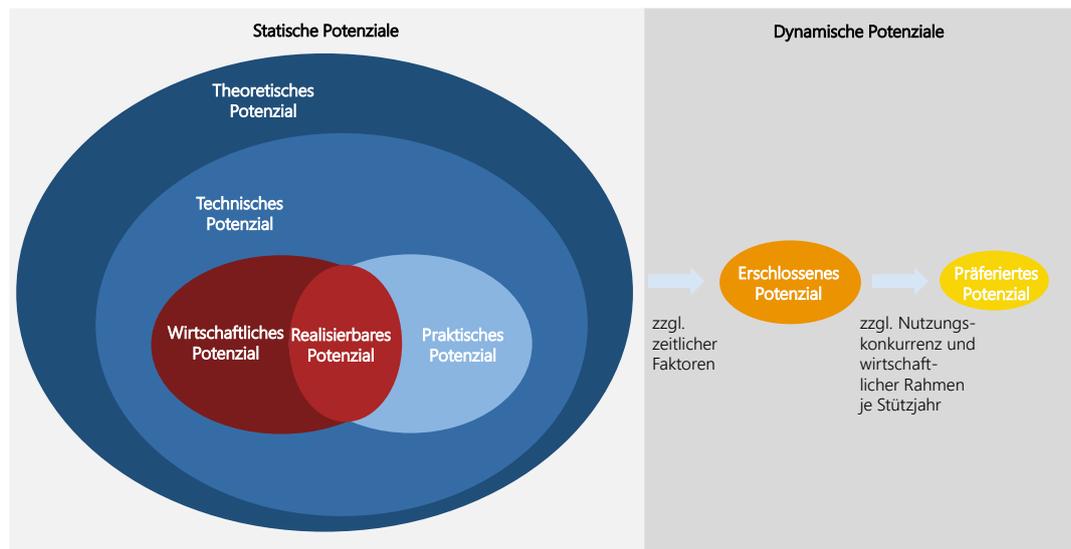


Abbildung 2-1: Abgrenzung der Potenzialbegriffe (eigene Darstellung in Anlehnung an /FFE-05 17/)

2.1.3 Interviewauswahl und -vorgehensweise

In Ergänzung zur Literaturanalyse zur Bestimmung der Lastmanagementpotenziale werden Interviews mit Industrievertretern durchgeführt. Diese ermöglichen es, die Erkenntnisse aus der Literaturanalyse zu verifizieren und für Branchen zu ergänzen, die in der Literatur bisher noch nicht umfassend beschrieben werden.

Für die Interviews wurden in Absprache mit den Auftraggebern Unternehmen ausgewählt, die der energieintensiven Industrie zuzuordnen sind und auf Branchenebene dementsprechend hohe Lastmanagementpotenziale aufweisen.

Zur Vorbereitung der Interviews werden verfügbare Informationen zum Unternehmen, Produktionsprozess und vorhandenen Lastmanagementpotenzialen analysiert. Diese Erkenntnisse und ein zuvor erarbeiteter Fragenkatalog (siehe Anhang I, Kapitel 8) bilden die Grundlage für das semi-strukturierte Interview. Ziel des Interviews ist es, zunächst den Produktionsprozess an den verschiedenen Standorten des Unternehmens nachzuvollziehen und einen Überblick über den Energie- und insbesondere den Stromeinsatz zu erhalten. Darauf aufbauend werden Lastmanagementpotenziale identifiziert und deren zukünftige Entwicklung besprochen. Weiterhin werden Hemmnisse identifiziert, die einer Flexibilisierung aus Unternehmenssicht entgegenstehen. Die Ergebnisse der Interviews werden protokolliert und den Industrievertretern zur Verifikation vorgelegt.

2.1.4 Ermittlung der Kosten

Zur Charakterisierung der ermittelten Lastmanagementpotenziale werden entsprechend /STEU-01 17/ Kosten zur Erschließung der Potenziale, in Form von Investitionskosten und jährlichen Fixkosten sowie Abrufkosten ausgewiesen:

- Investitionskosten der Flexibilisierung in EUR/MW: Diese Kosten fallen einmalig an, wenn praktisches Potenzial in erschlossenes Potenzial überführt wird. Investitionskosten können bspw. durch zusätzliche Energie- oder Stoffspeicher in der Produktionsanlage oder die steuerungstechnische Anbindung bzw. Einbindung in das Energiemanagementsystem entstehen.

- Jährliche Fixkosten der Flexibilisierung in EUR/(MW*a): Diese Kosten fallen an, um für die Flexibilisierung notwendige technische Ausrüstung wie bspw. IKT zu unterhalten. Weiterhin decken die jährlichen Fixkosten den durch die Flexibilisierung ggf. erhöhten Aufwand an personellen Ressourcen oder den Einsatz externer Dienstleister.
- Abrufkosten in EUR/MWh: Weiterhin fallen variable Kosten an, wenn erschlossene Potenziale tatsächlich abgerufen werden. Diese fallen durch den Eingriff in den Produktionsablauf an, der mit dem Potenzialabruf verknüpft ist. Die Abrufkosten umfassen damit beispielsweise zusätzliche Kosten für Energie oder Personalaufwand insbesondere aber Opportunitätskosten durch einen möglichen Produktionsausfall.

Während die Fixkosten der Flexibilisierung unabhängig von der Art des Flexibilitätsabrufs sind, müssen die variablen Abrufkosten für Lastverschiebung, Lastreduktion und Lastabschaltung unterschieden werden. Bei Lastverschiebung und Lastreduktion kann durch späteres Nachholen bzw. durch den Wechsel der Energiebereitstellung ein Ausfall der Produktion vermieden werden. Bei der Lastabschaltung hingegen entstehen durch den Ausfall der Produktion Deckungsbeitragsverluste, welche über höhere Abrufkosten kompensiert werden müssen.

Um Erschließungs- und Abrufkosten für die verschiedenen Prozesse und Industrien zu ermitteln, wird eine Literaturanalyse durchgeführt. Für die Analyse werden Studien ausgewählt, die eine hohe Bandbreite verschiedener Branchen abdecken: /BMVIT-01 11/, /BMVIT-01 15/, /FFE-04 16/, /DLR-01 21/, /STEU-01 17/.

In der analysierten Literatur werden verschiedene Methoden angewandt, um die Kosten zu ermitteln. Als Hauptquellen werden /STEU-01 17/ und /DLR-01 21/ gewählt, die eine umfassende Datenbasis aus Unternehmensbefragungen aufweisen bzw. im Rahmen einer Metaanalyse vorhandene Literatur auswerten und dabei auf eine konsistente Methodik zurückgreifen. So wird in /STEU-01 17/ für die Ermittlung der Flexibilisierungs-Fixkosten ein Bottom-up-Ansatz genutzt, der Kosten für die notwendige technische Ausrüstung berücksichtigt und entsprechend verschiedenen Betriebsgrößen differenziert. Die variablen Kosten der Lastverschiebung werden in /STEU-01 17/ durch Umfragen sowie Literaturanalysen ermittelt. Ergänzend werden für in /STEU-01 17/ nicht abgedeckte Branchen Kostenparameter aus /DLR-01 21/ genutzt. Die Studie greift auf eine Metaanalyse bestehender Literatur zurück und bietet damit einen Überblick aktueller Forschungsergebnisse. Für die Lastabschaltung entstehen variable Kosten in Höhe des Value-of-Lost-Load (VoLL). Der VoLL wird näherungsweise über einen Top-down-Ansatz mit Hilfe makroökonomischer Kennzahlen (Umsatz und Strombezug der Branche) ermittelt. Branchenspezifische Werte für den VoLL werden ergänzend zu den bereits benannten Quellen aus /ACER-03 18/ und /RWTH-104 16/ entnommen.

Die Investitionskosten der Flexibilisierung, aber auch die Kosten für den Flexibilitätsabruf unterscheiden sich auch innerhalb einer Branche von Unternehmen zu Unternehmen und hängen von den jeweiligen technisch-organisatorischen Voraussetzungen ab: Alter und Typ der Anlagen, IKT-Infrastruktur, Stand der Umsetzung eines Energiemanagementsystems, zentralisierte Produktionssteuerung, Unternehmens- und Produktionsorganisation wie Schichtbetrieb. Die in der Literatur vorhandenen Kostenschätzungen auf Basis von Unternehmensbefragungen bilden diese Bandbreite nur bedingt ab. So werden Mittelwerte teilweise durch Ober- und Untergrenzen ergänzt. Die in dieser Studie angeführten

Kostenschätzungen müssen also unter dem Vorbehalt betrachtet werden, dass im Einzelfall deutliche Abweichungen nach oben – oder unten – möglich sind.

2.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse in Form von Steckbriefen für alle flexibilitätsrelevanten Prozesse und Technologien zusammenfassend für das Basisjahr 2019 dargestellt und entsprechend ihren Lastmanagementgruppen thematisiert. Nachdem mit Ausnahme von Papier, Chemie und Aluminium für den Status Quo keine erschlossenen Lastmanagementpotenziale vorhanden sind, werden im Folgenden die praktischen Lastmanagementpotenziale ausgewiesen. Die voraussichtlich erschlossenen Lastmanagementpotenziale bis zum Jahr 2045 werden in Kapitel 03 behandelt. Darüber hinaus sind die Parameter der Mindeststillstandszeit sowie Abrufhäufigkeit pro Jahr immer bezogen auf eine Lastreduktion bzw. Lastverschiebung zu verstehen. Für eine Lastabschaltung mit Produktionsausfall konnten keine Werte ermittelt werden.

2.2.1 Industrieprozesse

Papier

Die Papierproduktion gliedert sich unabhängig von der Papierart übergeordnet in drei Abschnitte: die Stoffherstellung, die Papierherstellung sowie die Veredelung. Die Stoffherstellung dient zur Herstellung von Primär- oder Sekundärfasern. Während letztere durch das Recycling von Altpapier gewonnen werden, fallen Primärfasern im Zuge der Zell- oder Holzstoffherstellung an. Nachdem in Deutschland nahezu kein Zellstoff für die Papierherstellung erzeugt /BLES-01 13/, sondern maßgeblich importiert wird, setzen deutsche Papierfabriken sowohl Holz als auch Altpapier als Rohstoff für die Papiererzeugung ein /IGBCE-02 14/. Die Papierherstellung findet anschließend in der Papiermaschine statt, in der unter anderem eine Vielzahl an dampfbeheizten Trockenzyklindern durchlaufen werden. Im Anschluss an die Trockenpartie folgt oftmals ein Glättwerk mit temperierten Kalandrierwalzen, wodurch die Papierbahn eine glatte Oberfläche und gleichmäßige Blattdicke erhält, bevor sie final aufgerollt wird. /VDP-02 15/, /BLEC-01 13/, /BMW-01 19/

Im Rahmen der Papierproduktion sind insbesondere die Holzstoffherstellung (siehe Tabelle 2-3) mit Holzschleifern sowie nachgelagert die Papierherstellung (siehe Tabelle 2-4) von Interesse.

Tabelle 2-3: Steckbrief Holzstoffherstellung

Holzstoffherstellung						
Kategorie	Industrieprozess					
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹	Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr	
336 MW	2,5 TWh		0,9 Mio. t		2019	
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststillstandszeit ⁹	Abrufhäufigkeit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
51 %	20 %	73 %	>5 h	5 h	3 h	1.095
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschiebung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
461	200	1.470	2.300		2.000	

Quellen: (1, 7, 8, 10, 11, 12) /STEU-01 17/ (2) /NAV-02 19/ (3) /AGORA-07 20/ (4, 5) /LGR-01 15/ (6, 14, 15) /DLR-01 21/ (9) berechnet (13) /RWTH-104 16/

Holzschleifer weisen im Rahmen der Holzstoffherstellung hohe elektrische Anschlussleistungen im zweistelligen Megawattbereich auf und werden meist im Batchbetrieb betrieben /BMVIT-01 11/. Dies stellt günstige Voraussetzungen für einen energieflexiblen Betrieb dar, wird jedoch durch das begrenzte Speichervermögen des erzeugten Zwischenproduktes /ETH-01 07/ im Stundenbereich limitiert /UBK-187321/. Zudem kommen Holzschleifer meist in Form von Schleiferpools derzeit nicht nur im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV), sondern auch zur Bereitstellung von Sekundär- (SRL) und Minutenreserve (MRL) zum Einsatz /FFE-77 21/.

Im Gegensatz dazu ist das Flexibilitätspotenzial der Papiermaschine im Rahmen der Papierherstellung aufgrund der hohen Auslastung und eingeschränkten Regelbarkeit begrenzt /BMVIT-01 11/. Vor- und nachgelagerte Prozesse erhöhen zusätzlich den Komplexitätsgrad einer Flexibilitätsnutzung /BMVIT-01 11/. Die Pressenpartie der Papiermaschine weist ein verschiebbares Lastmanagementpotenzial von 10 % auf, sofern diese nicht bei Volllast betrieben wird /ETH-01 07/. Perspektivisch liegt vor allem im Bereich der elektrischen Papierherstellung in Form einer Elektrifizierung der derzeit fossilen Dampferzeugung mittels Industrierärmepumpen und Elektro(den)kesseln ein indirektes Lastmanagementpotenzial im Bereich der Papierherstellung vor, das in Kapitel 3.4 aufgezeigt wird.

Tabelle 2-4: Steckbrief Papierherstellung

Papierherstellung						
Kategorie		Industrieprozess				
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹		Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr
1.400 MW		12,1 TWh		22,8 Mio. t		2019
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststill- standszeit ⁹	Abrufhäufig- keit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
-	10 %	90 %	-	2 h	12 h	156
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschie- bung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
-	200	710	2.300		2.000	

Quellen & Anmerkungen: (1) /STEU-01 17/ (2) /FFE-39 20/ (3) /AGORA-07 20/ (5, 8, 10) /AIT-01 21/ (6) /DLR-01 21/, /IPA-01 19/ (9) /FFE-77 21/ (10) Abrufhäufigkeit bezogen auf Verschiebepotenzial. Abrufe zur Lastabschaltung max. 3 pro Jahr, danach würden viele die Teilnahme an der AbLaV ausschließen /FFE-77 21/. (12, 14, 15) /DLR-01 21/ (13) /ACER-03 18/

Chemie

Die Chlor-Alkali-Elektrolyse stellt ein zentrales Verfahren der chemischen Grundstoffindustrie dar. Durch den Prozess wird eine wässrige Kochsalzlösung unter Einsatz elektrischen Stroms zu Chlor, Wasserstoff und Natronlauge umgewandelt. Als Produkte fallen Chlor und Wasserstoff gasförmig, das Natriumhydroxid als Natronlauge in wässriger Lösung an, dessen Konzentration verfahrensspezifisch ist. /FFE-12 18/

Die zusammenfassenden Ergebnisse sind in Tabelle 2-5 dargestellt. Das technische Flexibilitätspotenzial für eine minimale Teillast aller Anlagen liegt bei ca. 443 MW. Unter der Voraussetzung, dass im Fall der Lastverschiebung die abgerufene Flexibilität innerhalb einer halben Schicht bei gleichzeitig eingeschränkter Anlagenverfügbarkeit wieder kompensiert werden muss, resultiert ein praktisches Flexibilitätspotenzial von ca. 21 MW. /FFE-12 18/

Einige der Unternehmen bieten ihre Flexibilität bereits heute im Rahmen von AbLaV /ÜNB-02 21/ an. Aufgrund der restriktiven Präqualifikationsanforderungen (u. a. an die Lastcharakteristik) auf Seiten der ÜNB kann diese Möglichkeit der Flexibilitätsvermarktung allerdings nur sehr vereinzelt wahrgenommen werden /FFE-12 18/.

Tabelle 2-5: Steckbrief Chlor- Alkali-Elektrolyse

Chlor- Alkali-Elektrolyse						
Kategorie	Industrieprozess					
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹	Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr	
338 MW	11,1 TWh		3,9 Mio. t		2019	
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststillstandszeit ⁹	Abrufhäufigkeit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
1 %	6 %	86 %	8 h	15 min	≤ 24 h	365
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschiebung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
256	150	1.060	200		100	

Quellen & Anmerkungen: (1) /BMW-01 19/ (2) /FFE-39 20/ (3) /AGORA-07 20/ (4, 5, 7, 8, 9, 10) /FFE-12 18/ (4) ggf. auch höher. Bei Primär- (PRL) und Sekundärreserve (SRL) auch 5-10 % möglich /FFE-77 21/. (6, 8, 11, 12, 14, 15) /STEU 01 17/ (7, 8, 9, 10) Die Angaben zur Abrufdauer, Mindeststillstandszeit und Abrufhäufigkeit sind von individuellen Prozessbedingungen abhängig /FFE-77 21/. Abweichungen sind möglich. (13) /ACER-03 18/

Neben der Chlor-Alkali-Elektrolyse stellt die Olefine- und Aromatenproduktion grundsätzlich einen weiteren wichtigen Prozess im Rahmen der Grundstoffchemie dar. Nachdem für die derzeitige Olefine- und Aromatenherstellung kein nennenswerter Stromeinsatz bzw. ausschließlich fossile Brennstoffe zum Einsatz kommen /IER-02 20/, liegt für den Status Quo kein Lastmanagementpotenzial vor. Perspektivisch könnte der elektrische Steamcracker eine wichtige Rolle einnehmen, um zukünftig den Hochtemperaturwärmebedarf der bislang konventionellen Steamcracker in den Raffinerien bereitzustellen /AGORA-07 19/. Hierdurch besteht das Potenzial, zusätzliche Flexibilitätspotenziale zu heben. Da jedoch zur Komplexität, der Art und technischen Betriebsweise sowie daraus möglichen Restriktionen nach aktuellem Kenntnisstand keine Aussage getroffen werden kann (siehe auch Interview in Kapitel 2.3.2), wird diese Technologie im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Glas

Die Glasproduktion untergliedert sich für alle Glasprodukte zur Herstellung von Behälter-, Flach-, Faser- oder Spezialglas in sechs Prozessschritte. In einem ersten Schritt werden mineralische und chemische Rohstoffe sowie Recycling- und Eigenschmelzen miteinander vermischt, um die benötigte chemische Zusammensetzung an Oxidverbindungen in der Schmelze einzustellen. Anschließend folgt das Einschmelzen des Gemenges zu einer blasenfreien und thermisch homogenen Schmelze. Je nach Produkt variiert die darauffolgende Formgebungsmethode. Das Abkühlen und Entspannen der geformten Glasprodukte finden in Kühlöfen statt, um mechanische Spannungen kontrolliert abzubauen. Abschließend folgen gegebenenfalls eine zusätzliche Veredelung sowie die Qualitätsprüfung und Verpackung der Produkte. /FFE-12 18/

Aus heutiger Sicht ist zur Analyse der Flexibilitätspotenziale sowohl für die Hohl- als auch die Flachglasherstellung der energieintensive Schmelzvorgang relevant. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle 2-6 dargestellt. Hierbei werden die installierte Leistung, der Stromverbrauch sowie die Produktionsmengen getrennt zuerst für die Hohlglasherstellung und darauffolgend die Flachglasherstellung ausgewiesen. Weitere Parameter sind für beide Kategorien gleichermaßen gültig. Neben gasbefeuerten Schmelzaggregaten kommen in Deutschland Elektrozusatzheizungen für Produktionsmengen von bis zu 1.000 t/d oder vollelektrische Schmelzeinheiten für Tonnagen von bis zu 50 t/d zum Einsatz. Hierbei weisen die derzeit weltgrößten vollelektrischen Wannenöfen eine tägliche Produktionsrate von ca. 200 t/d auf. /FFE-12 18/

Tabelle 2-6: Steckbrief Hohl- & Flachglasherstellung

Hohl- & Flachglasherstellung						
Kategorie		Industrieprozess				
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹		Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr
75 MW / 13 MW		1,5 TWh / 2,0 TWh		4,0 Mio. t / 2,2 Mio. t		2019
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststillstandszeit ⁹	Abrufhäufigkeit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
33 %	-	81 %	8 min	-	15 h	562
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschiebung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
820	-	1.110	1.500		19.100	

Quellen: (1, 4) /IPA-01 19/ (2) /FFE-39 20/ (3) /AGORA-07 20/ (6, 7, 9) /FFE-12 18/ (10) berechnet (11, 14, 15) /STEU 01 17/ (13) /ACER-03 18/

Durch den Einsatz der Elektrozusatzheizungen (EZH) kann deren elektrische Leistung um bis zu 33 % reduziert bzw. flexibilisiert werden, sofern dies keine Auswirkungen auf die Glasfarbe oder die Tonnage hat. Gleichzeitig erfordert die Reduktion der elektrischen Leistung eine Substitution bzw. Anpassung der konventionellen Beheizung. Energieflexibilität von EZH sind bereits heute in der Vermarktung für SRL – PRL ist ebenfalls denkbar /FFE-77 21/, siehe auch Kapitel 2.3.1. Bei vollelektrischen Schmelzwannen hingegen ist eine Grundlastheizung zu jedem Zeitpunkt einzuhalten, weswegen das Lastmanagementpotenzial stark eingeschränkt erscheint. /FFE-12 18/

Zement

Die Zementherstellung erfolgt primär in drei Abschnitten: der Rohstoffgewinnung inklusive der -aufbereitung, dem Ofenprozess zum Brennen des Klinkers und der Fertigstellung. Hierbei finden insbesondere dem Ofenprozess vorgelagerte Mahl- und Zerkleinerungsschritte in Form der Rohmahlung und nachgelagert der Zementmahlung statt. Rund 70 % des elektrischen Energiebedarfs für die Zementherstellung entfallen auf diese Zerkleinerungsprozesse – davon ca. 20 % auf die Roh- und ca. 50 % auf die Zementmahlung /ECRA-01 15/. In Deutschland existieren derzeit 21 Zementwerke ohne Klinkerherstellung (d. h.

nur mit Zementmahlung) und 34 Zementwerke mit Klinkerherstellung (d. h. sowohl Roh- als auch Zementmahlung am Standort) /FFE-12 18/.

In der Prozesskette der Zementproduktion eignen sich die beiden Mahlprozesse sowohl aufgrund ihres hohen elektrischen Energiebedarfs als auch aufgrund des Speichervermögens ihrer Zwischenprodukte zur Flexibilisierung des elektrischen Energiebedarfs.

Die Ergebnisse sind für beide Prozessschritte entsprechend den heutigen Produktionsstandorten der Zementwerke mit und ohne Klinkerherstellung gewichtet und zusammenfassend in Tabelle 2-7 dargestellt.

Tabelle 2-7: Steckbrief Roh- und Zementmühlen

Roh- und Zementmühlen						
Kategorie		Industrieprozess				
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹		Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr
ca. 506 MW		1,0 TWh		29,2 Mio. t		2019
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststillstandszeit ⁹	Abrufhäufigkeit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
28 %	6 %	70 %	15 h	12 h	48 h	146
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschiebung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
487	200	1.110	1.500		19.100	

Quellen: (1, 4, 5) /FFE-12 18/, /VDZ 02 19/ (2) /VDZ-05 13/, /DENA-17 10/, /VDZ-01 08/, /ROS-01 98/ (3) /AGORA-07 20/ (6, 7, 11) /STEU 01 17/ (8, 9) /VDZ 02 19/ (10) berechnet für Lastreduktion/-verschiebung; AbLaV mit nur wenigen Abrufen denkbar, allerdings nicht unter den aktuellen Präqualifikationsbedingungen, da die Lastgangstabilität auf Minutenbasis zu stark schwankt /FFE-77 21/. (13) /ACER-03 18/ (12, 14, 15) /DLR-01 21/

Darüber hinaus werden maßgeblich für den Klinkerbrennprozess sehr hohe thermische Energien in Form von derzeit fossilen Brennstoffen eingesetzt. Entsprechend des aktuellen Kenntnisstands des Vereins Deutscher Zementwerke würden bei einer Flexibilisierung des Klinkerbrennprozesses die energetischen Verluste und der Anlagenverschleiß im Heißbereich der Anlage weder ökonomisch noch energetisch vertretbar sein /VDZ-02 19/. Aus diesem Grund kann der Brennprozess nach aktuellem Kenntnisstand oder im Rahmen einer perspektivisch potenziellen Elektrifizierung nicht zur Flexibilisierung herangezogen werden /VDZ-02 19/.

Stahl

Die Rohstahlherstellung erfolgt in Deutschland über zwei Prozessrouten: Rund zwei Drittel der Gesamtproduktionsmenge werden über die hauptsächlich fossil befeuerte Hochofen-/Konverterroute in Form von Primärstahl erzeugt, bei der Eisenerze als Rohstoff sowie Koks als Reduktionsmittel zum Einsatz kommen. Circa ein Drittel wird über die Elektroofenroute als

Sekundärstahl hergestellt, bei der Stahlschrott in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl verarbeitet wird. /FFE-12 18/

Die Sekundärstahlherstellung ist aufgrund des hohen elektrischen Energieverbrauchs zur Flexibilisierung von Interesse. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-8 zusammengefasst. Nach aktuellem Kenntnisstand bietet der Elektrolichtbogenofen ausschließlich ein Flexibilisierungspotenzial zur Lastreduktion, indem der Produktionsprozess unterbrochen und die Anlage deaktiviert wird. Diese Energieflexibilitätsmaßnahme kann jedoch nicht beliebig eingesetzt werden, sondern ist auf die Aufschmelzphase limitiert. Ein Energieflexibilitätsausgleich, z. B. durch Nachholen der Produktion mit erhöhter Leistung, ist in der Regel nicht möglich, da die Elektrolichtbogenöfen nicht überlastfähig sind. Eine weitere, kurzzeitige Flexibilitätsoption liegt beim Chargieren von neuem Schrott in den Elektrolichtbogenofen vor, dessen Betriebspunkt durch Verlängerung der Ausschaltzeiten und kurzzeitiger Verschiebung der Zykluszeit variiert werden kann. /FFE-12 18/

Tabelle 2-8: Steckbrief Sekundärstahlherstellung

Sekundärstahlherstellung						
Kategorie		Industrieprozess				
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹		Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr
ca. 2.050 MW		6,6 TWh		12,4 Mio. t		2019
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststillstandszeit ⁹	Abrufhäufigkeit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
11 %	-	95 %	5 min	-	24 h	270
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschiebung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
564	-	620	600		2.800	

Quellen: (1, 4, 5, 6, 7, 10) /BMBF-01 20/ (2) /FFE-39 20/ (3) /AGORA-07 20/ (9) Expertenschätzung (11, 14, 15) /STEU 01 17/ (13) /RWTH-104 16/

Darüber hinaus liegen im Rahmen der derzeitigen Primärstahlherstellung in geringerem Umfang Lastmanagementpotenziale vor, welche allerdings nicht im derzeit fossil befeuerten Produktionsprozess liegen, sondern in der Verstromung von Prozessgasen in eigenen Kraftwerken /NAV-05 19/. Perspektivisch konzentriert sich die konventionelle Primärstahlherstellung in Deutschland auf Direktreduktionsanlagen als neue Route zur Reduktion von Eisenoxid zu Roheisen. Hierzu können zukünftig ebenfalls Elektrolichtbogenöfen mit Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt werden, wodurch deutliche Lastmanagementpotenziale zu erwarten sind, siehe Kapitel 3.4. /AGORA-07 20/

Aluminium

Analog zur Stahlherstellung existieren zur Aluminiumproduktion zwei Prozessrouten (Primär- und Sekundäraluminiumherstellung) mit dem Unterschied, dass zur Herstellung von Primäraluminium mit ca. 75 % hauptsächlich elektrische Energie für den Schmelzprozess in

Form der Aluminiumelektrolyse benötigt wird und für Sekundäraluminium zu über 80 % fossile Brennstoffe zum Einsatz kommen /FFE-143 19/. Vor diesem Hintergrund liegt der Fokus der Lastmanagementpotenziale im Folgenden auf der Primäraluminiumherstellung, deren Ergebnisse in Tabelle 2-9 zusammengefasst sind.

Die Analyse der Lastmanagementpotenziale der deutschen Primäraluminiumindustrie ist auf zwei Unternehmen mit vier Standorten eingrenzbar /FFE-26 16/. Die traditionelle Aluminiumelektrolyse findet in der Regel im Dauerbetrieb bei möglichst gleichbleibenden Prozessparametern statt. Um dennoch eine flexible Fahrweise zu ermöglichen, bedarf es einer Prozessumgestaltung. Die Elektrolysezellen müssen dahingehend technologisch ertüchtigt werden, dass im Fall einer energieflexiblen Fahrweise eine Magnetfeldkompensation sowie eine thermische Kompensation erfolgen kann. Eine derartige Aufrüstung hat *TRIMET Aluminium SE* an der bestehenden Elektrolyse-Halle 1 unternommen, die in dieser Form bisher weltweit einmalig ist. /IPA-01 19/

Anhand dieser Erkenntnisse und Testversuche liegt durch Variation der Stromstärke für den Fall der Lastverschiebung ein technisches Lastmanagementpotenzial von ± 25 % vor, während das praktische Flexibilitätspotenzial derzeit ca. 2 % beträgt /BMBF-01 20/. Tatsächlich erschlossen für die Aluminiumindustrie ist nach aktuellem Kenntnisstand jedoch nur der Fall der Lastabschaltung, dessen Lastmanagementpotenzial bereits heute im Rahmen von AbLaV /ÜNB-02 21/ angeboten wird /FFE-76 21/.

Tabelle 2-9: Steckbrief Aluminiumelektrolyse

Aluminiumelektrolyse						
Kategorie		Industrieprozess				
Allgemeine Parameter						
Installierte Leistung ¹		Stromverbrauch ²		Produktionsmenge ³		Jahr
ca. 1.080 MW		8,8 TWh		0,6 Mio. t		2019
Technologieparameter						
Flexibilisierbarer Anteil der installierten Leistung (praktisches Lastmanagementpotenzial)			Maximale Dauer		Mindeststillstandszeit ⁹	Abrufhäufigkeit pro Jahr ¹⁰
Reduktion ⁴	Verschiebung ⁵	Abschaltung ⁶	Abruf ⁷	Verschiebung ⁸		
0 %	2 %	93 %	2 h	48 h	24 h	91
Kostenparameter						
Abrufkosten [€/MWh]			Kosten der Flexibilisierung [€/MW]			
Reduktion ¹¹	Verschiebung ¹²	Abschaltung ¹³	Investitionskosten ¹⁴		Jährliche Fixkosten ¹⁵	
-	115	620	0 ¹⁶		2.000	
Quellen & Anmerkungen:	(1, 12, 14, 15) /STEU 01 17/ (2) /FFE-39 20/ (3) /BMW-01 19/ (4, 5) /BMW-01 19/ (4) Ein Lastreduktionspotenzial für PRL und SRL ist denkbar. Die Präqualifikationsbedingungen wären vorhanden /FFE-77 21/. (6, 7) /FFE-76 21/ (8, 10) /IPA-01 19/ (7) Die Abrufdauer gilt hier für den Fall der Lastabschaltung: Eine Lastabschaltung ist nur für max. 2 h möglich, da die Schmelze sonst aushärtet und ein Totalschaden vorliegt /FFE-77 21/. (9) Expertenschätzung; innerhalb dieser Zeit mit normalen Produktionsbedingungen darf kein weiterer Flexibilitätsabruf erfolgen. (10) Die Abrufhäufigkeit gilt perspektivisch im Fall der Lastverschiebung. Abrufe im Fall der Lastabschaltung liegen im Rahmen der AbLaV deutlich höher /FFE-77 21/. (13) /RWTH-104 16/ (16) Wert reflektiert, dass Potenziale bereits weitgehend für AbLaV erschlossen und keine weiteren Investitionen mehr notwendig sind.					

2.2.2 Industrielle Querschnittstechnologien und weitere Anwendungsbereiche für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Die Informationen und Parameter zu den Lastmanagementpotenzialen der industriellen Querschnittstechnologien sind zusammenfassend in Tabelle 2-10 dargestellt. Hervorzuheben ist, dass neben dem Potenzial der Lastabschaltung, das in Abhängigkeit der Abrufkosten grundsätzlich immer vorliegt, im Fall von Lüftungsanlagen und der Beleuchtung keine Lastverschiebung, sondern nur eine Lastreduktion gegeben ist. In beiden Fällen ist kein Ausgleich der energieflexiblen Fahrweise möglich bzw. ist im Fall des Betriebs von Lüftungsanlagen aus energetischer und behaglicher Sichtweise nicht zielführend. Im Gegensatz dazu weisen Klima- und Prozesskälte- sowie Raumwärmeanwendungen (insbesondere Wärmepumpen) nur ein Lastverschiebepotenzial auf, bei der eine energieflexible Fahrweise über einen bestimmten Zeitraum wieder ausgeglichen werden muss, um z. B. ein Auskühlen der Büroräume oder eine Überhitzung von Produktionsmaschinen zu verhindern. Darüber hinaus weist die Druckluftherzeugung vor dem Hintergrund eines energieflexiblen Technologieeinsatzes ausschließlich ein negatives, jedoch kein positives Lastmanagementpotenzial auf, weswegen hierfür keine detailliertere Betrachtung erfolgt. /GRUB-01 17/

Aufgrund der Vielzahl an Anlagen liegen im Vergleich zu den Industrieprozessen in Summe signifikant höhere installierte Leistungen und folglich Lastmanagementpotenziale für die industriellen Querschnittstechnologien vor. Charakteristisch ist zudem, dass die Technologien in der Regel unabhängig der Einsatzreihenfolge und Betriebsweise von Produktionsprozessen betrieben werden, dafür jedoch Technologie-typische Nutzungscharakteristiken aufweisen.

Der zuletzt beschriebene Sachverhalt ist analog auf die Technologien im Bereich GHD übertragbar. Für diese beschränkt sich in Abhängigkeit der Abrufkosten das Lastmanagementpotenzial auf eine Lastverschiebung sowie auf eine verlustbehaftete Lastabschaltung.

Das Lastmanagementpotenzial von Rechenzentren liegt insbesondere darin, verzögerungstolerante Arbeitslasten zu verschieben. Dies kann entweder innerhalb eines Rechenzentrums zu einer zeitlichen Lastverschiebung /RUTGU-01 14/, /CIOT-01 12/ oder im Fall von international agierenden Betreibern zu einer räumlichen Verschiebung von Rechenkapazitäten zwischen Rechenzentren eines Verbundnetzwerks führen /IEEE-12 12/, /OSU-01 14/, /UOMEL-01 17/. Zudem besteht die Möglichkeit, Arbeitslasten bzw. den daraus resultierenden Strombedarf durch eine gezielte Implementierung von Algorithmen ohne negative Auswirkungen auf die Dienstqualität zu verschieben /LUN-02 19/. Eine weitere Flexibilitätsoption für Rechenzentren liegt zukünftig in der aktiven Nutzung von Einheiten der unabhängigen Stromversorgung, wie Batteriespeicher und Notstromaggregate, welche derzeit nur für den Fall eines Stromausfalls vorgesehen sind. Aus Systemsicht stellen diese ein zusätzliches, noch nicht erschlossenes Lastmanagementpotenzial für den Netzausgleich dar. /LUN-02 19/

Tabelle 2-10: Steckbrief Industrielle QST und GHD

Industrielle Querschnittstechnologien & Gewerbe, Handel und Dienstleistungen										
Anwendungsbereiche	Allgemeine Parameter			Technologie- und Kostenparameter						
	Installierte Leistung	Stromverbrauch	Vollbenutzungsstunden	Flexibilitätpotenzial [%] / max. Abruf- bzw. Verschiebedauer [h] / Abrufkosten [€/MWh]			Mindeststillstandszeit	Abrufhäufigkeit pro Jahr	Investitionskosten	Jährliche Fixkosten
				Reduktion	Verschiebung	Abschaltung				
Kategorie	Industrielle Querschnittstechnologie									
Beleuchtung	3,1 GW ¹	9,3 TWh/a ²	3.000 h/a ³	7 ⁴ / 4 ⁴ / 0 ⁵	-	51 ³ / >4 ⁶ / 8.550 ⁷	4 h ⁴	365 ⁴	6.200 €/MW ⁸	450 €/MW ⁸
Lüftung	3,1 GW ¹	19,7 TWh/a ^{9,12}	6.260 h/a ³	11 ¹⁰ / 1 ¹⁰ / 5 ¹¹	-	71 ³ / >1 ⁶ / 5.590 ⁷	2 h ¹⁰	780 ¹⁰	10.000 €/MW ¹¹	300 €/MW ¹¹
Klimakälte	9,9 GW ¹	5,0 TWh/a ¹²	500 h/a ³	-	4 ¹⁰ / 1 ¹⁰ / 20 ¹¹	6 ³ / >1 ⁶ / 5.590 ⁷	4 h ¹⁰	1.000 ¹⁰	5.000 €/MW ¹¹	150 €/MW ¹¹
Prozesskälte	2,8 GW ¹	10,2 TWh/a ¹²	3.700 h/a ³	-	4 ¹⁰ / 1 ¹⁰ / 20 ¹¹	42 ³ / >1 ⁶ / 5.590 ⁷	4 h ¹⁰	1.000 ¹⁰	5.000 €/MW ¹¹	150 €/MW ¹¹
Raumwärme & Warmwasser	0,2 GW ¹	1,1 TWh/a ¹²	2.900 h/a ³	-	32 ⁴ / 7 ⁴ / 5 ¹¹	51 ³ / >7 ⁶ / 8.550 ⁷	4 h ⁴	180 ⁴	10.000 €/MW ¹¹	300 €/MW ¹¹
Kategorie	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen									
Rechenzentren	3,8 GW ¹³	14,9 TWh/a ¹³	3.900 h/a ¹³	-	35 ¹⁴ / 5 ^{13,15} / 0 ⁵	45 ¹³ / >5 ⁶ / 8.550 ⁷	3 h ¹⁵	365 ¹⁶	6.200 ⁸	450 ⁸
Abwasser-versorgung	0,8 GW ^{17,18}	4,4 TWh/a ¹	5.700 h/a ¹⁸	-	20 ¹⁸ / 2 ¹⁸ / 0 ⁵	65 ³ / >2 ⁶ / 8.550 ⁷	1 h ¹⁹	1.095 ¹⁸	6.200 ⁸	450 ⁸
Trinkwasser-versorgung	1,0 GW ¹	4,5 TWh/a ^{20,21}	4.400 h/a ¹⁸	-	90 ¹⁸ / 2 ¹⁸ / 0 ⁵	50 ³ / >2 ⁶ / 8.550 ⁷	2 h ¹⁸	1.095 ¹⁸	6.200 ⁸	450 ⁸
Prozesskälte Lebensmittelkühlung	2,8 GW ¹	14,2 TWh/a ^{18,22}	5.000 h/a ³	-	41 ¹⁸ / 2 ²³ / 0	57 / >2 ⁶ / 2.000	22 h ¹⁶	365 ¹⁶	6.200 ⁸	450 ⁸
Quellen & Anmerkungen	(1) berechnet (2) AGEB 2019-2020 (3) im Mittel für RW & WW (3) basierend auf FfE-Erfahrungswerten einer Vielzahl an durchgeführten Energieaudits (4) /AIT-01 21/ (5) /STEU 01 17/ (6) Abrufdauer einer verlustbehafteten Lastabschaltung nicht bekannt, kostenabhängig (7) /UBK 182321/ (8) /FFE-49 16/ (9) anteilig zum industriellen Gesamtstromverbrauch 2019 (10) /GRUB-01 17/ (11) /UBK 182221/ (12) /AGEB-05 21/ (13) /BIFR-01 21/ (14) /LUN-02 19/ (15) /LBNL-01 12/ (16) Expertenschätzung (17) /BMU-06 17/ (18) /DLR-06 14/ (19) /IWIR-01 19/ (20) /DESTATIS-20 21/ (21) /DVGW-02 11/ (22) /BMWI-27 20/ (23) /DENA-21 10/									

2.3 Experteninterviews zu Flexibilitätpotenzialen in der Industrie

Um bestehende Flexibilitätpotenziale zu validieren, Flexibilitätperspektiven einzuschätzen und Hemmnisse der Flexibilisierung nachzuvollziehen, wurden Interviews mit Energieexperten verschiedener Branchen durchgeführt.

2.3.1 Behälterglasproduktion

Bereits heute sind Lastmanagementpotenziale in der Glasindustrie erschlossen. Zur Validierung bestehender Potenziale und Einordnung zukünftiger Potenziale wurde mit Vertretern der Firma *Verallia* ein Interview durchgeführt. *Verallia* betreibt vier Produktionsanlagen für Behälterglas in Deutschland.

- Der Großteil des Energiebedarfs fällt während des Schmelzprozesses an, welcher hauptsächlich durch die Verbrennung fossiler Energieträger (Erdgas und vereinzelt Heizöl) und der direkten Energiezufuhr durch Strom gedeckt wird. Für den Schmelzprozess kommen bivalent betriebene Schmelzwannen zum Einsatz, die sowohl eine brennstoffbasierte Feuerung als auch eine elektrische Zusatzheizung (EZH) für die Energiebereitstellung nutzen.
- Flexibilitätpotenzial besteht durch den flexiblen Einsatz der EZH. Das Potenzial ist bereits erschlossen. So sind EZH mit einer Gesamtleistung von 3 MW für den Regelleistungsmarkt präqualifiziert (bei einer durch Gas und Strom bereitgestellten thermischen Gesamtleistung der Schmelzwannen von rund 50 MW). Zudem werden die EZH für das Spitzenlastmanagement eingesetzt.
- Hemmnisse für die Flexibilisierung sind im Glasherstellungsprozesses begründet. Der Schmelzvorgang wird als kontinuierlicher Prozess betrieben (8.760 Stunden im Jahr), wobei geschmolzenes Glas einen strengen Temperatur-Zeit-Verlauf einhalten muss. Nachfolgende Produktionsschritte sind an den Schmelzprozess gekoppelt. Die Produktionsbetriebe weisen ein flaches Lastprofil auf und optimieren die Anlagenfahrweise auf eine sehr hohe Zahl von Volllaststunden hin (Spitzenlastmanagement). Die Netzentgeltstruktur und Vergünstigungen stellen damit ein regulatorisches Hindernis für die Flexibilisierung dar.
- Perspektivisch steigt der Anteil von Strom an der Wärmebereitstellung für die Schmelzwannen. Derzeit werden etwa 90 % der Wärme über Gas bereitgestellt. Perspektivisch steigt der Anteil von Strom auf 80 %. Damit steigt auch das zur Verfügung stehende Flexibilitätpotenzial erheblich. Die strengen Produktionsparameter schränken die Flexibilisierung jedoch auch zukünftig ein, weshalb ein langfristiger Potenzialabruf nur bei vollständiger Hybridisierung der Schmelzwannen möglich ist. Der einzuschlagende Technologiepfad ist hierbei jedoch noch unsicher.

2.3.2 Grundstoffchemie

In der Chemieindustrie kommen vielfältige Produktionsverfahren für eine Vielzahl chemischer Produkte zum Einsatz. Um bestehende Lastmanagementpotenziale zu validieren und zukünftige Potenziale einzuschätzen, wurde mit *BASF SE* ein Interview durchgeführt. *BASF* betreibt in Deutschland drei große Standorte (>50 GWh), von denen Ludwigshafen mit einem Jahresstromverbrauch von rund 6 TWh der Größte ist. Bis zum Jahr 2035 soll sich der Strombedarf um den Faktor 4 erhöhen.

- *BASF* ist aktiver Teilnehmer an den Strommärkten. Um dort flexibel reagieren zu können, nutzt *BASF* die Flexibilität der drei eigenen GuD-Kraftwerke, die auch den eigenen Strombedarf decken. Die erzeugungsseitige Flexibilität ist aktuell noch einfacher bereitzustellen als nachfrageseitige Flexibilität.
- Die Produktionsanlagen sind bisher nicht auf die Bereitstellung von Flexibilität ausgelegt. Der Stromverbrauch bei *BASF* ist produktionsgetrieben. Die energieintensiven Produktionsprozesse der Grundstoffchemie laufen mit sehr hohen Betriebsstunden (>7.000 Stunden/Jahr), es bestehen keine größeren Zwischenlager und die nachgelagerten Produktionsschritte sind auf die Grundstoffe angewiesen. Das Flexibilitätspotenzial ist daher grundsätzlich stark eingeschränkt.
- Ein gewisses Flexibilitätspotenzial bietet die Chlorelektrolyse. Dieses ist jedoch verhältnismäßig gering (niedriger zweistelliger MW-Bereich).
- Eine Flexibilisierung des Stromverbrauchs wird jedoch aktuell unternehmensintern geprüft.
Künftig könnte der Einsatz von Industriewärmepumpen ein bedeutendes Flexibilitätspotenzial bieten.

2.3.3 Herstellung von Sekundäraluminium

Die Herstellung von Sekundäraluminium wird im Gegensatz zur Herstellung von Primäraluminium mittels Elektrolyse in der Literatur zu Lastmanagementpotenzialen bisher nicht beschrieben, weshalb ein Interview mit Vertretern der Firma *Novelis Deutschland GmbH* durchgeführt wurde. *Novelis* betreibt in Deutschland am Standort Nachterstedt das weltweit größte Aluminiumrecyclingwerk. Folgende Erkenntnisse konnten aus dem Interview gewonnen werden:

- Der Produktionsprozess im Recycling-Werk gliedert sich in folgende Schritte: Schreddern und Sortieren des Rohmaterials; Entlackung mittels Drehrohrofen; Vorwärmung mittels Vorwärmofen; Schmelzen und Legieren mittels Schmelzofen (Schritte Entlackung, Vorwärmen, Schmelzen als verkettete Produktion); Warmhalten mit Warmhalteofen; Guss mittels Gießlinien; Warm- und Kaltwalzen (extern)
- Produktionsprozess im Gieß- und Walzwerk: Schmelzen und Legieren mittels Schmelzofen; Warmhalten mit Warmhalteofen; Guss mittels Gießlinien; Warm- und Kaltwalzen
- Flexibilitätspotenziale finden sich in den Schmelzöfen der Recycling- und Gießwerke. Hier kommen teilweise flexible Induktionsöfen zum Einsatz. Eine Vermarktung dieser Flexibilität wird aufgrund der sehr hohen Werksauslastungen bisher jedoch nicht vorgenommen.
Perspektivisch kommen für die Schmelzprozesse zunehmend flexible Induktionsöfen zum Einsatz, die gasbetriebene Schmelzöfen ersetzen. Hier entstehen zusätzliche Flexibilitätspotenziale. Aufgrund des mit dem Flexibilitätsabruf verbundenen Produktionsausfalls sind die Abrufkosten der Potenziale sehr hoch.
Walzprozesse bieten weitere Flexibilitätspotenziale. Sie weisen ein sehr volatiles Lastprofil auf. Durch eine angepasste Planung der Walzprozesse könnten Lastspitzen vermieden werden.
- Die kontinuierliche und verkettete Produktion stellt das wichtigste Hemmnis der Flexibilisierung der Sekundäraluminiumproduktion dar. Aufgrund fehlender Materialspeicher zwischen den Prozessschritten und durch die durchgängig hohe Auslastung besteht in der Aluminiumschmelze und nachgelagerten

Produktionsschritten kein Spielraum für Lastverschiebung oder Lastreduktion. Weiterhin profitiert das Recycling-Werk aufgrund der sehr hohen Zahl von Vollbenutzungsstunden von vergünstigten Netzentgelten gemäß § 19 Absatz 2 Satz 2 Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV). Diese Vergünstigungen stehen einer Flexibilisierung potenziell entgegen und stellen ein regulatorisches Hindernis dar.

- Die Walzprozesse sind von Aluminiumschmelze und -guss losgelöst, wodurch eine Flexibilisierung bei einer maximalen Verschiebedauer von 15 Minuten prinzipiell möglich ist. Derzeit existiert jedoch keine zentrale Steuerung verschiedener Prozessschritte, wodurch Prognose und Planung der Batchprozesse des Walzens nicht möglich sind. Organisatorische Hemmnisse stehen hier also der Flexibilisierung entgegen. Darüber hinaus besteht im Hinblick auf Flexibilisierung ein Informationsdefizit. Eine Flexibilisierung des Betriebs stand bisher nicht im Fokus und wurde zugunsten eines unterbrechungsfreien und effizienten Produktionsbetriebes vernachlässigt.

2.3.4 Validierung der Flexibilitätspotenziale in der Primär-Aluminiumindustrie

Zur Validierung der Flexibilitätspotenziale in der Aluminiumindustrie, welche bereits heute erschlossen sind, wurde von der FfE am 04. November 2021 ein Telefoninterview mit der Firma *TRIMET Aluminium SE* geführt. Folgende Erkenntnisse sind darauf zurückzuführen /FFE-76 21/:

- Bei den Energieflexibilitätspotenzialen ist grundsätzlich zwischen Lastabschaltung und Lastverschiebung zu differenzieren.
- Eine Lastabschaltung wird derzeit bereits in der AbLaV angeboten. Im Bedarfsfall wird die Produktion pausiert und es erfolgt mit allen Bestandsanlagen ein maximaler Lastabwurf mit einer Abrufdauer von bis zu 1 oder 2 Stunden. Dies variiert je nach Netzverhältnissen. Die entgangene Produktion ist hierbei verloren und kann nicht wieder aufgeholt werden.
- In Summe sind für die Aluminiumindustrie ausgehend von einer installierten Leistung von ca. 1,1 GW rund 1,0 GW im Rahmen der AbLaV vertraglich vereinbart.
- Im Rahmen einer Lastverschiebung könnte *TRIMET* zum aktuellen Zeitpunkt anhand der technologischen Ertüchtigung einer Elektrolyse-Halle durch eine temporäre, thermische Überlastbarkeit der Anlagen eine Leistung von ± 23 MW ausgehend von einem bestehenden mittleren Arbeitspunkt flexibel im Sinne einer virtuellen Batterie verschieben. Dadurch könnten rund 45 MW im Rahmen eines Lastintervalls flexibel bewirtschaftet werden.
- Hochgerechnet auf ganz Deutschland resultiert – mit entsprechender technologischer Ertüchtigung aller Anlagen – ein technisches Energieflexibilitätspotenzial in Höhe von ca. ± 250 MW.
- Aufgrund derzeitiger Regularien ist es jedoch nicht wirtschaftlich, Energieflexibilität im Sinne einer Lastverschiebung einzusetzen. Regulatorische Hemmnisse liegen insbesondere in § 19 Absatz 2 Satz 2 StromNEV, für die im Rahmen einer Lastverschiebung eine Vollbenutzungsstundenzahl > 7.000 h/a nicht mehr eingehalten werden könnte. Folglich würden individuelle Netznutzungsentgelte entfallen und gleichzeitig lokale, absolute Lastspitzen die Bemessungsgrundlage zur Leistungspreisabrechnung erhöhen, wodurch signifikante Mehrkosten entstehen würden.

- Sobald der regulatorische Rahmen gegeben ist, könnten die restlichen, „konventionellen Elektrolyselinien“ ebenfalls für eine Lastverschiebung umgerüstet werden.

2.3.5 Validierung der angebotenen Flexibilitäten im Rahmen der AbLaV

Zur Validierung der angebotenen Flexibilitäten im Rahmen von AbLaV, wurde von der FfE am 08. November 2021 ein Telefoninterview mit der Firma *Entelios AG* geführt, welche derzeit der bislang größte Aggregator in Deutschland ist. Folgende Erkenntnisse spiegeln anhand der Korrespondenz die Einschätzungen von Entelios wider /FFE-77 21/:

Zusammensetzung AbLaV-Mengen

- Derzeit sind 1.720 MW als abschaltbare Lasten präqualifiziert. Davon erhalten in wöchentlichen Ausschreibungen regelmäßig ca. 800 MW als schnell abschaltbare Lasten (SNL) binnen 15 Minuten und ca. 400 MW als sofort abschaltbare Lasten (SOL) binnen 350 Millisekunden einen Zuschlag.
- Nach aktueller Marktkennntnis setzen sich die präqualifizierten Anlagen mit insgesamt 1.720 MW etwa wie folgt zusammen: ca. 1.000 MW entfallen auf die Nichteisen-Metall-Herstellung (davon der Hauptteil auf die Aluminiumindustrie, ein sehr geringer Anteil auf die Zink- und Kupferindustrie zum Zeitpunkt 11/2021). Weitere 500 MW entfallen auf die Chemieindustrie und ca. 220 MW auf die Papierindustrie. Neben Produktionsanlagen können hierin auch aggregierte Querschnittstechnologien enthalten sein.
- Andere Industrien sind in Deutschland aufgrund der Präqualifikationsbedingungen der ÜNB an der Teilnahme an der AbLaV bisher ausgeschlossen. Dies betrifft insbesondere die Eisen- und Stahlindustrie, die Zementindustrie sowie die Nahrungsmittelindustrie, deren Lastgangprofil nicht mit den Anforderungen der ÜNBs übereinstimmt. Für die Einbeziehung der Eisen- und Stahlindustrie müsste der Minutenmittelwert konstant bleiben, ein Elektrolichtbogenofen beispielsweise kann jedoch nur im Ein-/ Ausbetrieb gefahren werden, wodurch diese Anforderung nicht einzuhalten ist.
- In Frankreich gelten beispielsweise moderatere Anforderungen, für die die Last im Stundenmittelwert konstant bleiben muss. Unter dieser Voraussetzung könnte die Stahlindustrie im Rahmen der AbLaV teilnehmen.

Einsatzmöglichkeiten von Industrielasten

Die wichtigsten Lessons Learned der letzten Jahre sind, dass zum einen die Bedeutung von Industrieflexibilität steigt und zum anderen Branchen ganz unterschiedliche Charakteristika besitzen. Entsprechend kann Industrieflexibilität sehr vielfältig eingesetzt werden:

- *Frequenzhaltung*: Das können die bisherigen SOL-Anlagen leisten, aktuell etwa 400 MW. In Deutschland gelten 350 ms, in Frankreich 5 Sekunden. Beim europäischen System Split am 08.01.2021 haben die 1.200 MW aus Frankreich mit 5 s Reaktionszeit zur Frequenzhaltung ausgereicht. Wenn die deutsche Stahlindustrie durch Anpassung des Lastgangkriteriums ebenfalls im Rahmen der AbLaV teilnehmen könnte, kämen etwa 400-500 MW an bereitgestellter Flexibilität zusätzlich dazu. Würde zudem die Reaktionszeit in Deutschland ebenfalls auf 5 s erhöht, könnten mehrere SNL-Anlagen diese Systemdienstleistung anbieten.
- *Systembilanzstützung*: Dies ist der häufigste Einsatzzweck der AbLaV-Abrufe bisher und kann von allen AbLaV-Anlagen geleistet werden.

- *Engpassmanagement/Redispatch*: Durch den Einsatz von Industrielasten für Engpassmanagement/Redispatch in Süddeutschland könnten einige Kraftwerksneubauten zur Spitzenlastdeckung kompensiert werden. Hierfür ist insbesondere die räumliche Lage der Anlagen von Bedeutung. Etwa 40 % der AbLaV-Anlagen befinden sich in Bayern, weitere 40 % in Nordrhein-Westfalen.
- *Versorgungssicherheit*: Dazu sind insbesondere diejenigen Anlagen, die nicht zur Frequenzhaltung herangezogen werden, in der Lage. Die Aluminiumindustrie kann in Sekundenbruchteilen abschalten, muss produktionsbedingt binnen 1-2 h aber wieder anfahren. Die Papier- oder Zementindustrie kann hingegen über Tage oder sogar Wochen abgeschaltet bleiben; hier spielt der Arbeitspreis als Indikator für die Opportunitätskosten eine wichtige Rolle.

2.4 Kostenpotenzialkurven

Den identifizierten Lastmanagementpotenzialen werden entsprechend der Art der Laständerung, also Lastverschiebung, -reduktion, oder -abschaltung, Kosten zugewiesen. Je nach Branche ergeben sich so mindestens zwei verschiedene Flexibilitätspotenzialniveaus: Ein Teil des Gesamtpotenzials einer Branche kann bereits bei geringeren Kosten abgerufen werden. Zusätzliche Potenziale bis hin zum Gesamtpotenzial können zu höheren Kosten aktiviert werden. Die resultierenden Kostenpotenzialkurven sind in Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3 dargestellt, wobei die verschiedenen Potenzialniveaus als Stufenfunktion zu erkennen sind.

Potenziale bis hin zu einem Preisniveau von 500 €/MWh können vor allem bei der Holzstoffherstellung, der Chlor-Alkali-Elektrolyse sowie der Zementherstellung abgerufen werden. Bei den drei genannten Lastmanagementkategorien sowie der Glasherstellung bestehen jedoch für sehr hohe Preisniveaus über 1.000 €/MWh zusätzliche Potenziale durch Lastabschaltung, wobei auch ein Ausfall der Produktion in Kauf genommen wird. Die ermittelten Kosten für die Lastabschaltung (aus makroökonomischen Daten abgeleitete VoLL) stellen jedoch nur eine grobe Näherung der tatsächlichen Kosten dar, die stark davon abhängig sind, zu welchem Zeitpunkt ein Potenzialabruf angekündigt wird. Schließlich besteht die Gefahr, dass bei einem kurzfristigen Abruf der Flexibilität Produktionsanlagen nicht ordnungsgemäß heruntergefahren werden können und Schäden nehmen könnten. Derartige Schäden sind nicht in Abrufkosten der Lastabschaltung eingepreist.

Für Querschnittstechnologien und im Bereich GHD wurden die Lastmanagementpotenziale für Lastverschiebung und Lastreduktion derart bestimmt, dass ein Einfluss auf die Produktion ausgeschlossen werden kann. Entsprechende Potenziale können daher zu sehr geringen variablen Kosten abgerufen werden, mit Abrufkosten von Null oder knapp darüber. Analog zu den energieintensiven Prozessen können durch Lastabschaltung auch bei QST und im Bereich GHD weitere Potenziale zu höheren Kosten abgerufen werden. Auch hier stellen die branchenspezifischen – und für den GHD-Bereich sehr hohen – VoLL eine grobe Annäherung an die mit dem Abruf verbundenen Kosten dar.

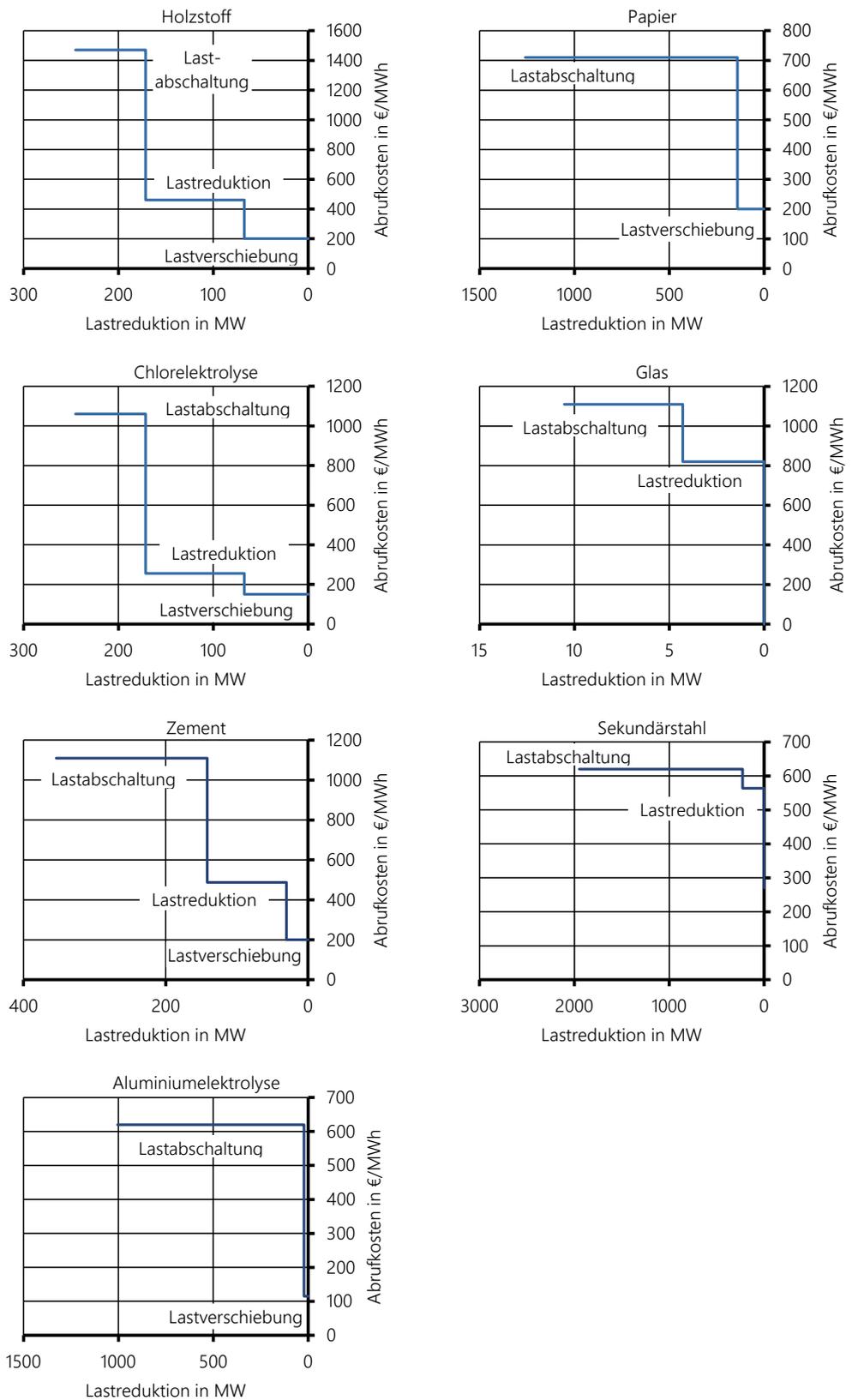
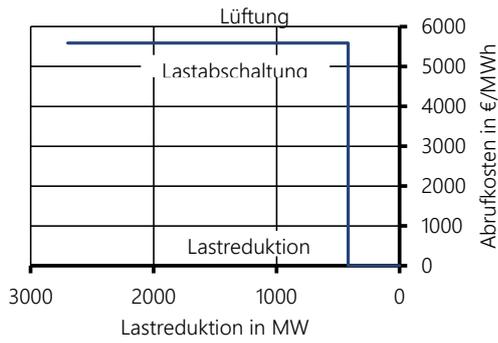


Abbildung 2-2: Kostenpotenzialkurven für Prozesse der energieintensiven Industrie

Industrie-QST



Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

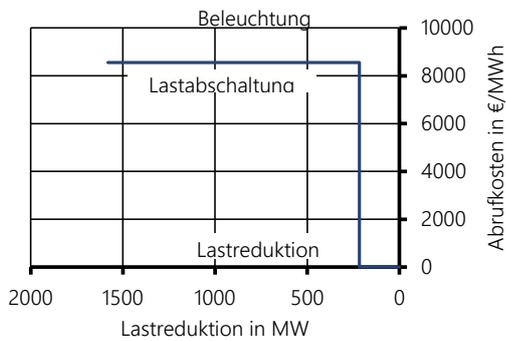
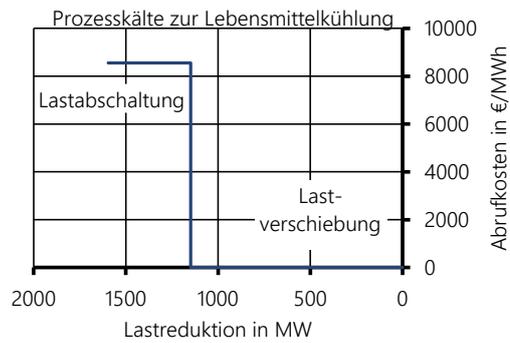
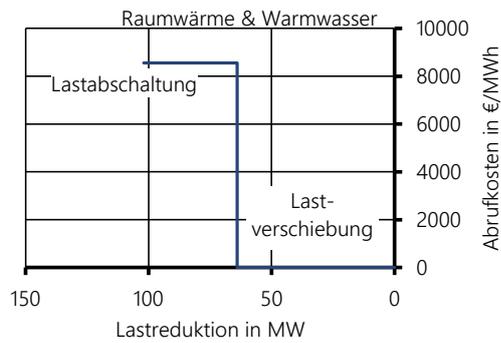
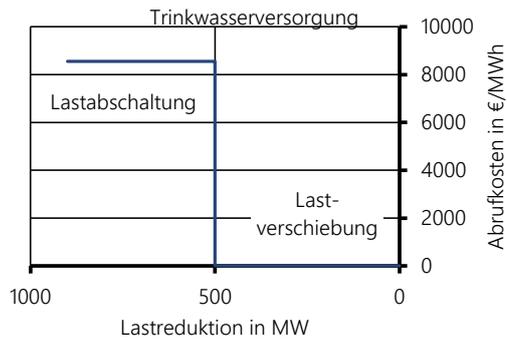
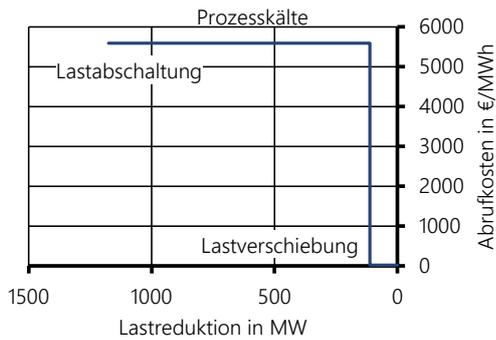
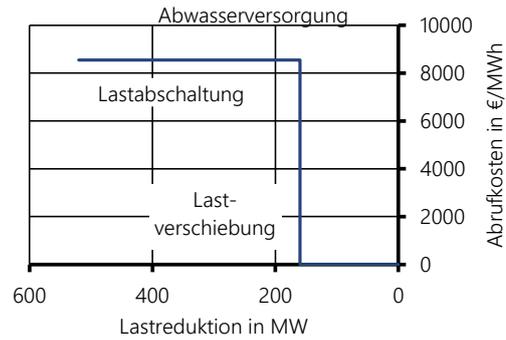
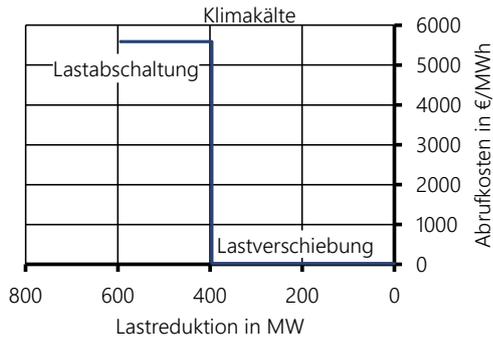
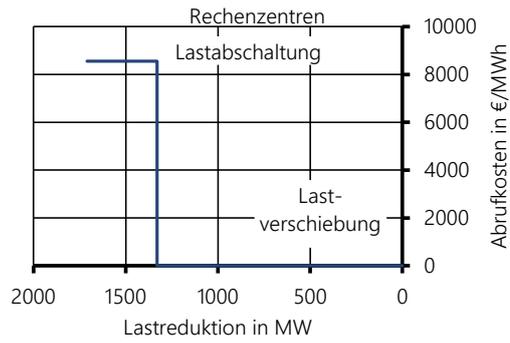


Abbildung 2-3: Kostenpotenzialkurven für QST und GHD

3 Szenarien

Die möglichen Entwicklungen der zukünftigen Lastmanagementpotenziale werden anhand unterschiedlicher Szenarien bestimmt. Das Narrativ der Szenarien, die Methodik zur Ableitung der Potenzialentwicklung sowie die Beschreibung der Szenarienergebnisse für Deutschland sind Inhalt dieses Kapitels.

3.1 Methodik

Die Entwicklung der Lastmanagementpotenziale folgt den Narrativen und den Rahmenbedingungen der im Netzentwicklungsplan (NEP) angenommenen Szenarien, die in Kapitel 3.2 beschrieben werden. Ausgehend vom Referenzszenario B, das sich an der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ (KNDE 2050) orientiert /AGORA-07 20/, /BMJV-02 21/, wird im Bereich der industriellen Prozesse anhand von transformationsspezifischen Produktionsmengenentwicklungen grundlegend die Entwicklung der entsprechenden Lastmanagementpotenziale bis 2045 bestimmt. Zur Beschreibung weiterer möglicher Entwicklungen der Lastmanagementpotenziale dienen neben dem Basisszenario zusätzlich ein Szenario mit einem erhöhten Wasserstoffeinsatz sowie ein Szenario, das sich durch eine hohe Elektrifizierung auszeichnet. Für das Wasserstoffszenario A mit Ausprägung zu einer größeren H₂-Nutzung hinsichtlich Infrastruktur und inländischer H₂-Produktion werden die Produktionsmengen des Referenzszenarios technologiespezifisch auf eine geringere Direktstromnutzung angepasst. Im Fall des Elektrifizierungsszenarios C ist das elektrische Gesamtsystem mit einem höheren Stromverbrauch und einer gesteigerten Erzeugung aus Erneuerbaren Energien größer ausgelegt als im Szenario A. Hierfür werden analog zu Szenario A die Produktionsmengen aus Szenario B auf eine höhere Direktstromnutzung infolge verstärkter Elektrifizierung angepasst. Mittels eines spezifischen Strombedarfs wird in Abhängigkeit der Produktionsmengenentwicklungen, die dem jeweiligen Szenarien-Narrativ folgen, der Stromverbrauch je Technologie und Szenario berechnet. Anschließend erfolgt in Abhängigkeit der definierten Größe des elektrischen, industriellen Gesamtsystems eine lineare Skalierung der einzelnen Technologiestromverbräuche. Für das Basisjahr 2019 sind die installierten Leistungen entweder recherchiert oder mittels Volllaststunden ermittelt und anhand der Produktionsmengenentwicklungen bzw. folglich den skalierten Technologiestromverbräuchen fortgeschrieben.

Im Fall der industriellen Querschnittstechnologien liegt im Gegensatz zu den Industrieprozessen keine Abhängigkeit zu den Produktionsmengenentwicklungen oder dem elektrischen Gesamtsystem vor. Vielmehr wird – zunächst szenarienunabhängig – in Anlehnung an KNDE 2050 eine durchschnittliche Effizienzsteigerung von 0,8 % pro Jahr sowie ein mittleres jährliches Wirtschaftswachstum von 1,3 % unterstellt. Eine Ausnahme bildet an dieser Stelle der Bereich „Raumwärme und elektrische Warmwasserbereitstellung“: in diesem Fall wird das Elektrifizierungspotenzial für Wärmepumpen basierend auf der derzeit fossilen Raumwärmebereitstellung bis 2045 linear skaliert und die Warmwasserbereitstellung in Abhängigkeit der Entwicklung des Industriestromverbrauchs fortgeschrieben, woraus sich entsprechend dem Verhältnis im Basisjahr die zukünftigen, praktischen Lastmanagementpotenziale ergeben.

Die betrachteten Technologien im Sektor GHD, wie zum Beispiel die Abwasser- und Wasserversorgung, sind in Anlehnung an die Studie KNDE 2050 zur Fortschreibung bis 2045

maßgeblich von der Bevölkerungsentwicklung abhängig, welche tendenziell einen Rückgang zu verzeichnen hat. Einen konträren Verlauf weisen die Rechenzentren auf, für die bis 2045 aufgrund der verstärkten Digitalisierung ein exponentieller Zuwachs des Stromverbrauchs bzw. der installierten Leistung zu erwarten ist.

Ausgehend von der zeitlichen Entwicklung dieser installierten Leistungen wird je Technologie das praktische Flexibilitätspotenzial anhand der recherchierten Technologieparameter im Basisjahr (siehe Kapitel 2.2) für den Fall der Lastreduktion zuzüglich der Lastverschiebung und – unabhängig davon – für den Fall einer Lastabschaltung mit Produktionsverlust bestimmt.

Mittels Erschließungsraten je Stützjahr wird anschließend das erschlossene Potenzial ermittelt, das dem Markt tatsächlich zur Nutzung zur Verfügung steht.

3.2 Narrativ der Szenarien

Das **Szenario B (Basisszenario)** entspricht in der Charakteristik der Prognose der Produktionsmengen und des industriellen Stromverbrauchs der Studie KNDE 2050. Demnach steigt der Bruttostromverbrauch der Industrie von 225 TWh im Jahr 2019 auf 290 TWh bis zum Jahr 2045 an. Unter Berücksichtigung der zwischenzeitlich aktualisierten klimapolitischen Zielvorgaben, wonach Deutschland bis 2045 Klimaneutralität erreichen soll /BR-02 21/ und der darauf angepassten Studie KNDE 2045 liegt für das Zieljahr ein industrieller Bruttostromverbrauch von 317 TWh vor /PROG-01 21/. Im Rahmen der gegenwärtigen Studie wird seitens der ÜNB für das Basisszenario ein industrieller Bruttostromverbrauch bis 2038 in Höhe von 296 TWh und bis 2045 von 383 TWh prognostiziert. Die zugrunde liegende Entwicklungscharakteristik der Studie KNDE 2050 wird auf die neuen Zielwerte linear skaliert, siehe auch Abbildung 3-1.

Neben der Charakteristik zur Entwicklung des industriellen Stromverbrauchs anhand KNDE 2050 werden vor dem Hintergrund der Transformation der Industrieprozesse zusätzlich folgende technologiespezifische Annahmen zur Entwicklung der Produktionsmengen getroffen:

- Die Rohstahlerzeugung weist bis zum Zieljahr im Jahr 2045 einen hohen Sekundärstahlanteil von 50 % auf.
- Die Herstellung von High Value Chemicals (HVC) erfolgt überwiegend mit E-Crackern, da diese auch Pyrolyseprodukte verarbeiten können und somit flexibler einsetzbar sind als das Methanol-to-Olefins- (MtO) oder das Methanol-to-Aromatics-Verfahren (MtA)
- Der Glasherstellung werden restriktive Elektrifizierungsraten zugrunde gelegt.
- Die indirekte Elektrifizierung der Papierherstellung in Form von Wärmepumpen und Elektro(den)heizkesseln zur Dampferzeugung erfolgt aufgrund vorhandener Biomasse- und Fernwärmeanteile ebenfalls restriktiv.

Für das **Wasserstoffszenario A** werden aufgrund der Ausprägung zu einer größeren H₂-Nutzung die Produktionsmengen des Referenzszenarios technologiespezifisch auf eine geringere Direktstromnutzung angepasst. Die Übertragungsnetzbetreiber prognostizieren für dieses Szenario bis 2038 einen Bruttostromverbrauch von 268 TWh und bis 2045 311 TWh, vgl. Abbildung 3-1. In Bezug auf die szenarienabhängige Transformation der Industrieprozesse werden abweichend zu Szenario B folgende technologiespezifische Annahmen zur Entwicklung der Produktionsmengen getroffen:

- Alle Werte der Studie KNDE 2050 werden auf eine geringere Direktstromnutzung angepasst, sofern dies als sinnvoll erscheint.
- Die Rohstahlerzeugung weist bis zum Zieljahr im Jahr 2045 einen restriktiven Sekundärstahlanteil von 33 % auf.
- Die HVC-Herstellung erfolgt stärker mittels des MTO-/MTA-Verfahrens, da Standortverlagerungen vor dem Hintergrund einer Abwanderung aus Deutschland nicht so deutlich ausgeprägt erscheinen.
- Die Glasherstellung entspricht Szenario B, da bereits eine untere Elektrifizierungsgrenze erreicht ist.
- Die indirekte Elektrifizierung der Papierherstellung entspricht grundsätzlich dem Szenario B, da auch hier bereits die untere Grenze erreicht ist. Aufgrund eines erhöhten Biomasseeinsatzes wird dennoch von einem etwas geringeren Stromeinsatz ausgegangen.

Im Fall des **Elektrifizierungsszenarios C** ist das elektrische Gesamtsystem mit einem höheren Stromverbrauch und einer gesteigerten Erzeugung aus Erneuerbaren Energien größer ausgelegt als in Szenarien A, jedoch bis 2045 auf Augenhöhe mit Szenario B. Zudem soll die Elektrifizierung noch schneller als in den Szenarien A und B erfolgen. Hierfür prognostizieren die Übertragungsnetzbetreiber bis 2038 einen Bruttostromverbrauch in Höhe von 334 TWh und bis 2045 in Höhe von 383 TWh, siehe Abbildung 3-1. Analog zu Szenario A werden die Produktionsmengen aus Szenario B auf eine höhere Direktstromnutzung infolge verstärkter Elektrifizierung im Rahmen der Transformation der Industrieprozesse angepasst:

- Alle Werte der Studie KNDE 2050 sind auf eine höhere Direktstromnutzung angepasst, sofern dies sinnvoll erscheint.
- Die Rohstahlerzeugung weist bis zum Zieljahr im Jahr 2045 einen sehr hohen Sekundärstahlanteil von 59 % auf.
- Die HVC-Herstellung erfolgt fast ausschließlich mit E-Crackern.
- Die Elektrifizierung der Behälter- und Hohlglasherstellung ist deutlich stärker ausgeprägt, da Wege gefunden werden, entsprechend heute noch kritische Glassorten elektrisch zu produzieren.
- Die indirekte Elektrifizierung der Papierherstellung ist stärker ausgeprägt als in Szenario A, da Biomasse z. T. in anderen Bereichen benötigt und im Rahmen der Papiererzeugung verdrängt wird.

Die Entwicklung des industriellen Bruttostromverbrauchs ist unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Rahmenbedingungen in Abbildung 3-1 je Szenario dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die drei Szenarien bis 2030 dieselben Verbrauchsmengen aufweisen. Dies ist maßgeblich auf Effizienzgewinne und einen daraus verminderten Strombedarf zurückzuführen /PROG-01 21/. Anschließend nimmt der industrielle Stromverbrauch in Anlehnung an die zuvor beschriebene, szenarienspezifische Charakteristik in allen Szenarien bis 2045 sukzessive zu, während den Szenarien unterschiedliche Transformationsgeschwindigkeiten zugrunde liegen. Vor diesem Hintergrund stellen ab 2030 bis 2045 der vollständige Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, die (Prozess-) Elektrifizierung sowie der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger und Rohstoff die wesentlichen Säulen der industriellen Transformation dar /PROG-01 21/.

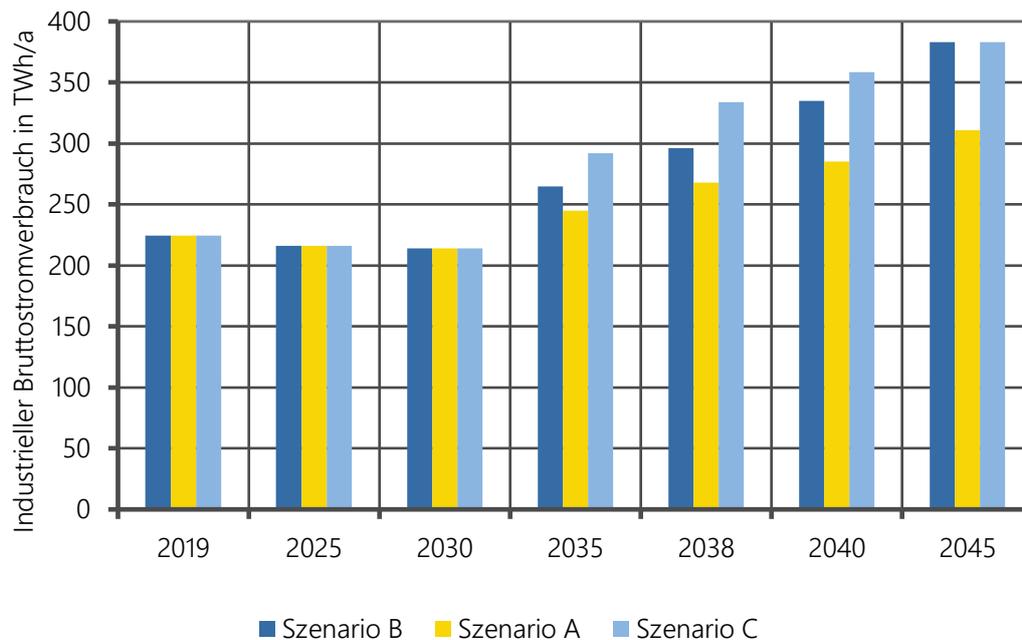


Abbildung 3-1: Entwicklung des industriellen Bruttostromverbrauchs in Abhängigkeit der Szenarien

3.3 Erschließungsraten

Die zukünftige Entwicklung der dem Markt zur Verfügung stehenden Lastmanagementpotenziale hängt von der installierten Leistung flexibler Lasten (theoretisches Potenzial) sowie der Frage, ob diese Potenziale für den Markt erschlossen werden können, ab. Neben einem Szenario für die Entwicklung der installierten Leistung sind damit Annahmen über zukünftige Erschließungsraten notwendig. Die Erschließungsrate stellt dabei den prozentualen Anteil eines Flexibilitätspotenzials dar, der bereits erschlossen wurde.

Die Erschließungsrate wird von der zukünftigen Entwicklung der wirtschaftlichen, regulatorischen und organisatorischen Hemmnisse, die der Flexibilisierung entgegenstehen, bestimmt. Die Erschließungsrate kann durch Modellierung der für eine Flexibilitätsvermarktung relevanten Marktsegmente und eine ökonomische Bewertung der Flexibilitätsoptionen bestimmt werden – unter der Vernachlässigung nicht-wirtschaftlicher Hemmnisse. Der langsame Hochlauf von Energieeffizienzmaßnahmen in der Industrie sowie im Bereich GHD zeigt jedoch, dass auch bei vorhandener Wirtschaftlichkeit sonstige Hemmnisse die Anwendung von Energieeffizienzmaßnahmen verhindern.

Im Rahmen dieses Projektes wird daher für die branchenspezifischen Erschließungsraten ein S-förmiger Kurvenverlauf unterstellt, der den zukünftigen Abbau der verschiedenen Hemmnisse approximiert:

- Wirtschaftliche Hemmnisse: Der Wert der Flexibilität im Stromsystem nimmt mittelfristig stark zu, bspw. durch höhere Preis-Spreads am Spotmarkt. Die Erschließungs- und Abrufkosten sind von konkreten Standortfaktoren der Unternehmen abhängig. Auch innerhalb einer Branche findet sich so eine Bandbreite von Erschließungs- und Abrufkosten, die durch eine Normalverteilung beschrieben

werden kann,¹ dargestellt in Abbildung 3-2. Während für wenige Unternehmen die Erschließungs- und Abrufkosten gering ausfallen und sich eine Flexibilisierung damit frühzeitig lohnt, wird die Flexibilisierung für den Großteil der Unternehmen mit höheren Kosten erst zu einem späteren Zeitpunkt wirtschaftlich attraktiv. Ein geringer Teil der Unternehmen wiederum weist so hohe Kosten der Flexibilisierung auf, dass diese erst zu einem späten Zeitpunkt bei sehr hohen Preisen für die Flexibilitätsbereitstellung stattfindet. Die Kostenverteilung resultiert somit in einem S-förmigen Kurvenverlauf der Marktdurchdringung für Flexibilisierungsmaßnahmen.

- Regulatorische Hemmnisse: Alle regulatorischen Hemmnisse der Flexibilisierung werden zeitnah vollständig abgebaut.
- Organisatorische Hemmnisse: Die Bereitschaft von Unternehmen neue Technologien, wie beispielsweise Lastmanagement, umzusetzen, geht mit der Bereitschaft einher, organisatorische Hemmnisse abzubauen, die der Technologienutzung im Wege stehen. Dabei weisen verschiedene Nutzergruppen bzw. Unternehmen unterschiedliche Einstellungen auf, dargestellt in Abbildung 3-2. Während vereinzelte Nutzergruppen neue Technologien frühzeitig einsetzen, folgt die große Mehrheit erst später nach. Eine kleine Gruppe anpassungsresistenter Nutzer bleibt zurück. Der Hochlauf neuer Technologien – wie auch der Lastflexibilisierung – kann damit durch einen S-förmigen Verlauf beschrieben werden.

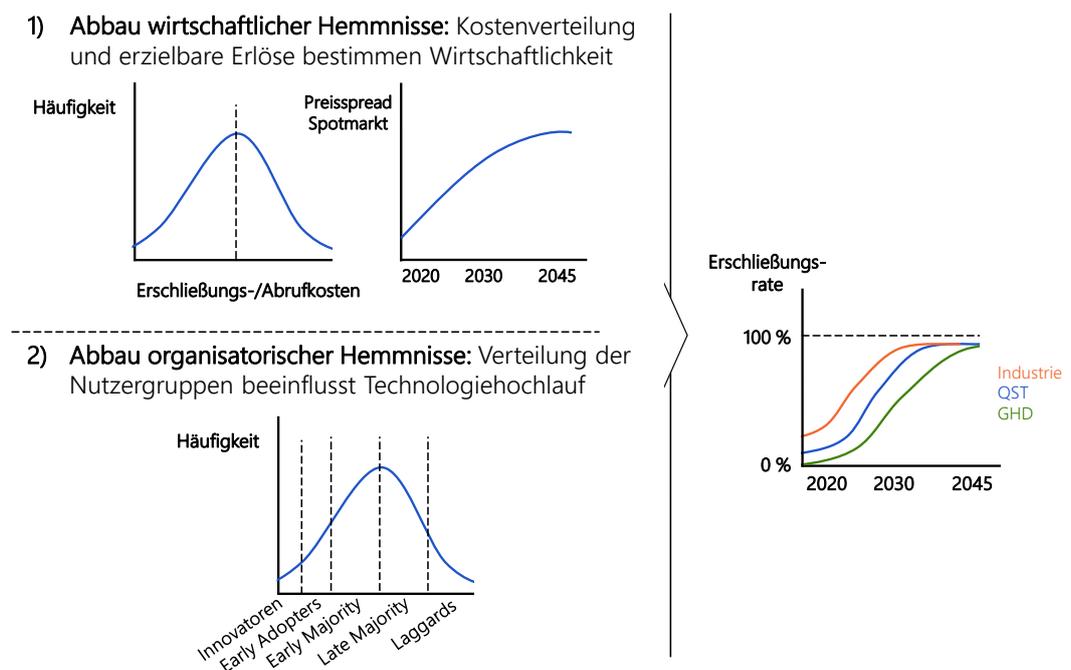


Abbildung 3-2: Einflussfaktoren auf die Erschließungsrate

Die Erschließungsraten werden branchenspezifisch differenziert, um zu reflektieren, dass die Lastflexibilisierung in der energieintensiven Industrie bereits heute einen hohen Stellenwert hat, während sie im Bereich der QST in der Industrie sowie im Bereich GHD noch nicht umfassend genutzt wird. Die Erschließungsrate für Lastmanagementpotenziale in der

¹ Die im Kapitel 2.2 genannten Punktwerte für Erschließungs- und Abrufkosten stellen damit den Mittelwert der Kostenverteilung in einer Branche dar.

Industrie startet demnach von einem höheren Niveau und steigt früher an. Flexibilitätspotenziale der QST im Bereich der Industrie werden zwar derzeit noch nicht umfassend genutzt, können jedoch aufgrund vorhandener Erfahrungen in der Lastflexibilisierung in der Industrie schnell erschlossen werden. Im Bereich GHD sind die Vorbehalte gegen Flexibilisierung aufgrund mangelnder Erfahrung höher und es wird erst später ein Hochlauf erreicht.

3.4 Entwicklung der Lastmanagementpotenziale bis 2045

Im Folgenden wird die Entwicklung der erschlossenen Lastmanagementpotenziale in Deutschland bis 2045 aufgezeigt. Je Szenario erfolgt zunächst ein Gesamtüberblick der aggregierten Lastmanagementpotenziale, bevor anschließend die Ergebnisse für die Industrieprozesse, die industriellen Querschnittstechnologien und den GHD-Bereich dargestellt werden.

Entsprechend den Erkenntnissen aus den Interviews mit *TRIMET Aluminium SE* und *Entelios AG* (siehe Kapitel 2.3) sind für das Basisjahr szenarienunabhängig maßgeblich abschaltbare Lasten im Rahmen der AbLaV erschlossen. Neben einem geringen Anteil der Chemie- und Papierindustrie sowie vereinzelter industrieller Querschnittstechnologien wird das erschlossene Lastmanagementpotenzial für 2019 vor allem durch die Primäraluminiumindustrie mit ca. 1 GW bereitgestellt, was annähernd deren gesamter installierter Leistung entspricht. Es erfolgt die Annahme, dass im weiteren Verlauf die erschlossenen Potenziale der Lastabschaltung im Rahmen der AbLaV für die drei genannten Branchen konstant bleiben. Dennoch ist zu beachten, dass die AbLaV bis zum 30.06.2022 befristet ist und aus heutiger Sicht nicht verlängert wird /FFE-77 21/. Dadurch besteht die Möglichkeit, dass das vorhandene Potenzial im Rahmen der AbLaV ab Mitte 2022 nicht mehr erschlossen ist oder genutzt werden kann /FFE-77 21/. Mit Ausnahme der Kategorie Aluminium erfahren die Lastmanagementpotenziale grundsätzlich und insbesondere einen Zuwachs durch Potenziale der Lastverschiebung und -reduktion.

3.4.1 Szenario B – Basisszenario

Entsprechend dem skizzierten Narrativ für Szenario B und der angewandten Methodik sind in Abbildung 3-3 die erschlossenen Lastmanagementpotenziale bis 2045 dargestellt. Nachdem im Jahr 2019 das erschlossene, positive Lastmanagementpotenzial in Höhe von 1,2 GW nahezu ausschließlich von Industrieprozessen bereitgestellt wird, findet bis 2045 insgesamt ein Anstieg auf 12,6 GW statt. Hierbei gewinnen ab 2030 Lastmanagementpotenziale der industriellen QST sowie GHD zunehmend an Bedeutung, bis diese im Jahr 2045 ca. 70 % des Gesamtpotenzials stellen.

Die Entwicklung der erschlossenen Lastmanagementpotenziale der Industrieprozesse ist in Abbildung 3-4 dargestellt. Insgesamt wird mehr als eine Verdreifachung der Potenziale erwartet, wovon die Aluminiumindustrie fortwährend den größten Anteil beiträgt. An zweiter Stelle gewinnen insbesondere Flexibilitäten der Papierindustrie in Form der prospektiv elektrifizierten Dampferzeugung sowie der Holzstoffherstellung an Bedeutung. Diese steigen ausgehend vom Basisjahr von 75 MW im Jahr 2035 auf 0,6 GW und bis 2045 auf 1,6 GW an und liegen nahezu gleichauf mit der Aluminiumherstellung. Die restlichen 0,4 GW an Lastmanagementpotenzial entstammen im Zieljahr maßgeblich den Roh- und Zementmühlen, der Chlor-Alkali-Elektrolyse sowie der Sekundärstahlherstellung.

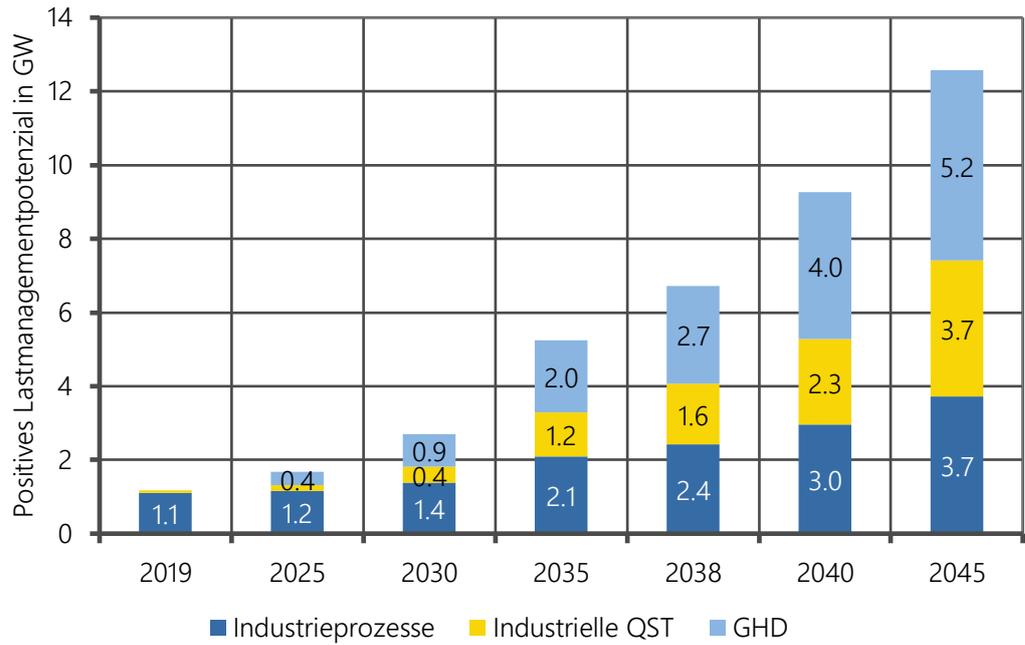


Abbildung 3-3: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial (Szenario B)

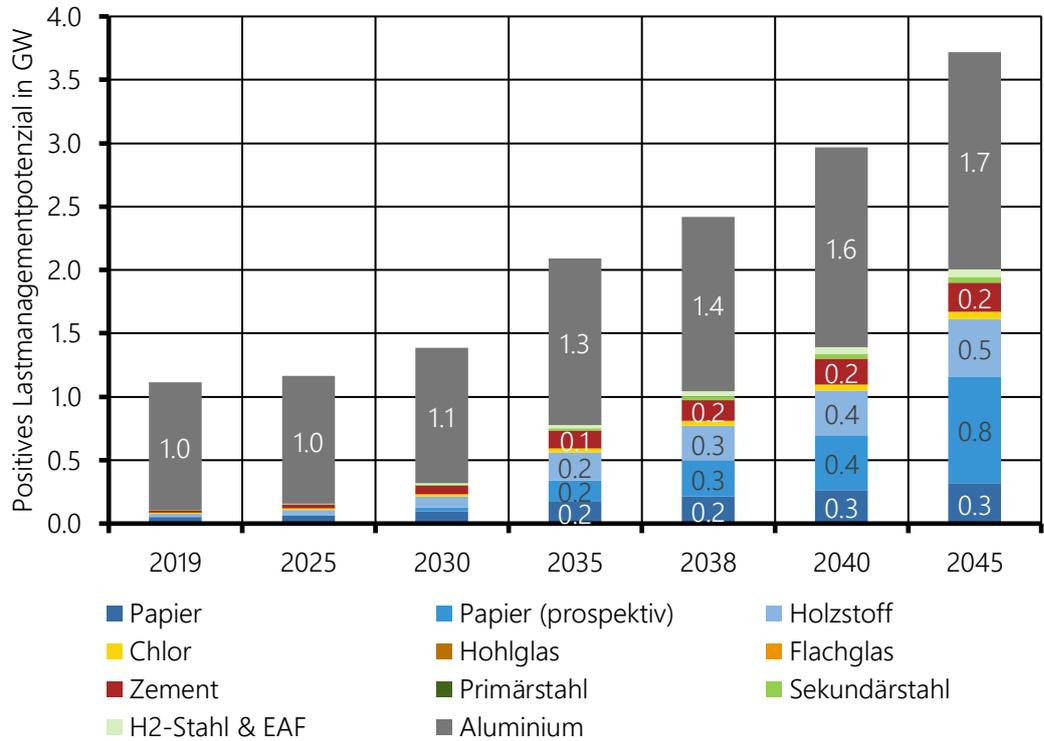


Abbildung 3-4: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial der Industrieprozesse (Szenario B)

Abbildung 3-5 veranschaulicht die erschlossenen Lastmanagementpotenziale der industriellen Querschnittstechnologien. Es wird erwartet, dass diese bis 2045 in Summe auf

4,4 GW ansteigen. Hierbei findet im Durchschnitt alle 5 Jahre näherungsweise eine Verdopplung des erschlossenen Lastmanagementpotenzials statt. Die größten Zuwächse verzeichnet hierbei der Bereich Raumwärme und (elektrische) Warmwasserbereitstellung, der im Jahr 2045 ca. 70 % des Potenzials der industriellen QST und über 20 % des absoluten Lastmanagementpotenzials beträgt. Der überproportionale Zuwachs ist darauf zurückzuführen, dass insbesondere ab 2030 das Elektrifizierungspotenzial zur Raumwärmebereitstellung durch Wärmepumpen sukzessive gehoben wird bei gleichzeitig sinkenden Vollbenutzungsstunden aufgrund größerer Anlageneinheiten. Weiterhin an Bedeutung gewinnen werden zudem Energieflexibilitätspotenziale aus den Bereichen der Kälte-, Klima- und Lüftungstechnik, die zusammen bis 2045 ca. 0,7 GW beitragen. Den Bereichen Prozesskälte sowie Beleuchtung kommt absolut betrachtet eine untergeordnete Bedeutung zu.

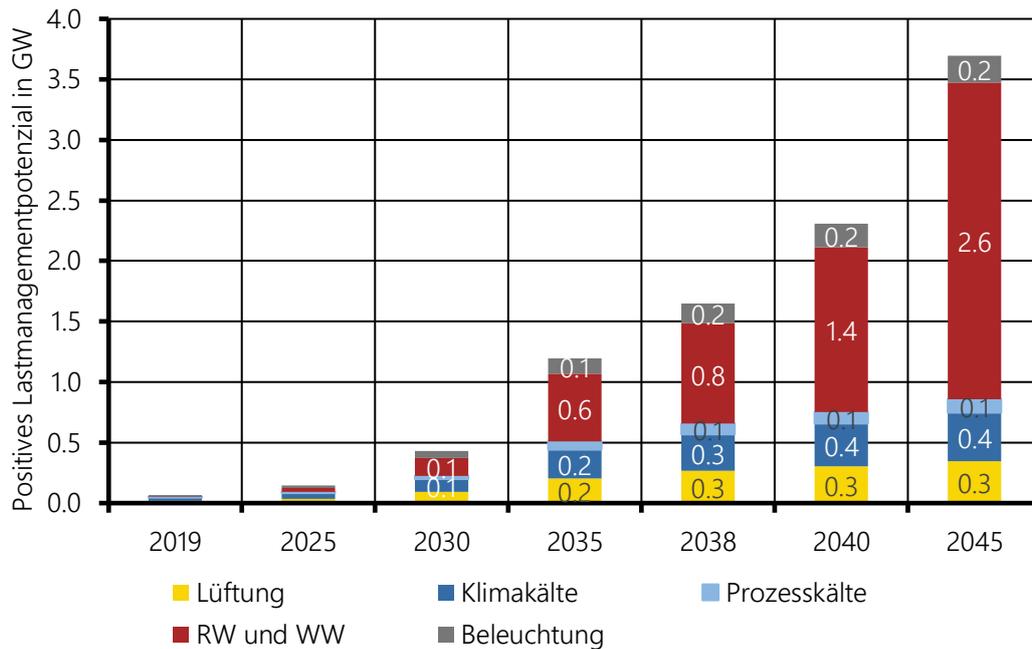


Abbildung 3-5: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial der industriellen Querschnittstechnologien (Szenario B)

Im Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen ist perspektivisch das größte Lastmanagementpotenzial zu erwarten, das gleichzeitig von einer Einzeltechnologie – den Rechenzentren – bereitgestellt wird, siehe Abbildung 3-6. Ab 2025 findet bis zum Zieljahr ein Zuwachs auf insgesamt 5,2 GW statt, wovon Rechenzentren ein Anteil des erschlossenen Lastmanagementpotenzials von knapp 80 % zuzuschreiben ist.

Der ausgewiesene, signifikante Zuwachs und die Relevanz der Energieflexibilitätspotenziale im Bereich der Rechenzentren ist maßgeblich abhängig von deren prognostiziertem Strombedarf. Seit 2010 ist der Energiebedarf deutscher Rechenzentren jährlich um 3 bis 4 % gestiegen – seit 2017 mit einer Verdopplung der Rate von 6 bis 7 % bis zuletzt im Jahr 2020 /BIFR-01 21/. Es wird prognostiziert, dass bis 2025 der Strombedarf aus Rechenzentren mit gleicher Rate sukzessiv auf über 21 TWh steigen wird /UBK-187421/. Mittel- bis langfristig sind Trendbrüche an Effizienzgewinnen und neuen Rechentechnologien vorstellbar /UBK-187421/. Zudem steht Deutschland beim Thema Digitalisierung erst am Anfang, sodass die Nachfrage an Rechenkapazitäten perspektivisch noch deutlich stärker wachsen könnte als bislang /UBK-187421/. In Abstimmung mit den Übertragungsnetzbetreibern wird für das Basisszenario ein Ziel-Strombedarf von 30 TWh bis 2038 und 50 TWh bis 2045 festgelegt.

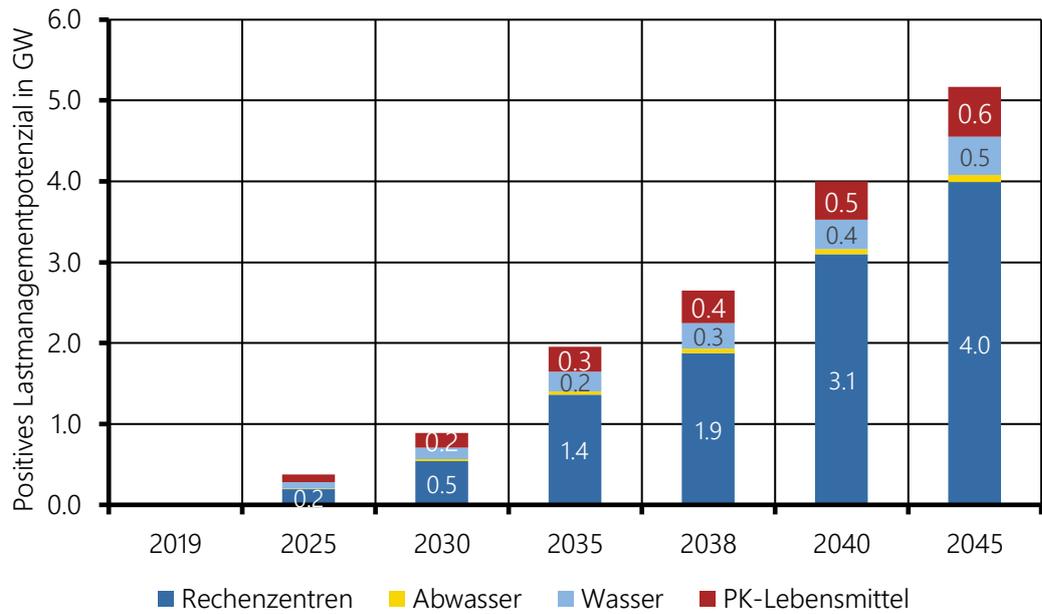


Abbildung 3-6: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial im GHD-Bereich (Szenario B)

3.4.2 Szenario A – Wasserstoff

Unter Berücksichtigung des Narrativs für Szenario A und der angewandten Methodik sind in Abbildung 3-7 die erschlossenen Lastmanagementpotenziale bis 2045 dargestellt. Die Ausgangsbasis im Jahr 2019 ist dabei identisch mit dem Referenzszenario. Bis zum Zieljahr findet insgesamt ein Anstieg auf 9,6 GW statt. Nachdem die Stromverbräuche der industriellen Querschnittstechnologien weitestgehend losgelöst von den Produktionsprozessen der Industrie zu verstehen sind, liegt für diese Gruppe eine identische Entwicklung im Vergleich zum Referenzszenario vor. Aufgrund eines szenarienbedingten und perspektivisch verstärkten Wasserstoffeinsatzes bei den Produktionsprozessen steigen die erschlossenen Lastmanagementpotenziale der Industrieprozesse mit 2,4 GW im Zieljahr 2045 moderater an als in Szenario B. Den erschlossenen Lastmanagementpotenzialen der Gruppe GHD liegt ebenfalls eine abgeschwächte Entwicklung bis zum Jahr 2045 zugrunde, was auf die Annahme eines verminderten Digitalisierungsgrades zurückzuführen ist.

Die Entwicklung der erschlossenen Lastmanagementpotenziale der Industrieprozesse ist in Abbildung 3-8 Lastmanagementpotenziale auf 2,4 GW erwartet. Davon trägt die Aluminiumindustrie analog dem Referenzszenario fortwährend den größten Anteil bei, stagniert jedoch ab 2030 mit einem Anteil von rund 46 % der Industrieprozesse. Bis zum Zieljahr entfallen zudem knapp 50 % der industriellen Lastmanagementpotenziale auf die Zement- und Papierindustrie, wobei letztere ab 2035 analog zum Referenzszenario einen deutlichen Zuwachs erfährt. Im Fall des gegenwärtigen Wasserstoffszenarios liegen für die prospektive Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen mit Wasserstoff als Reduktionsmittel im Vergleich zu Szenario B größere Tonnagen und demzufolge ein theoretisch erhöhter Strombedarf zugrunde. Dennoch resultiert hierfür ein geringeres Lastmanagementpotenzial.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass entsprechend dem Narrativ für Szenario A ein kleineres elektrisches Gesamtsystem angenommen wird. Aufgrund der technologiespezifischen Reskalierung der Stromverbräuche verbleibt folglich für die Stahlherstellung ein geringeres Lastmanagement-potenzial gegenüber dem Referenzszenario B.

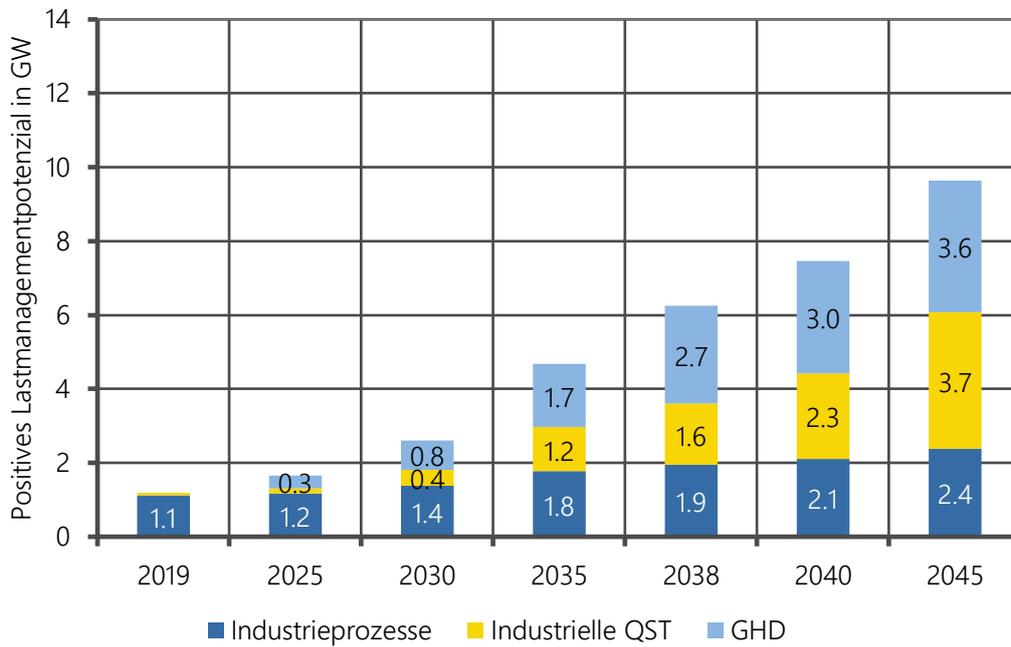


Abbildung 3-7: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial (Szenario A)

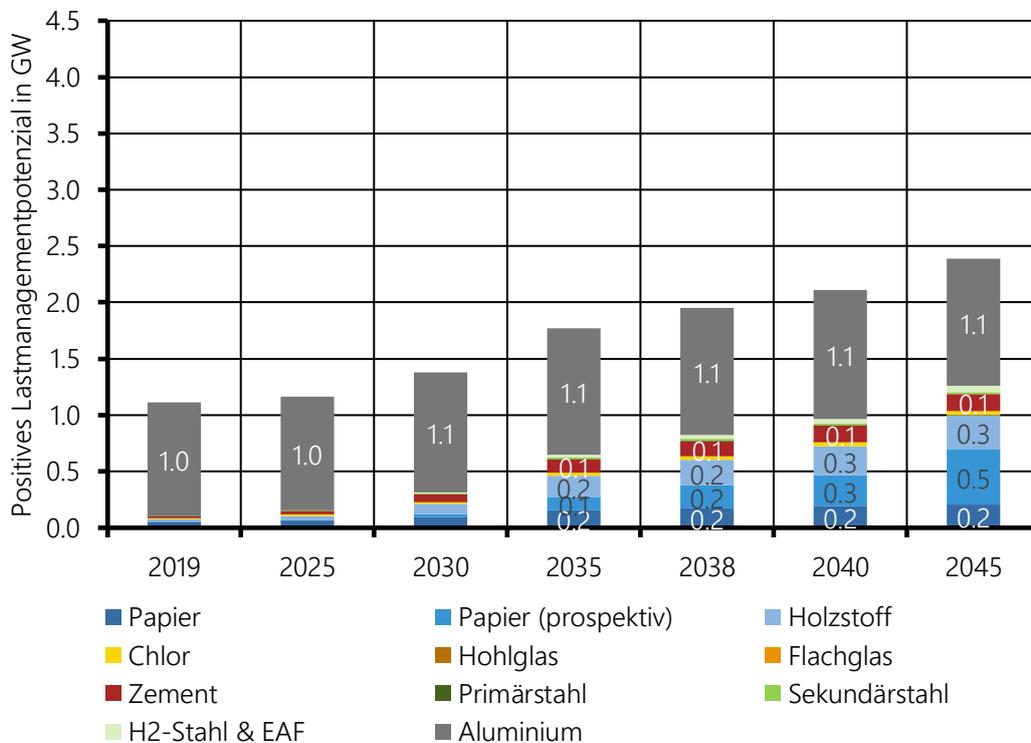


Abbildung 3-8: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial der Industrieprozesse (Szenario A)

Abbildung 3-9 veranschaulicht für Szenario A die erschlossenen Lastmanagementpotenziale der industriellen Querschnittstechnologien. Wie eingangs im Rahmen der Beschreibung von Abbildung 3-7 erwähnt, liegt szenariunabhängig ein identischer Verlauf zum Referenzszenario B vor, weshalb auf eine erneute Beschreibung an dieser Stelle verzichtet wird.

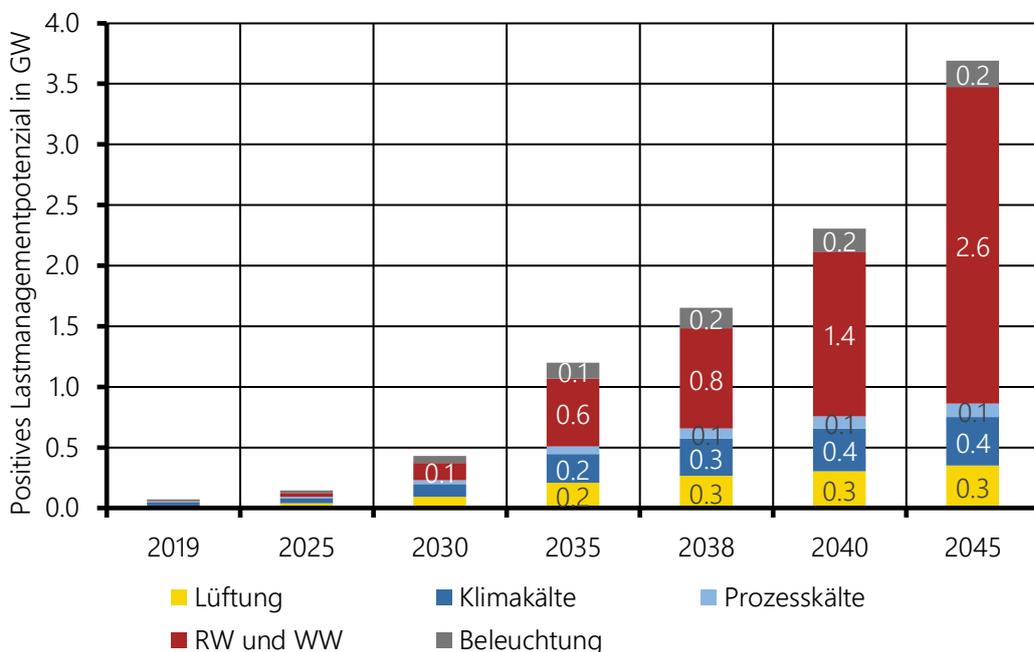


Abbildung 3-9: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial der industriellen Querschnittstechnologien (Szenario A)

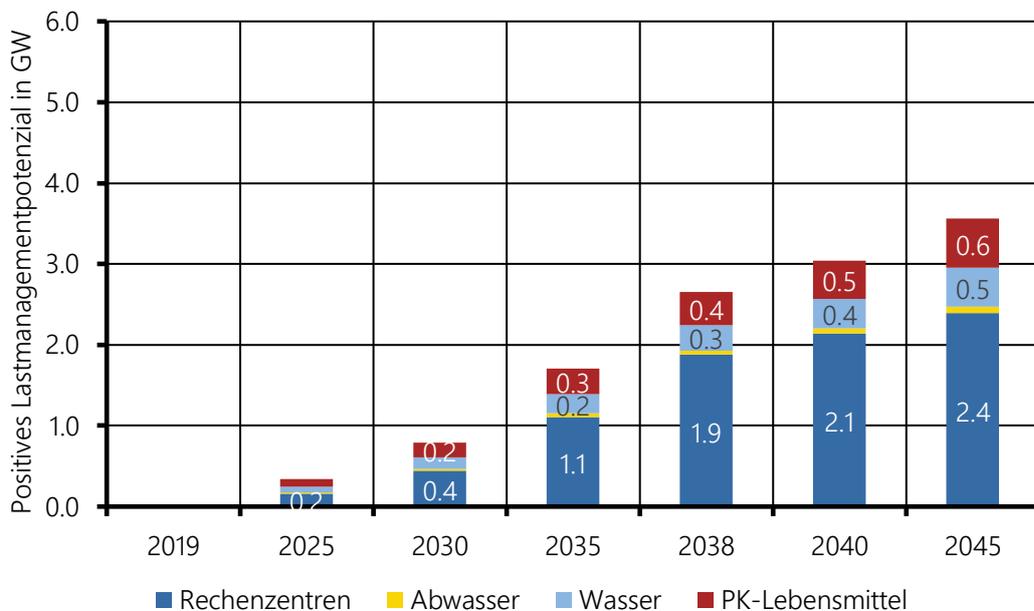


Abbildung 3-10: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial im GHD-Bereich (Szenario A)

Die erschlossenen Lastmanagementpotenziale der Gruppe GHD sind in Abbildung 3-10 dargestellt. Im Vergleich zum Referenzszenario liegt eine abgeschwächte Entwicklung bzw. Zunahme der Lastmanagementpotenziale bis zum Jahr 2045 vor. Aufgrund der Annahme eines verminderten Digitalisierungsgrades wird in Abstimmung mit den Übertragungsnetzbetreibern der Strombedarf für Rechenzentren ab dem Jahr 2038 auf 30 TWh/a gedeckelt. Demzufolge resultiert bei einer im Vergleich zum Referenzszenario identischen Entwicklung der Technologien der Abwasser- und Trinkwasserversorgung sowie der Prozesskälteerzeugung im Lebensmittelbereich in Summe ein positives, erschlossenes Lastmanagementpotenzial bis zum Jahr 2045 in Höhe von 3,6 GW. Davon trägt das Energieflexibilitätspotenzial der Rechenzentren zwei Drittel bei, während der Anteil in Szenario B bei über 75 % liegt.

3.4.3 Szenario C – Elektrifizierung

Die erschlossenen, positiven Lastmanagementpotenziale sind für das Elektrifizierungsszenario C in Abbildung 3-11 zusammenfassend dargestellt. Unter Berücksichtigung des Narrativs und der angewandten Methodik liegt für das gegenwärtige Szenario allen Gruppen folgende Annahme zugrunde: Im Vergleich zu Szenario B erfolgt aufgrund ambitionierterer klimapolitischer Zielvorgaben sowie darauf angepasster Regularien eine um ca. fünf Jahre schnellere Erschließung der Lastmanagementpotenziale. Folglich steigt das erschlossene Lastmanagementpotenzial bereits 2030 auf 3,3 GW an und erfährt innerhalb von fünf Jahren bis 2035 nahezu eine Verdoppelung, bevor in den anschließenden zehn Jahren bis 2045 eine erneute Verdoppelung stattfindet. Vor diesem Hintergrund zeichnet sich bei identischer Ausgangsbasis zum Referenzszenario im Jahr 2019 bis zum Zieljahr insgesamt ein Anstieg der Lastmanagementpotenziale auf 13,5 GW ab. Die Lastmanagementpotenziale der Industrieprozesse erfahren hierbei aufgrund der verstärkten Prozesselektrifizierung anteilig den größten Zuwachs. Während dieser für GHD moderater, aber im Szenarienvergleich bis zum Zieljahr weiterhin ein Maximum aufweist, bleibt das Zielniveau der industriellen Querschnittstechnologien im Vergleich zum Referenzszenario unverändert.

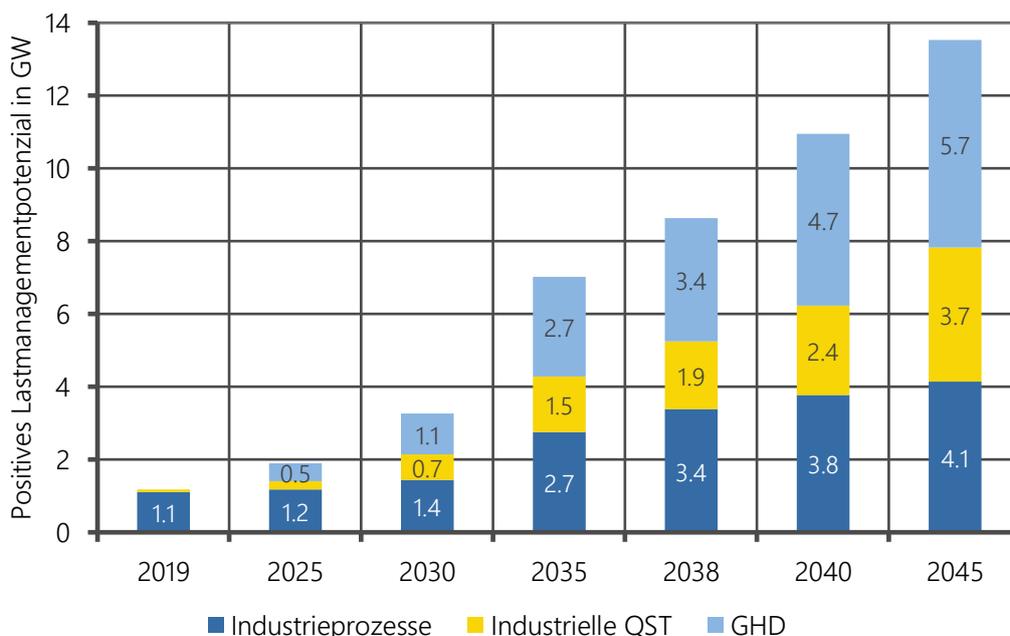


Abbildung 3-11: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial (Szenario C)

Die Entwicklung der erschlossenen Lastmanagementpotenziale der Industrieprozesse ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Insgesamt erfolgt bis zum Zieljahr ein Zuwachs von 3,0 GW gegenüber dem Basisjahr auf 4,1 GW. Insbesondere die Aluminium- und Papierindustrie in Form der prospektiv elektrifizierten Dampferzeugung sowie die Holzstoffherstellung weisen ab 2035 signifikante und im Szenarienvergleich maximale Steigerungen des erschlossenen, positiven Lastmanagementpotenzials auf. Bis zum Zieljahr 2045 tragen die drei Technologiebereiche 3,5 GW bzw. 85 % der Lastmanagementpotenziale der Industrieprozesse bei. Die restlichen 25 % an Lastmanagementpotenzial entstammen im Zieljahr maßgeblich den Roh- und Zementmühlen, der Chlor-Alkali-Elektrolyse sowie der Sekundärstahlherstellung.

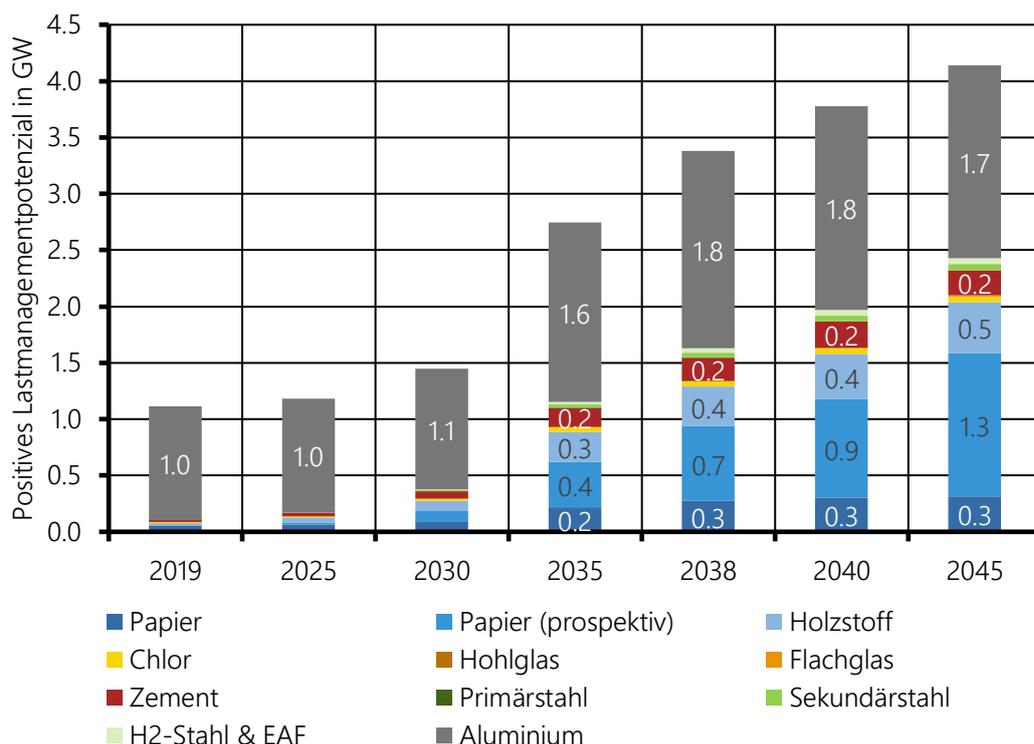


Abbildung 3-12: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial der Industrieprozesse (Szenario C)

Abbildung 3-13 veranschaulicht für Szenario C die erschlossenen Lastmanagementpotenziale der industriellen Querschnittstechnologien. Aufgrund der Annahme einer schnelleren Flexibilitätserschließung infolge angepasster Regularien und verstärkter Anreize liegt bereits 2030 ein Lastmanagementpotenzial in Höhe von 0,7 GW vor, welches in den anschließenden fünf Jahren bis 2035 mehr als eine Verdoppelung erfährt. Neben der zügigeren Elektrifizierung der Raumwärmebereitstellung durch Wärmepumpen weisen analog dem Referenzszenario B die anderen Technologiebereiche eine ähnliche Charakteristik auf, sodass bis zum Zieljahr 2045 insgesamt das gleiche Flexibilitätsniveau für die industriellen Querschnittstechnologien erreicht wird.

Die erschlossenen Lastmanagementpotenziale der Gruppe GHD sind in Abbildung 3-14 dargestellt. Im Vergleich zum Referenzszenario liegt bis zum Zieljahr 2045 insgesamt mit 5,7 GW ein moderat erhöhtes Lastmanagementpotenzial vor, während dieses aufgrund der ambitionierteren Erschließung ab 2030 signifikant größer ausfällt. Neben dem Technologiebereich der Prozesskälteerzeugung im Lebensmittelbereich und der

Wasserversorgung stellen Lastmanagementpotenziale aus dem Bereich der Rechenzentren ab 2035 mit 1,7 GW im Verlauf bis 2045 mit 4,0 GW weiterhin den größten Hebel zur Flexibilitätsbereitstellung dar.

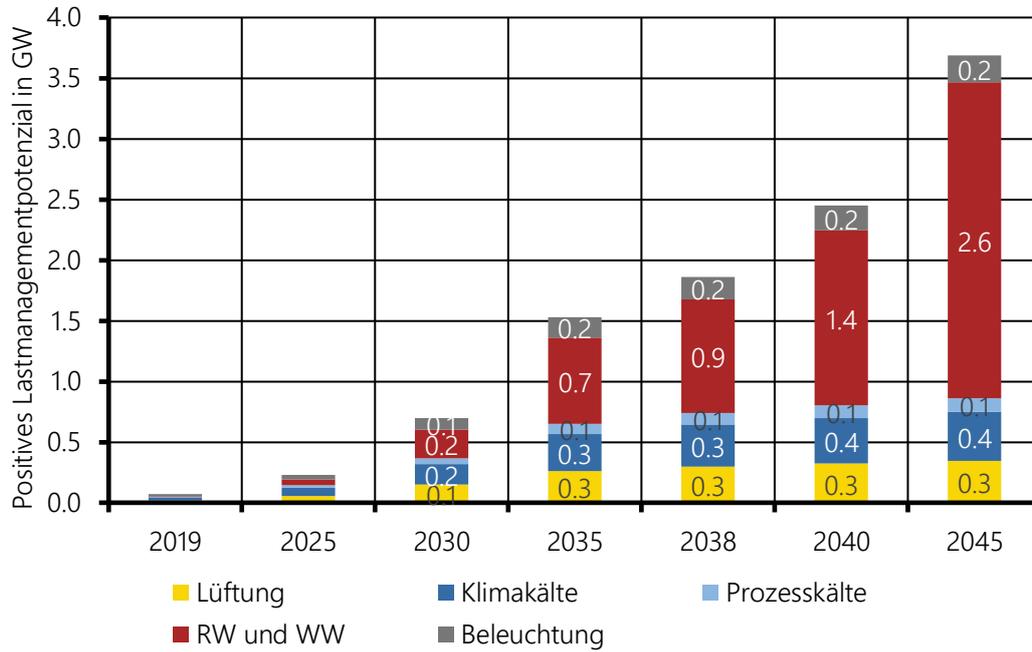


Abbildung 3-13: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial der industriellen Querschnittstechnologien (Szenario C)

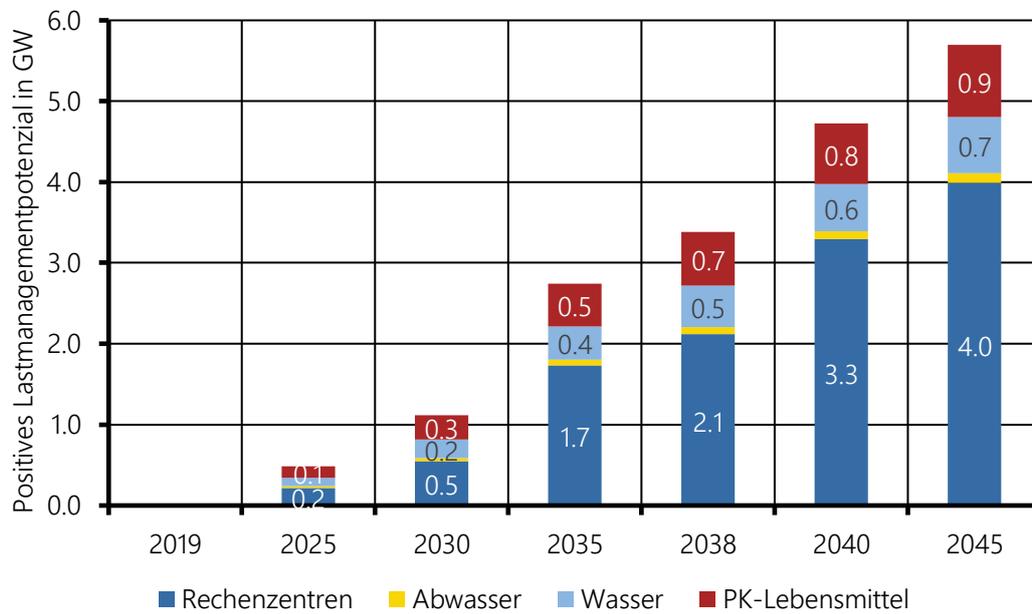


Abbildung 3-14: Erschlossenes positives Lastmanagementpotenzial im GHD-Bereich (Szenario C)

4 Regionalisierung der Lastmanagementpotenziale

Um die Möglichkeiten für den markt- und netzdienlichen Einsatz der bestehenden und zukünftigen Lastmanagementpotenziale abschätzen zu können, ist deren räumliche Verteilung mitentscheidend. Zur Bestimmung der räumlichen Verfügbarkeit der erhobenen Flexibilitätspotenziale wird daher auf Ebene der Landkreise eine Regionalisierung durchgeführt. Nachfolgend werden die zugrundeliegende Methodik sowie die Ergebnisse beschrieben.

4.1 Methodik

Die Regionalisierung erfolgt in Abhängigkeit der Lastmanagementgruppen Industrieprozesse, Industrie-QST und GHD anhand unterschiedlicher Kriterien. Diese Kriterien stellen Indikatoren dar, die der Verortung der Lastmanagementpotenziale dienen. Der sich aus den Regionalisierungskriterien für jede Lastmanagementkategorie abgeleitete Regionalisierungsschlüssel bleibt in allen Szenarien und Jahren gleich. Die Höhe des erschlossenen Lastmanagementpotenzials je Lastmanagementkategorie und Jahr wird von den Szenarien vorgegeben.

Industrieprozesse

Als Indikator zur Verortung des Lastmanagementpotenzials der Industrieprozesse wird die heutige Produktionsmenge je Produktionsstandort und Prozess verwendet. Anhand der Produktionsmenge und dem spezifischen Stromverbrauch der jeweiligen Prozesse wird deren Prozessstromverbrauch abgeleitet und als Regionalisierungskriterium eingesetzt. Hierbei werden die verschiedenen Mahlverfahren in der Zementindustrie sowie die unterschiedlichen Herstellungsverfahren bei der Chlor-Alkali-Elektrolyse berücksichtigt. Als zukünftige Standorte der Stahlherstellung mit H₂ und EAF, werden die heutigen Standorte der Primärstahlherstellung unterstellt. Die Datengrundlage zu den spezifischen Verbräuchen stammen aus /HÜB-01 17/ und /FFE-24 21/, die Hauptquellen zu den Produktionsstandorten und -mengen sind in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Datengrundlage zu Produktionsstandorten und -mengen

Art der Quelle	Quelle
Studien	<p>Schneider, Clemens et al.: klimaneutrale Industrie - Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Berlin, 2020 /AGORA-11 20/</p> <p>Brunke, Jean-Christian: Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland, 2017 /BRUNK-01 17/</p> <p>Bundeskartellamt 2017: Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton /BKARA-01 17/</p> <p>Döring, Przemko et al.: Holz- und Zellstoffindustrie 2015 - Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. Hamburg, 2017 /UHH-03 17/</p>
Verbände – Mitgliederverzeichnis und Jahresberichte	<p>Euro Chlor 2020: Chlor-alkali industry review 2019-2020 /ECL-02 20/</p> <p>Bundesverband Glas (BV Glas)</p> <p>Wirtschaftsvereinigung Stahl</p> <p>Vereins Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ)</p> <p>Die Papierindustrie</p>

Industrie-Querschnittstechnologien

Die Regionalisierung der Lastmanagementkategorien innerhalb der Industrie-QST erfolgt anhand dem auf Landkreisebene erhobenen industriellen Stromverbrauch nach Wirtschaftszweig und Querschnittstechnologien. Hierfür wurde zunächst der Stromverbrauch der in der Studie betrachteten energieintensiven Prozesse über Produktionsstandorte und -mengen, wie oben beschrieben, regionalisiert. Die Verortung des verbleibenden Stromverbrauchs wird anhand der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten nach Wirtschaftszweig /UBK-185521/ vorgenommen. Hierbei wird ein in /FFE-119 20/ beschriebenes, iteratives Verfahren eingesetzt, das sowohl den in der Regionalstatistik ausgewiesene Stromverbrauch der Landkreise im verarbeitenden Gewerbe /DESTATIS/, als auch den Stromverbrauch nach Wirtschaftszweigen für Deutschland /Energiebilanz/ berücksichtigt. Die Anteile der QST am Stromverbrauch der Wirtschaftszweige wurde in /GRUB-01 17/ untersucht.

Gewerbe, Handel und Dienstleistungen

Abwasserbehandlung, Wasserversorgung und Lebensmittelkühlung erfolgen meist in unmittelbarer Nähe zur Bevölkerung. Die dafür benötigten Kapazitäten sind für die Versorgung der ansässigen Bevölkerung. Zur Regionalisierung der genannten Lastmanagementkategorien wird daher die Bevölkerung auf Landkreisebene /UBK-185621/ als geeignetes Kriterium verwendet. Eine Regionalisierung des Lastmanagementpotenzials von Rechenzentren wird im Rahmen dieser Studie nur auf Bundeslandebene durchgeführt. Diese basiert auf aggregierten, von den ÜNB bereitgestellten Netzanschlussleistungen von Rechenzentren, die bereits betrieben werden, sich Planung befinden oder für die mindestens einen Netzanschluss(vor)antrag gestellt wurde.

4.2 Ergebnisse

Die kleinräumigen Regionalisierungsergebnisse auf Landkreisebene werden exemplarisch für Szenario B in Form einer Heatmap-Darstellung visualisiert. In Abbildung 4-1 ist die Summe des abschaltbaren, reduzierbaren und verschiebbaren erschlossenen Potenzials insgesamt und differenziert nach den Lastmanagementgruppen für verschiedene Jahre dargestellt. Das

verschiebbare Potenzial bei der Primäraluminiumherstellung ist darin nicht Bestandteil, da im abschaltbaren Potenzial bereits das Maximum an derzeit abrufbarem Potenzial enthalten ist.

Das verfügbare Potenzial konzentriert sich im Jahr 2025 vor allem auf Hamburg und Nordrhein-Westfalen, da sich dort die Produktionsstandorte von Aluminium mit hohen abschaltbaren Lasten befinden. Ab 2030 zeichnen sich auch in den Lastmanagementgruppen Industrie-QST und GHD zukünftige Hotspots verfügbarer Potenziale mit einer ähnlichen regionalen Verteilung ab. Die in der Studie betrachteten Potenziale konzentrieren sich im Bereich GHD insbesondere auf Regionen mit hoher Bevölkerungszahl, wie großen Städten oder das Ruhrgebiet. Da gerade in letzterem viel Industrie ansässig ist, weist diese Region auch in der Lastmanagementgruppe Industrie-QST ein hohes verfügbares Potenzial auf. In Bayern entstehen, wie im Jahr 2038 deutlich erkennbar, aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von Flexibilität in der Papier- und Holzstoffherstellung sowie in Baden-Württemberg in der Papier- und Zementherstellung größere Potenzialzentren. Im Jahr 2045 ist Lastmanagementpotenzial insbesondere in Nordrhein-Westfalen, Hamburg, Niedersachsen, südliches Bayern und Baden-Württemberg verfügbar.

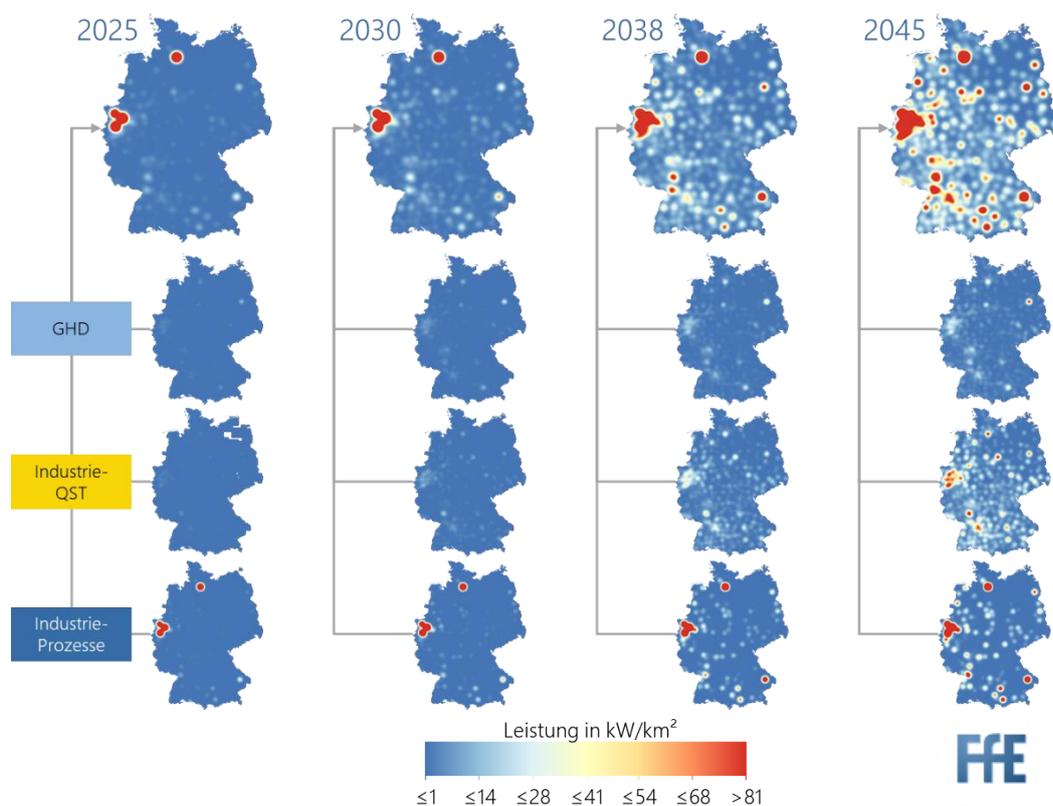


Abbildung 4-1: Regionales Lastmanagementpotenzial nach Lastmanagementgruppe in Szenario B (ohne Rechenzentren)

Obwohl alle Szenarien bezogen auf die Bundesländer eine ähnliche regionale Verteilung aufweisen, existieren in der Höhe und kategoriellen Zusammensetzung der Lastmanagementpotenziale durchaus regionale Unterschiede, siehe Abbildung 4-2. So ist in Szenario C in Regionen mit Produktionsstandorten, bei denen eine zunehmenden Elektrifizierung erfolgt, das Lastmanagementpotenzial industrieller Prozesse deutlich ausgeprägter. Dies ist in Abbildung 4-2 bspw. in Bayern und Nordrhein-Westfalen deutlich zu erkennen. Durch die Berücksichtigung von Rechenzentren wird in allen Szenarien bereits im Jahr 2025 ein großes zusätzliches Potenzial für Lastmanagement insbesondere in Hessen, Berlin und Brandenburg verfügbar, Abbildung 4-3.

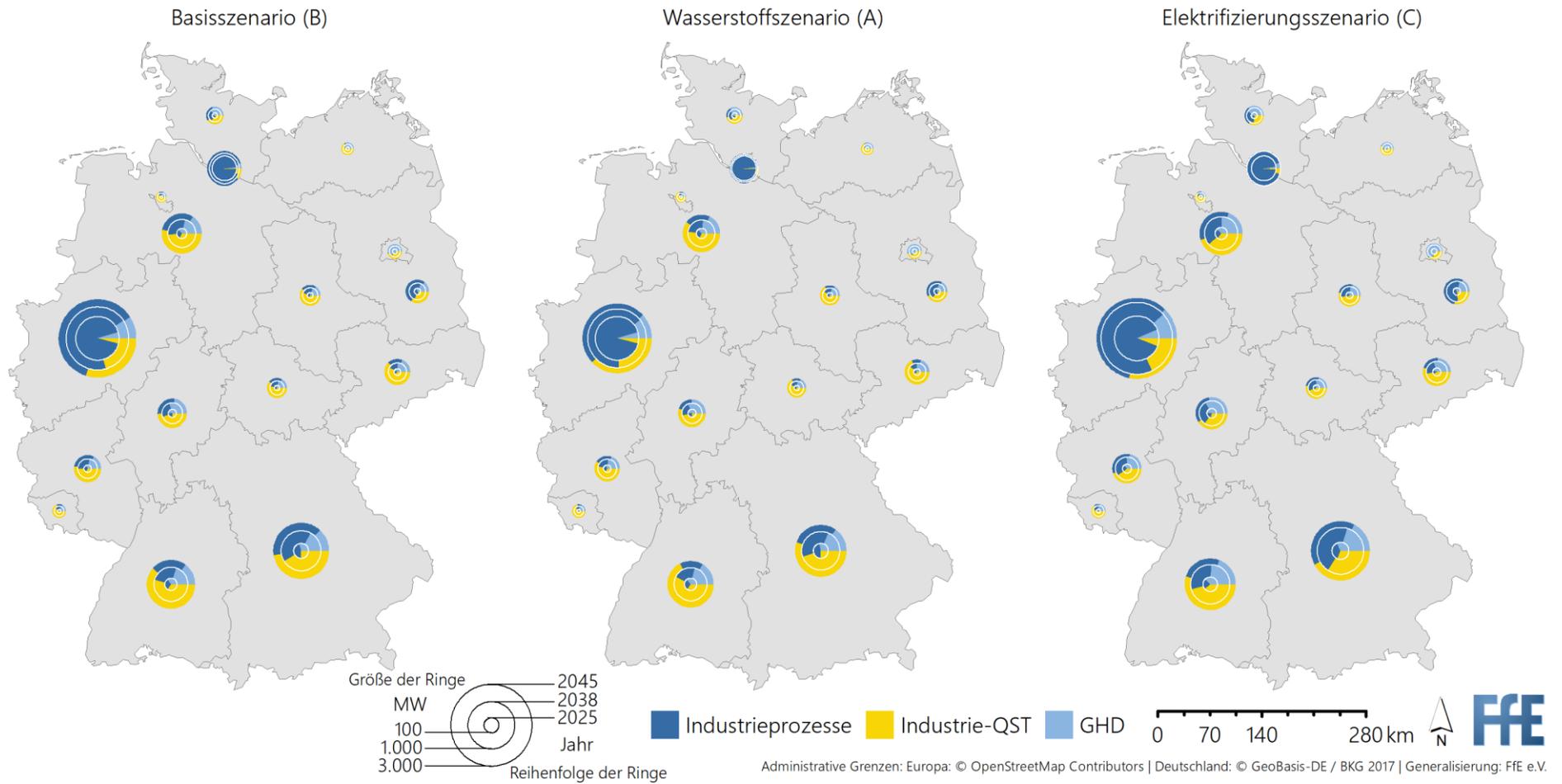


Abbildung 4-2: Lastmanagementpotenzial nach Lastmanagementgruppe und Bundesland (ohne Rechenzentren)

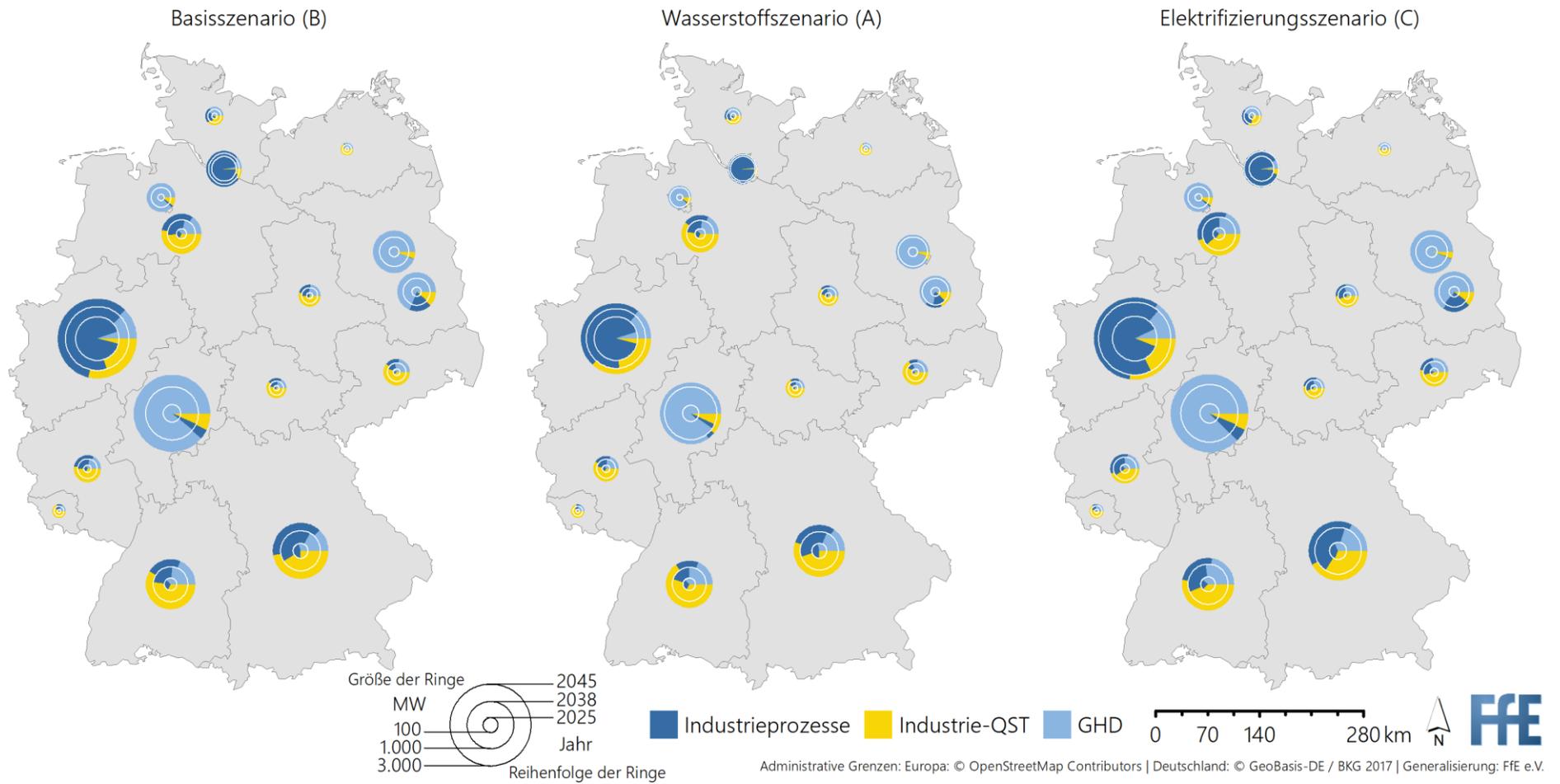


Abbildung 4-3: Lastmanagementpotenzial nach Lastmanagementgruppe und Bundesland (mit Rechenzentren)

5 Zeitliche Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale

Neben der räumlichen Verfügbarkeit ist auch die zeitliche Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale relevant. Daher wird für jede Lastmanagementkategorie eine Zeitreihe angegeben, die die stündliche Verfügbarkeit der jeweils reduzier-, verschieb- und abschaltbaren Leistung in Deutschland für 8.760 Stundenwerte beschreibt.

Dazu wird für jede Lastmanagementkategorie zunächst das Zeitreihenprofil anhand des typischen zeitlichen Stromverbrauchs charakterisiert und darauf basierend für die jeweilige Art des Lastmanagements die stündliche Verfügbarkeit bestimmt.

Zuordnung der Zeitreihenprofile

Die Mehrheit der betrachteten Prozesse der Grundstoffindustrie weist nahezu ganzjährig eine sehr hohe Auslastung (> 7.000 h/a) ohne signifikante saisonale Schwankungen auf. Daher wird für diese Prozesse vereinfachend ein konstantes Verfügbarkeitsprofil angenommen. Da die Verfügbarkeitszeitreihen übergeordnet auf Deutschland-Ebene betrachtet werden, sind mögliche vom Einzelbetrieb abhängige Stillstandzeiten für Wartungs- und Reparaturarbeiten nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz zur ganzjährigen Produktion dieser Prozesse besitzt beispielsweise die Zeitreihe der Zementherstellung, wie in Abbildung 5-1 dargestellt, ein ausgeprägtes saisonales Schichtprofil mit einer Revisions-, zwei Winter- und einer Sommerphase /HÜB-01 17/. Aufgrund der Abhängigkeit der Rohmahlung von den Abgasen des Drehrohrofens /UBA-05 15/, /VDZ-01 08/, /VDZ-01 02/, ist diese während der Revisionszeit außer Betrieb /GRUB-01 17/. Während Winterzeiten produzieren die Roh- und Zementmühlen durchschnittlich nachts im 1-Schichtbetrieb, wohingegen im Sommer die Rohmühlen durchgängig und die Zementmühlen werktags im 2-Schichtbetrieb sowie sonntags durchgängig betrieben werden /HÜB-01 17/. Aufgrund der Fahrweise und ggf. Schwankungen auf Minutenbasis ist unter den aktuellen AbLaV-Bedingungen eine Teilnahme im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten für Zementmühlen ausgeschlossen /FFE 77 21/.

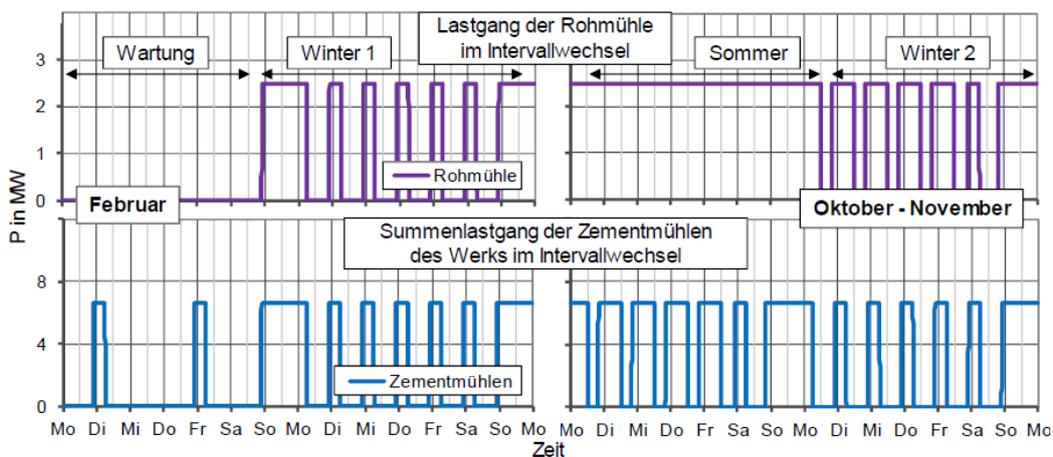


Abbildung 5-1: Lastgänge der Roh- und Zementmühle im Durchschnittswerk /HÜB-01 17/

In Anlehnung an die Prozesse der Grundstoffindustrie wird auch für die Abwasserentsorgung in vereinfachter Näherung ein konstantes Strichprofil angenommen. Basierend auf Regressionsanalysen im Zuge historischer Energieaudits ist die Auslastung von Kläranlagen im Rahmen der Abwasserversorgung maßgeblich vom Niederschlag eines jeden Wetterjahres abhängig, dessen Auftreten in stündlicher Auflösung randomisierter Natur ist. Da die Lastmanagementpotenziale der Abwasserversorgung im Vergleich zu anderen Kategorien als verhältnismäßig gering einzustufen sind, wird folglich der vereinfachte Ansatz angewandt.

Die Kategorien Lüftung, Beleuchtung und Wasserversorgung besitzen tendenziell eine höhere Nutzerabhängigkeit und somit auch ein stärker ausgeprägtes Stundenprofil. Um diese Charakteristik abzubilden, wird für die drei Kategorien das Standardlastprofil für Gewerbe (G0) verwendet. Allgemein sind Standardlastprofile repräsentative Lastprofile, die für Kundengruppen angewendet werden, bei denen ein ähnliches Abnahmeverhalten anzunehmen ist. Im Fall der Kategorien Prozesskälte, Klimakälte und Raumwärme liegt für den Anlagenbetrieb maßgeblich eine Abhängigkeit zur Außentemperatur vor. Daher folgt die Höhe der Verfügbarkeit der mittleren stündlichen Außentemperatur in Deutschland in Abhängigkeit der typischen Heiz- bzw. Kühlgrenztemperatur von 15 °C.

Tabelle 5-1: Charakteristik der Verfügbarkeitszeitreihen

Lastmanagement		Zeitreihencharakteristik
Gruppe	Kategorie	
Industrieprozesse	Papier / Papierprospektiv Holzstoff Chlor Hohlglas Flachglas Sekundärstahl H ₂ -Stahl & EAF Aluminium	Die Produktion erfolgt nahezu ganzjährig ohne charakteristische saisonale Schwankungen. Schwankungen treten eher im Sekunden-/Minuten-Bereich und weniger im Stundenbereich auf. Daher wird näherungsweise ein konstantes Strich-Profil unterstellt.
	Zement	Zement- und Rohmühlen besitzen ein saisonales Schicht-Profil ¹ aufgrund der Abhängigkeit von der Baubranche. Im Winter erfolgt meist keine bzw. bei der Zementmühle eine geringere Produktion.
Industrie-QST	Lüftung Beleuchtung	Tendenziell stärkere Nutzerabhängigkeit und somit stärker ausgeprägtes Stundenprofil, für das das Standardlastprofil G0 ² als repräsentativ betrachtet wird.
	Klimakälte Prozesskälte Raumwärme	Die Höhe der Verfügbarkeit folgt der mittleren stündlichen Temperatur in Deutschland ³ in Abhängigkeit der Heiz- bzw. Kühlgrenztemperatur.
GHD	Wasser	Annahme wie bei Belüftung und Beleuchtung; Standardlastprofil G0
	PK-Lebensmittel	Aufgrund der Abhängigkeit von der Außentemperatur, selbe Annahme wie bei der Prozesskälte als Industrie-QST: mittlere stündliche Temperatur in Deutschland ¹ :
	Abwasser	Konstantes Strich-Profil

¹ Verwendeter Lastgang abgeleitet aus /HÜB-01 17/
² Standardlastprofil G0; Wetterjahr 2012 /FFE 119 20/
³ langjähriges stündliches Mittel der Temperatur (2006-2019) sowie Wetterjahr 2012 /GMAO-01 18/

Ein Überblick über die Verfügbarkeitszeitreihencharakteristik der jeweiligen Lastmanagementkategorie ist in Tabelle 5-1 dargestellt. Die zeitliche Verfügbarkeit des Lastmanagementpotenzials von Rechenzentren wird hierbei von den Übertragungsnetzbetreibern ausgewiesen.

Bestimmung der Verfügbarkeitszeitreihen je Kategorie

Zur Bestimmung der Verfügbarkeitszeitreihen je Lastmanagementkategorie werden in einem ersten Schritt die einzelnen Profiltypen auf einen Maximalwert von 1 normiert. Anschließend findet in Abhängigkeit der Lastmanagementkategorie je Profiltyp eine Reskalierung auf die durchschnittliche Auslastung des betrachteten Prozesses oder der Technologie statt. Die durchschnittliche Auslastung entspricht hierbei jeweils dem anteiligen Lastmanagementpotenzial der Lastabschaltung, die auf den einzelnen Steckbriefen im Rahmen der Technologieparameter in Kapitel 2.2 ausgewiesen sind. Zur Reskalierung wird dem jeweiligen Profiltyp ein Grundlastband in der Höhe eingefügt, das die Vollbenutzungsstunden der Zeitreihe der durchschnittlichen Soll-Auslastung im Jahresmittel entsprechen.

Die auf diese Weise ermittelten Zeitreihen der Lastmanagementkategorien entsprechen gleichzeitig der reskalierten Verfügbarkeitszeitreihe im Fall einer Lastabschaltung. Darauf basierend ergeben sich in Abhängigkeit der ausgewiesenen Flexibilisierungsgrade die ebenfalls den Technologieparametern zur Lastverschiebung und -reduktion auf den Steckbriefen in Kapitel 2.2 zu entnehmen sind, die prozentualen Verfügbarkeitszeitreihen der Lastverschiebung und -reduktion.

Die absoluten Verfügbarkeitszeitreihen der Lastmanagementpotenziale ergeben sich anschließend anhand der stündlichen Multiplikation der reskalierten Verfügbarkeitszeitreihen mit dem erschlossenen Lastmanagementpotenzial je Szenario, Kategorie und Stützjahr.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die zeitliche Verfügbarkeit stark von der betrachteten Lastmanagementkategorie und dem zugrundeliegenden Profiltyp der Verfügbarkeitszeitreihe abhängt. Insbesondere im Fall der Zementherstellung sowie der Klimakälte- oder der Raumwärmebereitstellung liegen sowohl starke saisonale als auch tageszeitliche Unterschiede vor. Demzufolge sind die in Kapitel 3.4 erschlossenen Lastmanagementpotenziale grundsätzlich dann verfügbar, wenn die entsprechende Technologie genutzt wird und auf Stundenbasis eine hohe durchschnittliche Auslastung aufweist.

6 Fazit

Im Rahmen des Gutachtens wurden sowohl bestehende als auch mittel- bis langfristige Lastmanagementpotenziale anhand von Kosten- und Technologieparametern kategorisiert und quantifiziert. Diese konnten auszugsweise anhand durchgeführter Branchen- und Experteninterviews komplettiert sowie insbesondere für den kurz- bis mittelfristigen Zeithorizont validiert werden. Der Fokus des Gutachtens lag dabei auf den Verbrauchssektoren Industrie sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD). Sowohl für den Bestand als auch für den Zeithorizont bis 2045 wurde die Höhe der Lastmanagementpotenziale je Kategorie für drei Szenarien ausgewiesen.

Das *Basisszenario B* entspricht in der Charakteristik den Produktionsmengenentwicklungen und der Prognose des industriellen Stromverbrauchs aus der Studie Klimaneutrales Deutschland 2050. Dem *Wasserstoffszenario A* liegt aufgrund der Ausprägung zu einer größeren H₂-Nutzung eine geringere Direktstromnutzung zugrunde. Im Fall des *Elektrifizierungsszenarios C* ist das elektrische Gesamtsystem mit einem höheren Stromverbrauch und einer gesteigerten Erzeugung aus Erneuerbaren Energien größer ausgelegt als in Szenarien A, jedoch bis 2045 auf Augenhöhe mit dem Basisszenario. Zudem erfolgt aufgrund der Annahme ambitionierterer klimapolitischer Zielvorgaben sowie darauf angepasster Regularien in Szenario C eine schnellere Erschließung von Flexibilitäten als in den anderen Szenarien.

Im Basisjahr 2019 liegt für eine Abrufdauer von einer Stunde ein positives Lastmanagementpotenzial von 1,2 GW vor, das nahezu ausschließlich von Industrieprozessen der Branchen Aluminium, Papier und Chemie bereitgestellt wird. Deren Anlagen sind bereits heute im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten präqualifiziert. Dieses Lastmanagementpotenzial steht im Rahmen der Versorgungssicherheit zur Verfügung, aus Marktperspektive jedoch nicht. Bis 2045 findet Szenarien übergreifend ein signifikanter Anstieg der erschlossenen Lastmanagementpotenziale auf 9,6 GW (Szenario A), bis 13,5 GW (Szenario C) statt, die maßgeblich durch eine Lastverschiebung oder -reduktion ohne Produktionsverlust abgerufen werden können. Hierbei gewinnen Lastmanagementpotenziale der industriellen QST sowie GHD, davon insbesondere Wärmepumpen im Zuge der Elektrifizierung der Raumwärmebereitstellung sowie Rechenzentren aufgrund steigender Digitalisierung, zunehmend an Bedeutung, bis diese spätestens ab 2035 gegenüber Lastmanagementpotenzialen industrieller Prozesse dominieren könnten.

Flexibilitätsabrufe werden entsprechend ihrer technischen Umsetzung und Auswirkung auf die Produktion in drei Arten unterteilt, Lastverschiebung, Lastreduktion und Lastabschaltung. Lastverschiebung und -reduktion haben dabei nur begrenzte Auswirkungen auf die Produktion, während die Lastabschaltung mit einem Produktionsstopp einhergeht. Demnach können für alle Industrieprozesse, Querschnittstechnologien und flexible Prozesse im Gewerbe verschiedene Flexibilitätpotenziale zu unterschiedlichen Kosten abgerufen werden – geringere Potenziale zu geringeren Kosten und deutlich höhere Potenziale, wenn ein Produktionsausfall in Kauf genommen wird und die Abrufkosten damit deutlich höher ausfallen. Im Bereich Gewerbe und Querschnittstechnologien bestehen für Lastverschiebung und -reduktion sehr geringe Abrufkosten während für energieintensive Prozesse in der Industrie Abrufkosten im Bereich weniger hundert EUR/MWh anfallen. Wird ein

Produktionsausfall in Kauf genommen erhöhen sich die Kosten drastisch auf den Bereich von 1.000 EUR/MWh und mehr.

Um die räumliche Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale zu ermitteln, wurde anhand geeigneter Kriterien eine Regionalisierung der Lastmanagementpotenziale durchgeführt. Eine Regionalisierung in Bezug auf Rechenzentren erfolgte seitens der Übertragungsnetzbetreiber anhand entsprechender Meldungen. Das verfügbare Potenzial konzentriert sich in Szenario B bis 2025 vor allem auf Hamburg und Nordrhein-Westfalen, da sich dort die Produktionsstandorte von Aluminium mit hohen abschaltbaren Lasten befinden. Ab 2030 zeichnen sich auch in den Lastmanagementgruppen Industrie-QST und GHD zukünftige Hotspots verfügbarer Potenziale mit einer ähnlichen regionalen Verteilung ab. Im Jahr 2038 und 2045 sind Lastmanagementpotenziale voraussichtlich insbesondere in Nordrhein-Westfalen, Hamburg, Niedersachsen, südliches Bayern und Baden-Württemberg verfügbar. Obwohl alle Szenarien bezogen auf die Bundesländer eine ähnliche regionale Verteilung aufweisen, existieren in der Höhe und kategoriellen Zusammensetzung der Lastmanagementpotenziale durchaus regionale Unterschiede. So ist in Szenario C in Regionen mit Produktionsstandorten, bei denen eine zunehmenden Elektrifizierung erfolgt, das Lastmanagementpotenzial industrieller Prozesse deutlich ausgeprägter. Durch die Berücksichtigung von Rechenzentren wird in allen Szenarien bereits im Jahr 2025 ein großes zusätzliches Potenzial für Lastmanagement insbesondere in Hessen, Berlin und Brandenburg verfügbar.

Neben der räumlichen Verfügbarkeit wurde auch die zeitliche Verfügbarkeit der Lastmanagementpotenziale basierend auf charakteristischen Verbrauchsprofilen ermittelt. Das Ergebnis sind Zeitreihen, die für jede Lastmanagementkategorie die stündliche Verfügbarkeit der jeweils reduzier-, verschieb- und abschaltbaren Leistung in Deutschland mit 8.760 Stundenwerten beschreibt.

7 Literatur

- ACER-03 18 European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators (ACER), Cambridge Economic Policy Associates Ltd (CEPA): Study on the Estimation of the Value of Lost Load of Electricity Supply in Europe. Ljubljana: ACER, 2018.
- AGEB-05 21 Anwendungsbilanzen zur Energiebilanz Deutschland - Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Anwendungszwecken. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), 2021.
- AGORA-07 19 Joas, Fabian et al.: Klimaneutrale Industrie - Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Berlin, Wuppertal: Agora Energiewende, 2019.
- AGORA-07 20 Prognos et al.: Klimaneutrales Deutschland - In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65 % im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals. Berlin: Agora Energiewende, 2020.
- AGORA-11 20 Schneider, Clemens et al.: klimaneutrale Industrie - Ausführliche Darstellung der Schlüsseltechnologien für die Branchen Stahl, Chemie und Zement. Berlin: AGORA Energiewende, 2020.
- AIT-01 21 AIT Austrian Institut of Technology GmbH et al.: Flexibilität im Elektrizitätssystem Österreichs - Laufendes Projekt. 2021.
- BIFR-01 21 Hintemann, Ralph: Rechenzentren 2020. Cloud Computing profitiert von der Krise. Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an. Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gemeinnützige GmbH, 2021.
- BKARA-01 17 Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton. Bonn: Bundeskartellamt, 2017.
- BLEC-01 13 Blechschmidt, Jürgen: Taschenbuch der Papiertechnik. München: Carl Hanser Verlag München, 2013
- BLES-01 13 Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- BMBF-01 20 Laufendes Projekt: Kopernikus SynErgie: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - Zweite Förderphase v4.0 (2019 - 2022). München: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2019.
- BMJV-02 21 Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (Verordnung zu abschaltbaren Lasten - AbLaV) . Ausgefertigt am 2016-08-16, Version vom 2021-07-16; Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz, 2021.
- BMU-06 17 Statistik Abwasserentsorgung. In: <https://www.bmu.de/download/statistik-abwasserentsorgung>. (Abruf am 2021-12-06); Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), 2017.
- BMVIT-01 11 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
- BMVIT-01 15 De Bruyn, Kathrin et al.: LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids - Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids. Linz, Graz: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), 2015.
- BMWI-01 19 Laufendes, Projekt: Energiewende in der Industrie: Potenziale, Kosten und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor (2018 - 2021). München: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2019.
- BMWI-27 20 Energieeffizienz in Zahlen - Entwicklungen und Trends in Deutschland 2020. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.
- BR-02 21 Klimaschutzgesetz 2021. In: <https://www.bundesregierung.de/bregde/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>. (Abruf am 2021-08-05); Berlin: Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, 2021.
- BRUNK-01 17 Brunke, Jean-Christian: Energieeinsparpotenziale von energieintensiven Produktionsprozessen in Deutschland - Eine Analyse mit Hilfe von Energieeinsparkostenkurven. Dissertation. Herausgegeben durch die Universität Stuttgart - Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, geprüft von Voß, Alfred und Sauer, Alexander: Stuttgart, 2017.
- CIOT-01 12 Liu, Zhenhua et al.: Renewable and Cooling Aware Workload Management for Sustainable Data Centers. In: ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review Volume 40. Pasadena, Palo Alto: Computing & Mathematical Sciences, California Institute of Technology, Sustainable Ecosystem Research Group, HP Lab, 2012.
- DENA-17 10 Deutsche Energie-Agentur (dena): dena-Netzstudie II - Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin: dena, 2010
- DENA-21 10 dena-Netzstudie II. - Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2010.
- DESTATIS-20 2
1 Öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen und Jahresabwassermenge. In: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/oeffentliche-aba-7k.html>. (Abruf am 2021-12-06); Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2021.
- DLR-06 14 Scholz, Yvonne et al.: 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.
- DLR-01 21 Heitkoetter, Wilko et al.: Assessment of the regionalised demand response potential in Germany using an open source tool and dataset. Oldenburg: German Aerospace Center (DLR), Institute of Networked Energy System, 2021.
- DVGW-02 11 Plath, Michael et al.: DVGW-Information Wasser Nr. 77 zur Energieeffizienz. Hamburg: DVGW-Forschungsstelle TUHH, 2011.
- ECL-02 20 Chlor-alkali industry review 2019-2020. Brüssel: Euro Chlor, 2020.

- ECRA-01 15 Fleiger, Philipp et al.: ECRA Future Grinding Technologies Project – Report about Phase I. Düsseldorf: European Cement Research Academy GmbH (ECRA), 2015.
- ETH-01 07 Klobasa, Marian, Dr.: 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
- FFE-01 16 Samweber, Florian et al.: Teilbericht Maßnahmenklassifizierung - Projekt Merit Order Netz-Ausbau 2030 (MONA 2030). München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2016.
- FFE-01 16 Köppl, Simon; Gallet, Marc; Bärthlein, Eva-Maria; Hartung, Marianne; Serra, Eva Bernal: Techno-ökonomische Bewertung von netzstabilisierenden Maßnahmen mit Hilfe von standardisierten Referenznetzen in: 3.Otti-Konferenz: Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), 2016
- FFE-26 16 Gruber, Anna; Von Roon, Serafin; Fattler, Steffen: Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2016
- FFE-49 16 Gruber, Anna; Biedermann, Franziska: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Teilbericht: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher - Lastflexibilisierung in Industrie und GHD. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2016
- FFE-05 17 Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017
- FFE-12 18 Ausfelder, Florian et al.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie - Methodik | Potenziale | Hemmnisse. München, Frankfurt/Main, Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2018.
- FFE-143 19 Hübner, Tobias et al.: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie. Bericht an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. München, Stuttgart, Berlin: FfE, 2019.
- FFE-119 20 Gotzens, Fabian et al.: DemandRegio – Harmonisierung und Entwicklung von Verfahren zur regionalen und zeitlichen Auflösung von Energienachfragen - Abschlussbericht. Jülich, Berlin, München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V., 2020.
- FFE-39 20 Hübner, Tobias; Serafin von Roon: Modellierung kosteneffizienter Transformationspfade der deutschen Industrie. In: Energieinnovation 2020 - 16. Symposium Energieinnovation 16(20). München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE), 2020.
- FFE-24 21 Guminski, Andrej et al.: eXtremOS Summary Report - Modeling Kit and Scenarios for Pathways Towards a Climate Neutral Europe. Munich: FfE, 2021.

- FFE-76 21 Hauck, Heribert: Interview - Energieflexibilität in der Aluminiumindustrie; Interview, geführt von Veitengruber, Frank; Essen: TRIMET Aluminium SE, 2021
- FFE-77 21 Zacharias, Jan: Interview - Flexibilitäten im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV); Interview, geführt von Veitengruber, Frank; Berlin: Entelios AG, 2021
- GMAO-01 18 MERRA-2 - Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/>; Greenbelt (MD, USA): Global Modeling and Assimilation Office (GMAO), 2018.
- GRUB-01 17 Gruber, Anna-Maria: Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien – Dissertation, eingereicht an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU München, durchgeführt an der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: München, 2017
- HÜB-01 17 Hübner, Tobias: Simulation von Referenzprozessen zur Bestimmung von Flexibilitätspotenzialen und der Auswirkungen von Effizienzmaßnahmen in der Grundstoffindustrie. Masterarbeit. Herausgegeben durch Technische Universität München, betreut durch die Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH: München, 2017.
- IEEE-12 12 Chen, C. et al.: Green-aware workload scheduling in geographically distributed data centers. In: 4th IEEE international conference on cloud computing technology and science proceedings, pp. 82–89; Taipei, Taiwan: IEEE, 2012.
- IER-02 20 Achtelik, Christian et al.: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor - Branchensteckbrief der Grundstoffchemie. Stuttgart, München: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, 2020.
- IGBCE-02 14 Vassiliadis, Michael; Wolf, Iris; Nieber, Tomas: Papiererzeugung in Deutschland - Eine Branchenanalyse. Hannover: Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie, 2014
- IPA-01 19 Sauer, Alexander et al.: Energieflexibilität in der deutschen Industrie - Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt - Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). Stuttgart: Fraunhofer IPA und EEP, 2019. ISBN 978-3-8396-1479-2.
- IWIR-01 19 Schäfer, Michael: Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität durch einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb. In: Wasser Infrastruktur Ressourcen Band 5. Kaiserslautern: Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen, 2019.
- LBNL-01 12 Ghatikar, Girish et al.: Demand Response Opportunities and Enabling Technologies for Data Centers: Findings From Field Studies. Berkeley: Lawrence Berkeley National Lab, 2012.
- LGR-01 15 Langrock, Thomas; Purr, Katja; Baumgart, Bastian; Michels, Armin: Charakteristik, Potenzial und Kosten regelbarer Lasten in der energieintensiven Industrie in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 65. Jg. (2015) Heft 12. Essen: EW Medien und Kongresse GmbH, 2015
- LUN-02 19 Koronen, Carolina et al.: Data centres in future European energy systems—energy efficiency, integration and policy. Lund, Brüssel: Department of Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, 2019.

- NAV-02 19 Gogin, Hélène: Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor - Branchensteckbrief der Papierindustrie. Köln: Navigant Energy Germany GmbH, 2019.
- NAV-05 19 Schlemme, Jannik et al.: Branchensteckbrief der Eisen und Stahlherstellung. Berlin: Navigant Energy Germany GmbH, 2019.
- OSU-01 14 Liu, Z. et al.: Greening geographical load balancing. In: IEEE/ACM Transactions on Networking, 23(2), 657–671; Columbus, USA: The Ohio State University, 2014.
- PROG-01 21 Klimaneutrales Deutschland 2045 - Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Berlin: Prognos AG, 2021.
- ROS-01 98 Rosemann, H.; Ellerbrock, H.-G.: Mahltechnik für die Zementherstellung - Entwicklung, Stand und Ausblick in: ZKG International 51(1998). Wiesbaden: BAUVERLAG GMBH, 1998
- RUTGU-01 14 Goiri, Inigo et al.: Matching Renewable Energy Supply and Demand in Green Datacenters. In: Ad Hoc Networks Volume 25, Part B. USA, Spanien: Department of Computer Science, Rutgers University, Universitat Politecnica de Catalunya and Barcelona Supercomputing Center, 2014.
- RWTH-104 16 Praktiknjo, Aaron: The Value of Lost Load for Sectoral Load Shedding Measures: The German Case with 51 Sectors. Aachen: School of Business and Economics, RWTH Aachen University, 2016.
- STEU-01 17 Steurer, Martin: Analyse von Demand Side Integration im Hinblick auf eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Dissertation. Herausgegeben durch das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart (IER), geprüft von Hufendiek, Kai und Scheffknecht, Günter: Stuttgart, 2017.
- UBA-05 15 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
- UHH-03 17 Döring, Przemko et al.: Holz- und Zellstoffindustrie 2015 - Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. Hamburg: Universität Hamburg, 2017.
- ÜNB-02 21 Liste aller präqualifizierten Anbieter im Rahmen der AbLaV. In: <https://www.regelleistung.net/ext/download/anbieterliste>. (Abruf am 2021-12-07); Berlin, Pulheim, Bayreuth, Stuttgart: 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, 2021.
- UOMEL-01 17 Toosi, Adel et al.: Renewable-aware geographical load balancing of web applications for sustainable data centers. In: Journal of Network and Computer Applications 83/2017. Australia, France: University of Melbourne, Cloud Computing and Distributed Systems Laboratory, 2017.
- VDP-02 15 Geiger, Gregor Andreas; Reinhold, Tanja; Bartsch, Jan: Papier machen. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2015
- VDZ-01 02 Schneider, M.: Zement - Taschenbuch 2002. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2002
- VDZ-01 08 Zement-Taschenbuch 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2008
- VDZ-05 13 Eriksen, Jesper, Havn; Petersen, Luis: in: VDZ Congress 2013. Düsseldorf: Verein deutscher Zementwerke e.V., 2013

VDZ-02 19

Ruppert, Johannes et al.: SynErgie: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - Schlussbericht Teilvorhaben: Lastflexibilisierung in der Zementindustrie. Düsseldorf: VDZ- Verein Deutscher Zementwerke, 2019.

8 Anhang

Fragenkatalog für die Brancheninterviews

Basisinformationen zum Unternehmen und den bisherigen Erfahrungen mit Lastmanagement

1. Wie viele Produktionsstätten hat Ihre Firma in Deutschland?
2. Sind diese unterschiedlich groß?
3. Wie sind die Produktionsstandorte räumlich verteilt?
4. Ist Lastmanagement bereits ein Thema in Ihrem Unternehmen bzw. in Ihrer Branche?
5. Wenden Sie Lastmanagement bereits an, zum Beispiel als Anbieter von abschaltbaren Lasten?



©2020 Guidehouse Inc. All Rights Reserved

2

Lastmanagement – Potenzial

6. Wie sieht das Lastprofil ihrer Produktionsstandorte aus? Wo sehen Sie Anknüpfungspunkte für Lastmanagement?
7. Welches technische Potenzial für Lastmanagement sehen Sie in Ihrem Unternehmen, in Ihrer Branche?
8. Welche Abstufung dieses Potenzials sehen Sie (z.B. leicht erschließbar, schwerer erschließbar, sehr schwer erschließbar)?
9. Welche Produktionsschritte sind besonders relevant?
10. Welches wirtschaftlich abrufbares Potenzial sehen Sie?
11. Welche Faktoren sind ausschlaggebend für den Unterschied zwischen dem technischen und wirtschaftlichen Potenzial?
12. Welche Maßnahmen könnten das wirtschaftliche Potenzial näher an das technische Potenzial heranzuführen? (Ist es maßgeblich eine höhere Vergütung oder gibt es weitere Faktoren, wie z.B. die technische Umsetzung?)



©2020 Guidehouse Inc. All Rights Reserved

3

Lastmanagement – Kosten & Hemmnisse

13. Welche Kosten entstehen für Sie bei Lastverschiebung bzw. -abschaltung? (Abrufkosten, fixe Betriebskosten, usw.)
14. Welche Erschließungskosten für (weiteres) Lastmanagement fallen an?
15. Wie entwickeln sich die Kosten für Lastverschiebung in Abhängigkeit der Größe des Abrufs? Lassen sich unterschiedliche Kostenblöcke ausmachen?
16. Wie schätzen Sie die zeitliche Entwicklung dieser Kosten in den nächsten Jahren ein?
17. Wird es, z.B. durch Digitalisierung, eher zu einem Sinken der Kosten kommen? Oder gehen Sie von steigenden Kosten aus?
18. Welche Hemmnisse (technisch, wirtschaftlich, regulatorisch, usw.) bestehen für eine stärkere Nutzung von Lastmanagement in Ihrem Unternehmen?

Lastmanagement – Ausblick

Vor dem Hintergrund eines stark steigenden Bedarfs an Flexibilität im Energiesystem und gleichzeitiger Elektrifizierung von vielen Prozessen in den nächsten Jahrzehnten:

19. Wie schätzen Sie das künftige Potenzial für Lastmanagement in Ihrem Unternehmen vor dem Hintergrund einer zunehmenden Elektrifizierung und Digitalisierung sowie eines steigenden Flexibilitätsbedarfs ein?
20. Werden Sie künftig (stärker) aktiv werden in dem Bereich?

Szenario B: Lastmanagementpotenzialen bis 2045

Szenario B	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial Industrieprozesse in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Papier	51	63	95	178	214	266	316
Papier-prospektiv	0	3	30	161	281	432	846
Holzstoff	23	41	90	220	276	353	453
Chlor	11	13	18	31	36	45	53
Hohlglas	0	1	1	3	3	4	5
Flachglas	0	0	0	1	1	1	1
Zement	17	30	65	137	164	202	224
Primärstahl	1	1	1	1	1	0	0
Sekundärstahl	2	4	9	21	27	34	47
H ₂ -Stahl	0	0	7	26	40	57	60
Aluminium	1.007	1.008	1.069	1.314	1.376	1.573	1.711
Σ	1.112	1.163	1.385	2.093	2.419	2.967	3.717

Szenario B	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial industrielle QST in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Lüftung	21	37	92	206	265	305	348
Klimakälte	24	43	106	237	305	351	401
Prozesskälte	7	12	29	66	85	98	111
Raumwärme+WW	5	30	146	559	828	1.361	2.614
Beleuchtung	13	23	58	129	167	192	219
Σ	69	146	431	1.197	1.650	2.306	3.693

Szenario B	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial GHD in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Rechenzentren	0	192	542	1.361	1.876	3.100	3.995
Abwasser	0	13	24	41	54	63	82
Wasser	0	75	142	242	317	366	478
PK-Lebensmittel	0	96	182	311	407	470	614
Σ	0	375	891	1.956	2.654	3.998	5.169

Szenario A: Lastmanagementpotenzialen bis 2045

Szenario A	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial Industrieprozesse in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Papier	51	63	95	153	175	193	208
Papier-prospektiv	0	3	26	120	201	274	491
Holzstoff	23	41	90	188	226	256	298
Chlor	11	13	18	27	30	33	35
Hohlglas	0	1	1	2	3	3	3
Flachglas	0	0	0	1	1	1	1
Zement	17	30	65	117	134	147	148
Primärstahl	1	1	1	2	1	1	0
Sekundärstahl	2	3	8	14	17	19	21
H ₂ -Stahl	0	2	9	24	33	40	54
Aluminium	1.007	1.008	1.069	1.123	1.128	1.143	1.128
Σ	1.112	1.164	1.382	1.771	1.949	2.110	2.387

Szenario A	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial industrielle QST in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Lüftung	21	37	92	206	265	305	348
Klimakälte	24	43	106	237	305	351	401
Prozesskälte	7	12	29	66	85	98	111
Raumwärme+WW	5	30	146	559	828	1.361	2.614
Beleuchtung	13	23	58	129	167	192	219
Σ	69	146	431	1.197	1.650	2.306	3.693

Szenario A	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial GHD in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Rechenzentren	0	159	444	1.108	1.876	2.142	2.391
Abwasser	0	13	24	41	54	63	82
Wasser	0	75	142	242	317	366	478
PK-Lebensmittel	0	96	182	311	407	470	614
Σ	0	342	793	1.703	2.654	3.040	3.564

Szenario C: Lastmanagementpotenzialen bis 2045

Szenario C	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial Industrieprozesse in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Papier	51	63	95	217	272	305	316
Papier-prospektiv	0	22	92	406	663	869	1.269
Holzstoff	23	41	90	267	352	405	453
Chlor	11	13	18	38	46	51	53
Hohlglas	0	1	1	3	4	5	5
Flachglas	0	0	0	1	1	1	1
Zement	17	30	65	167	208	232	224
Primärstahl	1	1	1	2	1	0	0
Sekundärstahl	2	4	10	31	42	49	56
H ₂ -Stahl	0	1	6	21	39	53	49
Aluminium	1.007	1.008	1.069	1.596	1.752	1.806	1.711
Σ	1.112	1.183	1.447	2.748	3.381	3.777	4.138

Szenario C	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial industrielle QST in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Lüftung	21	58	149	263	299	324	348
Klimakälte	24	67	171	302	345	373	400
Prozesskälte	7	19	48	84	96	104	111
Raumwärme+WW	5	47	236	713	935	1.445	2.610
Beleuchtung	13	36	93	165	188	204	218
Σ	69	227	697	1.527	1.863	2.450	3.687

Szenario C	Potenzialsumme erschlossenes Lastmanagementpotenzial GHD in MW						
	2019	2025	2030	2035	2038	2040	2045
Rechenzentren	0	218	548	1.736	2.119	3.293	3.988
Abwasser	0	18	39	70	88	100	119
Wasser	0	108	231	410	515	585	696
PK-Lebensmittel	0	139	296	526	661	751	893
Σ	0	483	1.114	2.742	3.384	4.728	5.696

Weitere Unterlagen zu den Regionalisierungsergebnissen

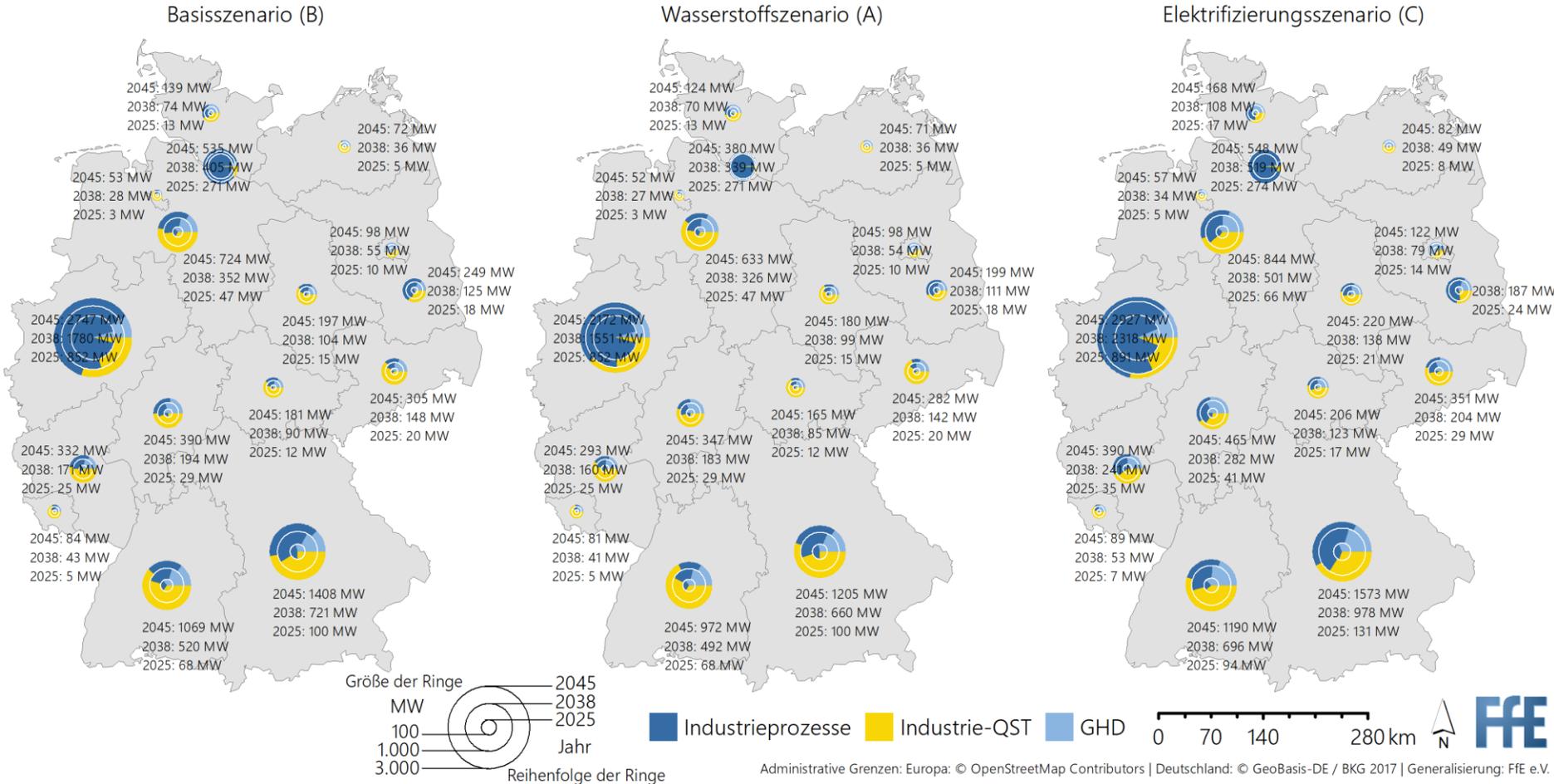


Abbildung 8-1: Lastmanagementpotenzial nach Lastmanagementgruppe und Bundesland (ohne Rechenzentren)

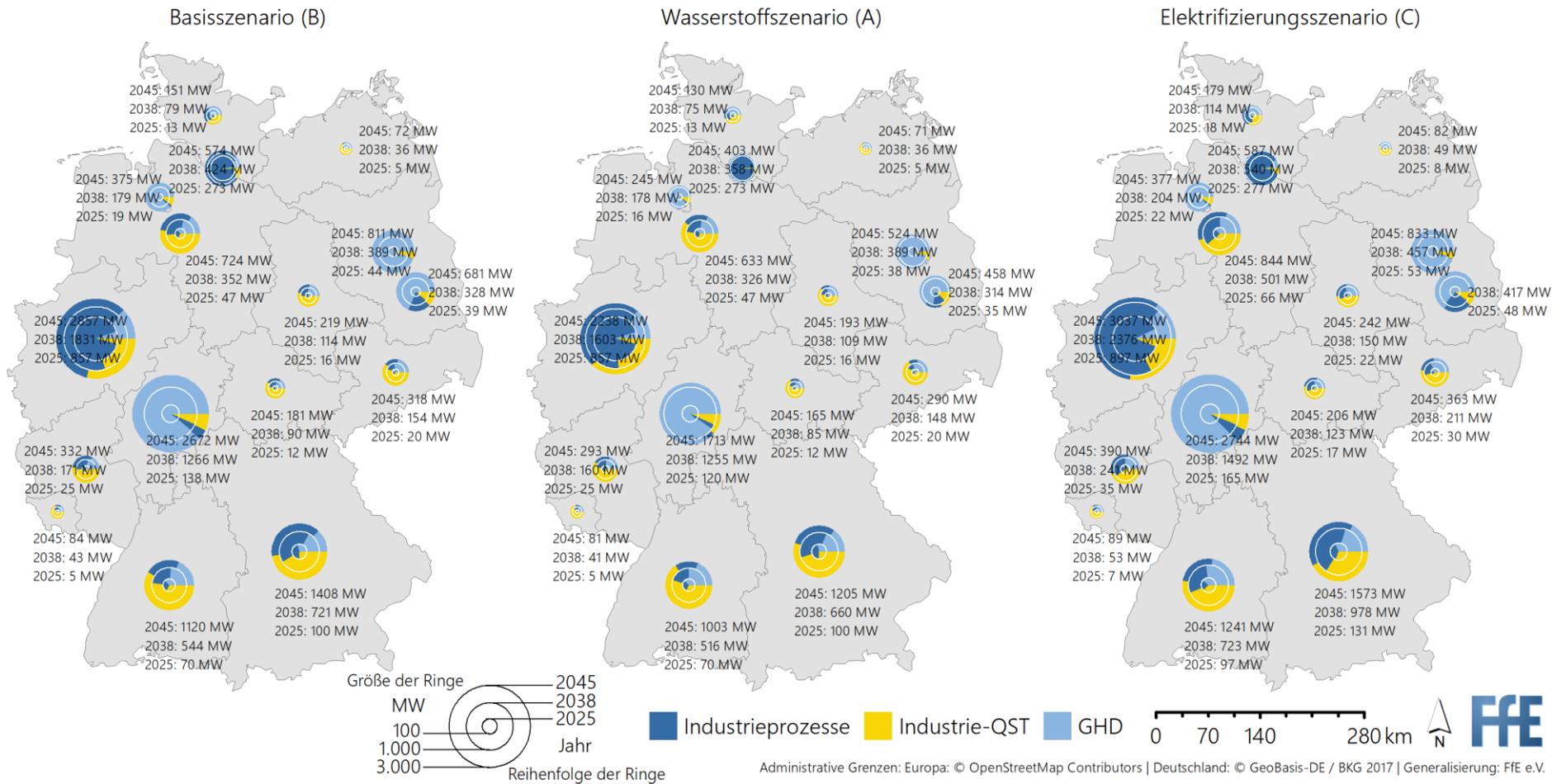


Abbildung 8-2: Lastmanagementpotenzial nach Lastmanagementgruppe und Bundesland (mit Rechenzentren)