

Energie, Klima, Umwelt | Energie

Energieflexibilitätsoptionen in der Industrie – Fokus Bayern

vbw

Studie

Stand: Oktober 2024

Eine vbw Studie, erstellt von der FfE Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH

Die bayerische Wirtschaft



Hinweis

Zitate aus dieser Publikation sind unter Angabe der Quelle zulässig.

Vorwort

Energieflexibilität ist ein wichtiger Faktor für den Erfolg der Energiewende

Die fortschreitende Energiewende stellt die Industrie vor große Herausforderungen, aber auch vor ebenso große Chancen. Energieflexibilität bietet nicht nur die Möglichkeit, Energiekosten zu senken, sondern leistet auch einen wesentlichen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes, das aufgrund des zunehmenden Anteils erneuerbarer Energien immer stärkeren Schwankungen unterliegt.

Energieflexibilitätsoptionen umfassen eine breite Palette von Maßnahmen, die es Industrieunternehmen ermöglichen, ihren Energieverbrauch dynamisch an die aktuellen Marktbedingungen anzupassen. Hierzu zählen Lastmanagement, der Einsatz von Speichern, Anpassungen in der Produktionsplanung sowie die Nutzung digitaler Technologien zur Optimierung des Energieeinsatzes. Auch für das Gesamtsystem ist es von Vorteil, wenn Unternehmen ihre Lasten in Zeiten hoher Erzeugung aus erneuerbaren Quellen erhöhen und in Zeiten niedriger Erzeugung reduzieren können.

Mit der vorliegenden Studie ermitteln wir die Potenziale insbesondere der bayerischen Industrie und erarbeiten Lösungsansätze, um die technischen und organisatorischen Voraussetzungen dafür zu schaffen.

Volkswirtschaftlich sinnvoll sind nur Lösungen, die den Industriestandort stärken und die industrielle Produktion nicht künstlich beschränken. Dementsprechend müssen auch auf gesetzlicher Ebene die Anreize so gesetzt werden, dass sich das systemdienliche Agieren von Unternehmen für diese auch rechnet.

Bertram Brossardt
14. Oktober 2024

Management Summary

Für die Energieversorgung der Zukunft ist Flexibilität ein Schlüsselement zur Integration eines zunehmenden Anteils Erneuerbarer Energien in das Energiesystem. Dabei werden Flexibilitätsoptionen auf der Verbraucherseite eine zentrale Rolle spielen. Auch im Industriegesektor werden durch die Elektrifizierung neue Flexibilitätspotenziale entstehen.

In diesem Zusammenhang untersucht die Studie den zukünftigen Bedarf an elektrischer Flexibilität in Bayern und den möglichen Beitrag, den industrielle Flexibilitäten zur Deckung des Bedarfs leisten könnte.

Der Flexibilitätsbedarf in Bayern wird stark ansteigen.



Im Jahr 2040 werden im betrachteten Szenario 30 GW an elektrischer Flexibilität zum Ausgleich zwischen volatiler Erzeugung durch Erneuerbare Energien und dem Stromverbrauch benötigt. Die Spitzenlast der Endenergiesektoren liegt im Vergleich dazu bei 33 GW in 2040.

Industriebetrieben stehen verschiedene Flexibilitätsmaßnahmen und Vermarktungsmöglichkeiten zur Verfügung.



Je nach Branche kommen verschiedene Anlagen für eine Flexibilisierung in Frage. Außerdem finden sich in jeder Branche Querschnittstechnologien, für die eine Flexibilisierung geprüft werden kann. Werden Flexibilitätspotenziale gehoben, kommt neben einer Optimierung des Eigenverbrauchs auch eine Vermarktung in Betracht.

15 Prozent der deutschen Flexibilitätspotenziale sind in Bayern verortet.



Für Deutschland werden im betrachteten Szenario bis 2045 Potenziale in Höhe von 7,5 GW für eine Lastverschiebung von industriellen Prozessen und Querschnittstechnologien erschlossen. Davon können entfallen 1,1 GW im Jahr 2045 auf Bayern. Industrielle Flexibilität ist jedoch nur eine von vielen möglichen Flexibilitätsoptionen und alleine ist nicht ausreichend, um den Flexibilitätsbedarf im bayerischen Energiesystem zu decken. Zusätzlich werden weitere Flexibilitätsoptionen wie Großbatteriespeicher und bidirektional ladende Elektrofahrzeuge benötigt.

Verschiedene Einflussfaktoren beschränken das heute umsetzbare Flexibilitätspotenzial



Unterschiedliche Einflussfaktoren, die in die Kategorien regulatorisch, technologisch, organisatorisch und sozioökonomisch unterteilt werden können, hemmen aktuell die Bereitstellung von Flexibilität. Um das Potenzial auszuschöpfen, müssen unter anderem Fehlanreize in der Netzentgeltsystematik abgebaut und Zugangsbarrieren abgesenkt werden.

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Flexibilitätsbedarf in Bayern | 2 |
| 2.1 | Energiesystemmodell ISAAr | 2 |
| 2.2 | Flexibilitätsoptionen im Modell | 4 |
| 2.3 | Ergebnisse der Modellierung: Notwendige Flexibilität in Bayern | 5 |
| 2.4 | Rolle der Industrieflexibilität | 7 |
| 3 | Energieflexibilität in der Industrie | 8 |
| 3.1 | Arten von Lastflexibilität, Flexibilitätsmaßnahmen und Eingrenzung des Potenzialbegriffes | 8 |
| 3.2 | Flexibilisierbare Prozesse und Technologien | 10 |
| 3.2.1 | Metall-, Zement- und Glasproduktion | 11 |
| 3.2.2 | Chemie- und Papierindustrie | 13 |
| 3.2.3 | Branchenübergreifende Querschnittstechnologien | 14 |
| 3.2.4 | Industriezweige mit hohem Anteil flexibilisierbarer Querschnittstechnologien im Prozess | 15 |
| 3.3 | Vermarktungsmöglichkeiten | 17 |
| 4 | Flexibilitätspotenziale in Bayern | 23 |
| 4.1 | Bestimmung der deutschen Flexibilitätspotenziale | 23 |
| 4.2 | Regionale Verortung und bayerische Flexibilitätspotenziale | 26 |
| 5 | Rahmenbedingungen der Bereitstellung industrieller Flexibilität | 29 |
| 6 | Handlungsempfehlungen | 31 |
| | Literaturverzeichnis | 38 |
| | Abbildungsverzeichnis | 43 |
| | Tabellenverzeichnis | 44 |
| | Ansprechpartner/Impressum | 45 |

1 Einleitung

Flexibilität als Schlüsselement für die sichere und zuverlässige Energieversorgung der Zukunft

Bis 2030 sollen in Deutschland 65 Prozent der Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 reduziert werden, so das Ziel der Bundesregierung. Um dies zu erreichen, müssen in Deutschland **flächendeckend Erneuerbare Energien (EE) zugebaut** werden. Die wichtigsten erneuerbaren Energiequellen sind Wind und Sonne. Mit dem stetig wachsenden Anteil an EE wird die **Stromerzeugung daher zunehmend dargebotsabhängig**. Für die Gewährleistung einer sicheren Stromversorgung ist es jedoch notwendig, dass Erzeugung und Verbrauch zu jeder Zeit ausgeglichen sind. Durch die fluktuierende Erzeugung **steigt der Bedarf an Flexibilität** im System – also die Fähigkeit des Energiesystems, den Bezug oder die Erzeugung von Energie kurzfristig an sich verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Dieser Bedarf muss künftig von neuen, bisher wenig genutzten Flexibilitätsoptionen gedeckt werden.

Eine besondere Rolle spielen dabei **Flexibilitätsoptionen auf der Verbrauchsseite**. Gerade durch die Elektrifizierung im Rahmen der Energiewende ergeben sich neue Flexibilitätspotenziale in den Verbrauchssektoren. Dazu gehört vor allem der Industriesektor. Im Jahr 2023 hat der Stromverbrauch der Industrie 41 Prozent¹ des gesamten deutschen Stromverbrauchs ausgemacht. Mit einer Flexibilisierung des Verbrauchs kann die Industrie einen **wichtigen Beitrag zur Stabilisierung des Stromsystems** und der **Integration höherer Anteile an EE** leisten. Obwohl Industrieflexibilität heute aufgrund diverser Hemmnisse für die meisten Unternehmen noch kein Geschäftsmodell darstellt, könnten sich in Zukunft aus Industrieperspektive Vorteile durch die Flexibilisierung des Verbrauchs ergeben. Dazu gehören eine **Senkung der Energiekosten** durch die Optimierung des eigenen Energieverbrauchs und **zusätzliche Erlöse** durch die externe Vermarktung der Flexibilität. Diese Vorteile spielen nicht nur für energieintensive Industrien eine Rolle, sondern auch für kleinere Unternehmen – insbesondere vor dem Hintergrund einer zunehmenden Elektrifizierung zur Senkung der CO₂-Emissionen.

Im Rahmen der Studie wird industrielle Flexibilität aus **System- und Akteursperspektive** betrachtet. Untersucht wird, welche **Flexibilitätsbedarfe in Bayern** bis 2040 entstehen und wie hoch der **Beitrag der Industrie** zur Flexibilisierung des Stromsystems sein könnte. Zudem wird aus betrieblicher Sicht erläutert, welche **Flexibilitätsmaßnahmen in der Industrie** durchgeführt werden können, welche Prozesse und Querschnittstechnologien flexibilisiert werden können und welche **Vermarktungsmöglichkeiten** existieren. Die Studie beschäftigt sich außerdem mit den **Herausforderungen und Hemmnissen**, der derzeit einer Erschließung der industriellen Flexibilität noch im Wege stehen und diskutiert **Handlungsempfehlungen**.

¹ AGEB Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023.

2 Flexibilitätsbedarf in Bayern

Der Flexibilitätsbedarf im klimaneutralen Bayern 2040 liegt um den Faktor 10 über dem heutigen Niveau

Bevor mögliche Flexibilitätspotenziale in der Industrie untersucht werden, wird betrachtet, wie groß der **Bedarf an elektrischer Flexibilität im bayerischen Energiesystem insgesamt** ist und wie dieser grundsätzlich gedeckt werden kann. Dafür wird auf das Elektrifizierungsszenario „E.plan“ der Energiesystemanalyse „Bayernplan 2040“ zurückgegriffen². In dieser Studie wurde Bayern als eigenes Marktgebiet betrachtet, in dem die in Bayern angestrebte Klimaneutralität bis 2040 erreicht wird. Im Folgenden werden die verschiedenen Flexibilitätsoptionen, welche in dem der Studie zugrundeliegenden Energiesystemmodell verfügbar sind, vorgestellt und deren Zubau und Einsatz für das ausgewählte Szenario beleuchtet. Die Summe aller Flexibilitätsoptionen stellt den gesamten Flexibilitätsbedarf dar.

2.1 Energiesystemmodell ISAaR

Das Szenario „E.plan“ wurde mit dem Energiesystemmodell ISAaR („Integriertes Simulationsmodell zur Anlageneinsatz- und Ausbauplanung mit Regionalisierung“) berechnet. Der Aufbau des Modells ist in Abbildung 1 visualisiert.

ISAaR ist ein lineares **Optimierungsmodell** mit perfekter Voraussicht, welches die **volkswirtschaftlichen Systemgesamtkosten** des Bereitstellungssektors in stündlicher Auflösung minimiert. Es bildet die Energieträger Strom, Wasserstoff, Fernwärme, Gas, Biomasse und flüssige Kohlenwasserstoffe sowie deren Wechselwirkung miteinander ab (siehe horizontale Linien in Abbildung 1). Das Modell wurde in verschiedenen Projekten zur Beantwortung von Forschungsfragen eingesetzt und weiterentwickelt^{3,4}.

Das Modell führt für die **Jahre 2025 bis 2040** in Fünf-Jahres-Schritten europäische Markt-berechnungen durch. Dabei betrachtet es die 27 europäischen Länder, Großbritannien, Norwegen und Schweiz sowie Bayern als Marktgebiete. Zwischen diesen Gebieten ist der Transport von Strom und Wasserstoff möglich, wobei der stündliche Stromaustausch über mittlere Handelskapazitäten nach dem Ten Year Net Development Plan (TYNDP) 2022⁵, dem Zehnjahresplan zur Netzentwicklung des Verbands Europäischer Übertragungsnetzbetreiber (ENTSO-E), begrenzt ist (sog. Net Transfer Capacity Ansatz).

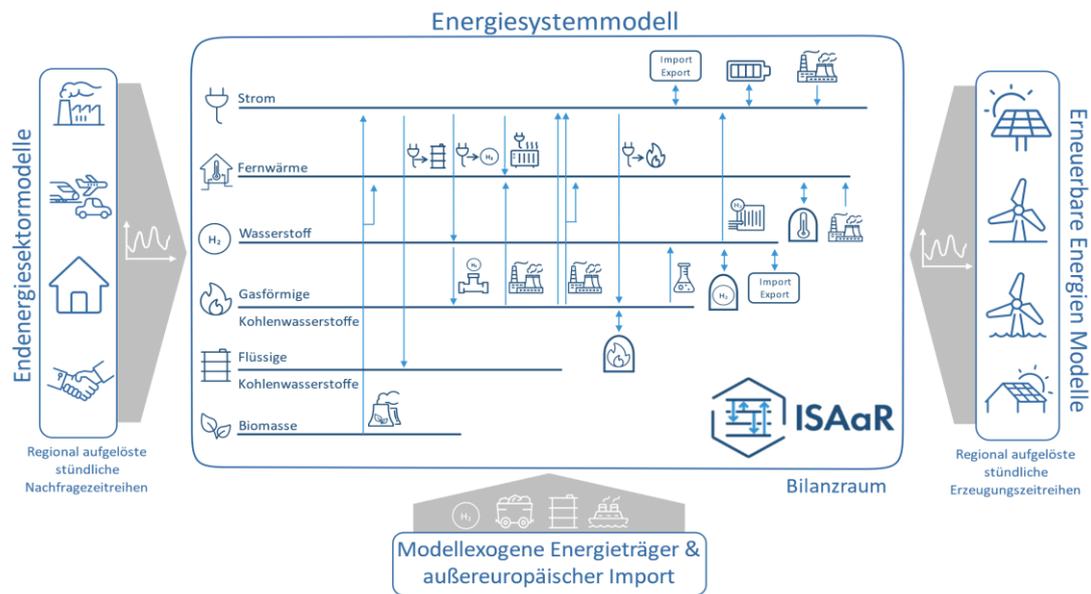
² Kigle, S. / Guminski, A. et al. (2023): Bayernplan Energie 2040 – Wege zur Treibhausgasneutralität – Abschlussbericht im Auftrag der: VBEW Dienstleistungsgesellschaft mbH. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft(2023).

³ Guminski, A./ Fiedler, C. / Kigle, S. et al: eXtremOS Summary Report - Modeling Kit and Scenarios for Pathways Towards a Climate Neutral Europe. Munich: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (2021).

⁴ Kigle, S. / Ebner, M. / Guminski, A.: Greenhouse Gas Abatement in EUROPE—A Scenario-Based, Bottom-Up Analysis Showing the Effect of Deep Emission Mitigation on the European Energy System. In: Energies 15, 1334. Basel: MDPI (2022).

⁵ ENTSG und ENTSO-E: Ten Year Network Development Plan (TYNDP) 2022 Scenario Report (2022).

Abbildung 1
Übersicht über den Bilanzraum des Energiesystemmodells ISAaR



Quelle: Eigene Darstellung (FFE).

Für den Stromhandel zwischen Bayern und Deutschland ohne Bayern werden die Handelskapazitäten basierend auf dem heutigen Übertragungsnetz sowie geplanten Ausbauprojekten des Netzentwicklungsplans 2035⁶ berücksichtigt. Auf diese Weise kann überschüssige Stromerzeugung in andere Regionen exportiert werden, wobei sich die Preise für Wasserstoff und Strom durch die Kopplung über die Handelskapazitäten angleichen. Die relativ hohen Übertragungskapazitäten sorgen dafür, dass die Märkte in Bayern und Deutschland ohne Bayern stark gekoppelt sind. Für die restlichen Energieträger ist kein innereuropäischer Handel möglich. Stattdessen können diese aus dem außereuropäischen Ausland importiert werden.

Für Bayern sind aufgrund der zentralen Lage innerhalb der EU neben den bayerischen und den deutschen Emissionszielen auch die europäischen Ziele von Bedeutung. Während Bayern Klimaneutralität bis 2040 anstrebt, ist das Zieljahr für Klimaneutralität in Deutschland fünf Jahre später und für Europa zehn Jahre später angesetzt.

Die politischen Vorgaben der Emissionsreduktionsziele gehen einher mit ambitionierten Ausbauzielen für EE. Hier werden für Deutschland die gesetzlich festgelegten Ziele des „Gesetzes für den Ausbau Erneuerbarer Energien“ (EEG) sowie das „Windenergie-auf-See-Gesetz“ (WindSeeG) berücksichtigt. Hier werden die vorgegebenen Zielzahlen anhand einer Regionalisierung auf Bayern und Deutschland ohne Bayern aufgeteilt. Für Europa

⁶ Netzentwicklungsplan 2035, Version 2021: Bestätigung des NEP 2035. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2022).

basiert der EE-Zubau auf den Szenarien „National Trends“ (für 2025) und „Distributed Energy“ (ab 2030) des TYNDP 2022. Da der kurzfristige Zubau durch die Ziele bereits relativ hoch ist, wird bis 2030 kein EE-Zubau im System über diese Ziele hinaus zugelassen. Ab 2035 dienen die Ausbauziele als Untergrenze und modellendogener Zubau darüber hinaus ist zugelassen.

2.2 Flexibilitätsoptionen im Modell

Sowohl die Stromerzeugung aus EE als auch die Stromnachfrage aus den Endenergiesektoren weisen starke zeitliche Schwankungen auf. Während zu manchen Stunden die Stromerzeugung durch EE-Anlagen deutlich höher als die Nachfrage ist, liefern diese zu anderen Stunden, gerade in den Wintermonaten oder nachts, nicht ausreichend Strom, um die erhöhte Nachfrage zu decken. Hier können elektrische Flexibilitätsoptionen beim Ausgleichen helfen. Sie erlauben es, Strom in Stunden mit hoher Erzeugung zu speichern, die Last zu erhöhen oder Erzeugung anzupassen und in Stunden mit geringer Erzeugung zu verschieben. Dabei gibt es verschiedene Flexibilitätsoptionen, die das System zum Ausgleich der Stromerzeugung und -nachfrage nutzen kann.

Elektrische Stromspeicheroptionen bezeichnet hier Technologien, welche nur mit der Energieträgerschiene Strom verknüpft sind und somit eine rein elektrische Lastverschiebung bewirken können. Hier stehen dem System **Großbatteriespeicher**, intelligent gesteuerte **bidirektionale Elektrofahrzeuge**, **Pumpspeicher** und **industrielle Flexibilität** zur Verfügung:

- Für **Großbatteriespeicher** wird ein minimaler Bestand nach dem Netzentwicklungsplan⁷ exogen vorgegeben. Für Deutschland ist hier eine installierte Leistung von 5 GW für das Jahr 2030 hinterlegt.
- **Elektrofahrzeuge** können vom Modell gegen Mehrkosten zu uni- oder bidirektional intelligent ladenden Fahrzeugen aufgerüstet werden. Da unidirektional ladende Fahrzeuge keine Rückspeisung ins System erlauben, werden im Folgenden nur bidirektionale Fahrzeuge betrachtet. Die insgesamt installierte Leistung an bidirektionalen Elektrofahrzeugen ergibt sich durch die angenommene (Ent-)Ladeleistung und die Anzahl der aufgerüsteten Fahrzeuge. Diese Leistung wird allerdings durch weitere Parameter wie die hinterlegten Fahrprofile und die Ansteckwahrscheinlichkeit reduziert, so dass das effektive Potenzial deutlich geringer ausfällt.
- Die installierte Leistung von **Pumpspeichern** wird exogen vorgegeben. Dabei sind anstehende bayerische Projekte, wie das Pumpspeicherwerk Riedl, berücksichtigt.

Für **industrielle Flexibilität** orientiert sich die Leistung an den im Netzentwicklungsplan ausgewiesenen Potenzialen. Im Modell kann industrielle Flexibilität dazu genutzt werden, die Stromlast in einigen Stunden zu erhöhen und in anderen Stunden zu reduzieren. Dabei muss die reduzierte Energiemenge vollständig nachgeholt werden, da Produktionsausfälle ausgeschlossen werden. Da eine mögliche Erhöhung oder Reduktion der Last in der

⁷ Netzentwicklungsplan: Genehmigung des Szenariorahmens 2023 – 2037/ Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (2022).

Industrie stark von der jeweiligen Auslastung der Prozesse abhängig ist, ist diese Flexibilität zudem an die stündlichen Stromlasten der Industrie gekoppelt.

Weiterhin gibt es **Power-to-X-Technologien**, welche Strom verbrauchen, um einen anderen Energieträger zu produzieren. Dazu zählen **Elektrolyseure** und **Power-to-Heat-Anlagen** (Großwärmepumpen und Heizstäbe), wobei Haushaltswärmepumpen in der Modellierung nicht berücksichtigt werden. Elektrolyseure sind dabei mit der Energieträgerschiene Wasserstoff verknüpft, deren Wasserstoffnachfrage zu jeder Stunde im Jahr erfüllt werden muss. Gleiches gilt für Power-to-Heat und die Energieträgerschiene Fernwärme. Durch eine Erhöhung oder Reduktion der Stromnachfrage kann gerade in Kombination mit Wasserstoff- oder Fernwärmespeicher Flexibilität bereitgestellt werden.

Als letzte und größte Flexibilität dienen **Stromimporte und -exporte** mit den angrenzenden Marktgebieten. Für Bayern ist hier ein Handel mit Österreich, Tschechien und den restlichen Bundesländern Deutschlands möglich. Hier kann zu jeder Stunde Strom ausgetauscht werden, wobei der stündliche Austausch durch mittlere Übertragungskapazitäten begrenzt ist.

2.3 Ergebnisse der Modellierung: Notwendige Flexibilität in Bayern

Abbildung 2 zeigt die **bayerische Strombilanz** für 2019 als Basisjahr und die modellierten Stützjahre bis 2040. Während die Stromerzeugung aus EE durch den ambitionierten Zubau stark zunimmt, kann Bayern dennoch nicht die gesamte Stromnachfrage damit decken. Vor allem bis 2030 werden weiterhin thermische Kraftwerke zur Stromerzeugung eingesetzt. Zusätzlich ist Bayern in allen Jahren Netto-Importeur von Strom. Weitere Ergebnisse können der Studie Bayernplan Energie 2040 entnommen werden. Analog zum EE-Anstieg steigt auch der Bedarf an elektrischen Speicheroptionen und flexiblen Verbrauchern. Der Einsatz von Großbatteriespeichern, bidirektional ladenden Elektrofahrzeugen, Pumpspeichern und industrieller Flexibilität ist in Abbildung 2 unter „**Elektrische Speicher**“ zusammengefasst. Diese **flexibilisieren im Jahr 2040 insgesamt 10-mal so viel** an Strom wie im Jahr 2025.

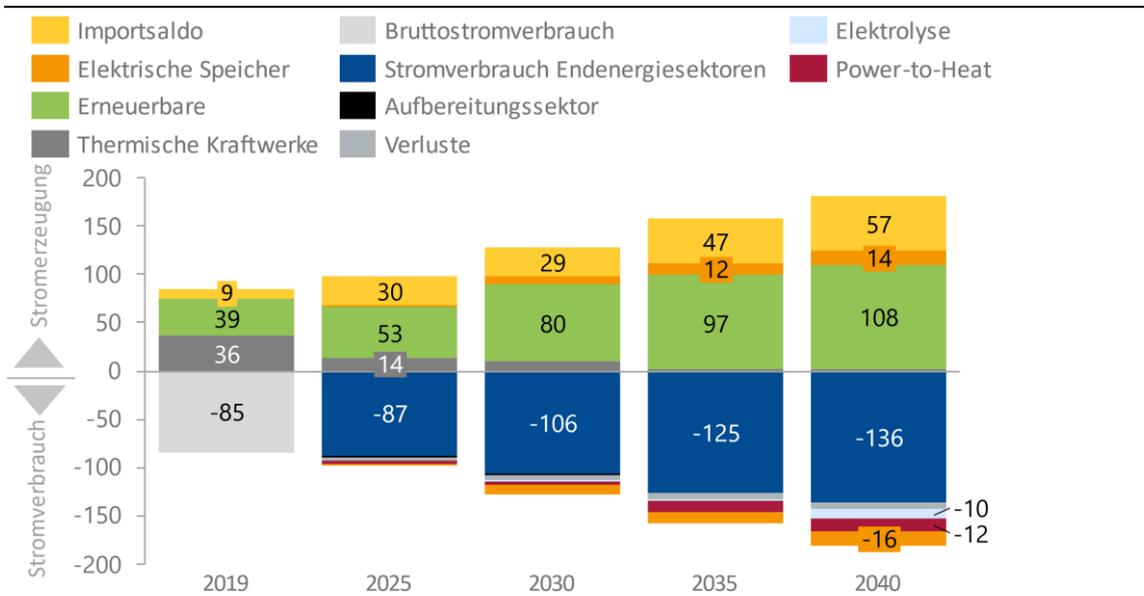
Im Jahr 2040 verbrauchen Elektrolyseure 10 TWh Strom, um damit insgesamt 7,1 TWh an Wasserstoff erzeugen. Power-to-Heat-Anlagen verwenden in 2040 etwa 12 TWh Strom benötigen, um 21,7 TWh Fernwärme zu erzeugen. Durch die Kopplung der flexiblen Verbraucher an die Energieträgerschienen Wasserstoff und Fernwärme kann hier in Kombination mit Wasserstoff- und Fernwärmespeichern sowie wasserstofffähigen Gaskraftwerken - die Wasserstoff zurück in Strom umwandeln - Flexibilität zu diesen Energieträgerschienen verlagert werden.

Abbildung 3 stellt die **installierte Leistung elektrischer Speicheroptionen und Power-to-X-Verbraucher** dar. Die gesamte Leistung elektrischer Flexibilität steigt dabei über die Jahre hinweg kontinuierlich an. Während im Jahr 2025 lediglich 2,5 GW an Flexibilitätsoptionen im System sind, steigt die installierte Leistung **bis 2040** auf 30,2 GW an und hat sich damit mehr als **verzehnfacht**.

Flexibilitätsbedarf in Bayern

Abbildung 2

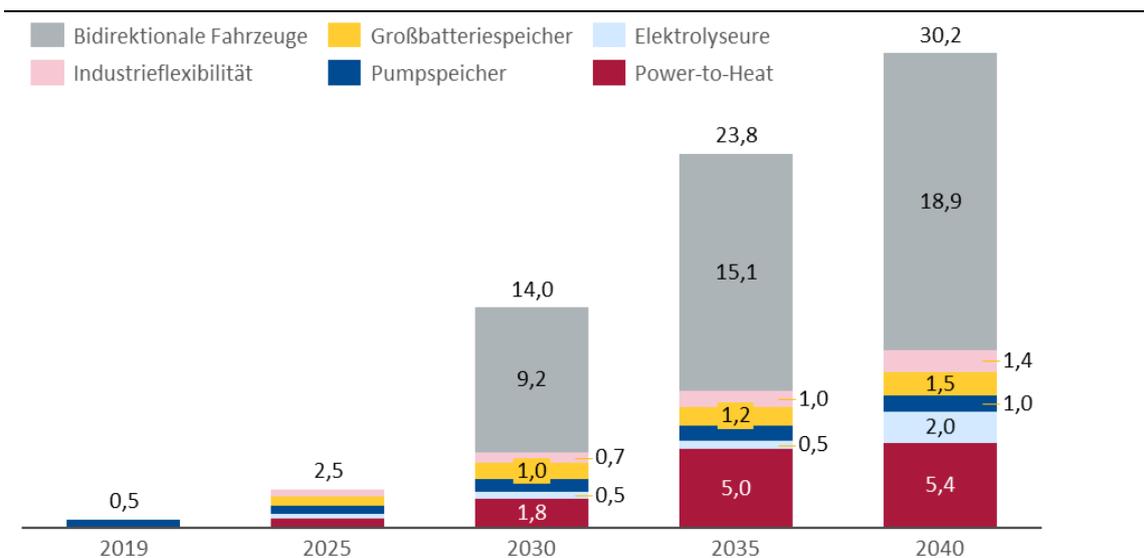
Strombilanz (in TWh) für Bayern im Szenario „E.plan“ aus dem Bayernplan Energie 2040 für das Basisjahr 2019 und die modellierten Jahre bis 2040



Quelle: Eigene Darstellung (FfE) basierend auf dem Bayernplan Energie 2040.

Abbildung 3

Installierte Leistung an elektrischen Flexibilitäten im bayerischen Energiesystem in GW bis zum Jahr 2040



Quelle: Eigene Darstellung (FfE) basierend auf dem Bayernplan Energie 2040.

Den größten Teil der installierten Leistung machen bidirektional ladende Elektrofahrzeuge aus. Abbildung 3 zeigt die insgesamt installierte Leistung basierend auf der Anzahl der Fahrzeuge, die für diese Ladestrategie zur Verfügung stehen. Unter Berücksichtigung der Standzeiten und Fahrprofile der Fahrzeuge sowie der Wahrscheinlichkeit, dass diese bei einem Aufenthalt an der Ladesäule an diese angesteckt sind, ergibt sich eine deutlich reduzierte Leistung, die dem System wirklich zur Bereitstellung von Flexibilität zur Verfügung steht. Hinzu kommen in 2040 Großbatteriespeicher mit einer installierten Leistung von 1,5 GW sowie 1 GW Pumpspeicher. Für **industrielle Flexibilität** ist in Abbildung 3 das Potenzial zur Lastreduktion dargestellt. In **2025 stehen 0,5 GW** zur Reduktion der Stromlast zur Verfügung. Dieser Wert **verdreifacht sich bis zum Jahr 2040** ungefähr auf 1,4 GW. Das Potenzial zur Lasterhöhung fällt durch die Berücksichtigung des Lastprofils der Industrie in allen Jahren niedriger als das Potenzial zur Lasterhöhung aus.

Um den steigenden Bedarf an Wasserstoff und Wärme über Power-to-X zu decken, steigen auch die installierten Leistungen der dafür notwendigen Technologien. Während Elektrolyseure und Power-to-Heat-Anlagen in 2025 erst 0,8 GW an Leistung aufweisen, steigt dieser Wert bis 2040 auf eine Leistung von 6,4 GW an.

2.4 Rolle der Industrieflexibilität

In Abschnitt 2.3 wurde zunächst der allgemeinen Flexibilitätsbedarf in Bayern aufgezeigt. Es zeigt sich, dass mit dem Hochlauf der EE auch der Gesamtbedarf an elektrischer Flexibilität im System steigt. Dieser wird im System von verschiedenen Technologien bereitgestellt. Dabei ist es aus Systemperspektive weniger entscheidend, aus welchen Technologien sich diese Flexibilität zusammensetzt. Relevant ist, dass insgesamt ein gewisses Potenzial an Flexibilität verfügbar ist.

Viele Flexibilitätsoptionen sind in ihrem Hochlauf auch mit großen Unsicherheiten behaftet. Ein Beispiel sind bidirektional ladende Elektrofahrzeuge. Aufgrund der geringen Kosten für das benötigte Fahrzeugupgrade stellen sie die vom Modell bevorzugte Flexibilitätsoption dar. Sie machen daher einen Großteil der installierten Leistung an Flexibilität aus. Verzögert sich dieser Hochlauf, können bzw. müssen andere Technologien die Bedarfslücke füllen. Hier kommen vor allem Großbatteriespeicher oder Industrieflexibilität in Betracht.

Fällt die Verfügbarkeit elektrischer Speicher allgemein geringer aus, so erfordert das aus Systemsicht einen vermehrten Zubau von flexiblen Verbrauchern und wasserstofffähigen Gaskraftwerken. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass elektrische Flexibilität dabei helfen kann, den benötigten Zubau von neuen Kraftwerken in Bayern zu reduzieren.

Die Flexibilisierung industrieller Prozesse stellt also eine aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive effiziente Flexibilitätsoption dar, durch die der Investitionsbedarf im Bereitstellungssektor gesenkt werden kann. Gleichzeitig können auch Industrieunternehmen von dieser Flexibilisierung finanziell profitieren (siehe Abschnitt 3.3).

3 Energieflexibilität in der Industrie

Industriebetrieben stehen verschiedene Flexibilitätsmaßnahmen und Vermarktungsmöglichkeiten zur Verfügung

Durch die Erläuterung möglicher Flexibilitätsmaßnahmen, die Beschreibung der flexibilisierbaren Prozesse und Technologien in der Industrie und einer Darstellung der Vermarktungsmöglichkeiten soll ein besseres Hintergrundverständnis für die abgeleiteten Flexibilitätspotenziale für Bayern geschaffen werden, die dann in Kapitel 4 dargestellt werden.

3.1 Arten von Lastflexibilität, Flexibilitätsmaßnahmen und Eingrenzung des Potenzialbegriffes

Zunächst ist eine klare Begriffsabgrenzung der genutzten Bezeichnungen notwendig. Daher soll im Folgenden auf die Begriffe **Lastflexibilität**, **Flexibilitätsmaßnahmen** und **Flexibilitätspotenzial** genauer eingegangen werden.

Welche Möglichkeiten der Lastflexibilität gibt es?

- Bei der **Lastreduktion** wird die bezogene Leistung im Vergleich zum Referenzbetrieb reduziert. Aus Energiesystem- bzw. Netzsicht muss die nicht abgerufene Leistung somit nicht mehr bereitgestellt werden. Folglich geht Lastreduktion mit einem Produktionsverlust einher. Die Lastreduktion wird als positives Leistungspotenzial bezeichnet.
- Bei der **Lasterhöhung** wird die bezogene Leistung erhöht und sogenanntes negatives Leistungspotenzial bereitgestellt. Sie ist nur möglich, wenn die maximale Produktionskapazität der Anlage zuvor noch nicht erreicht ist. Außerdem müssen mögliche Folgeprozesse für die erhöhte Produktion auch sinnvoll weiterverarbeiten können.
- Die **Lastverschiebung** besteht sowohl aus Lasterhöhung als auch -reduktion. Diese werden hintereinander ausgeführt, so dass sich die Effekte beider Teilmaßnahmen in Summe kompensieren. Ausgefallene Produktion wird damit innerhalb kurzer Zeit nachgeholt bzw. vorgezogen, so dass in Summe kein Produktionsausfall entsteht.

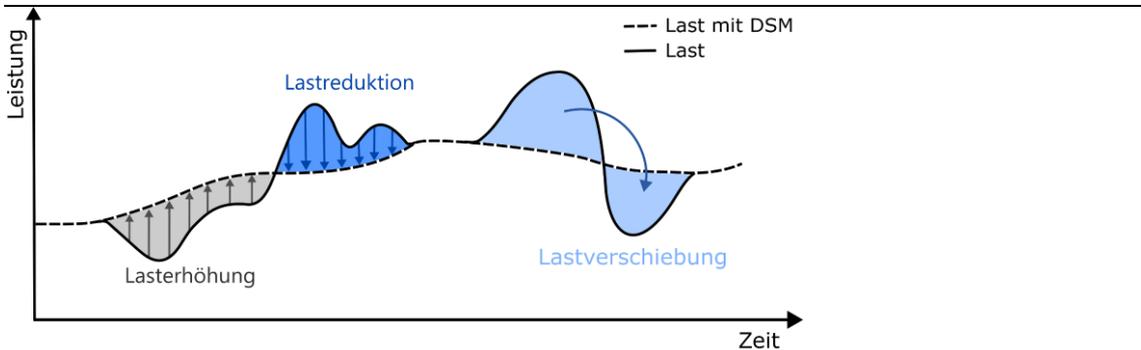
Was sind typische Flexibilitätsmaßnahmen?

Die Flexibilitäten können durch verschiedene Maßnahmen gehoben werden. Beispiele für diese **Flexibilitätsmaßnahmen** sind unter anderem:

- Wechsel der Energiequelle
- Prozessunterbrechungen
- Ändern der Produktionsplanung
- Anpassung der Maschinenbelegung
- Verschieben der Auftragsart
- Energiespeicherung
- Anpassung von Prozessparametern
- Anpassung der Schichtzeiten
- Verschieben von Pausenzeiten

Abbildung 4

Begrifflichkeiten der verschiedenen Arten von Flexibilität



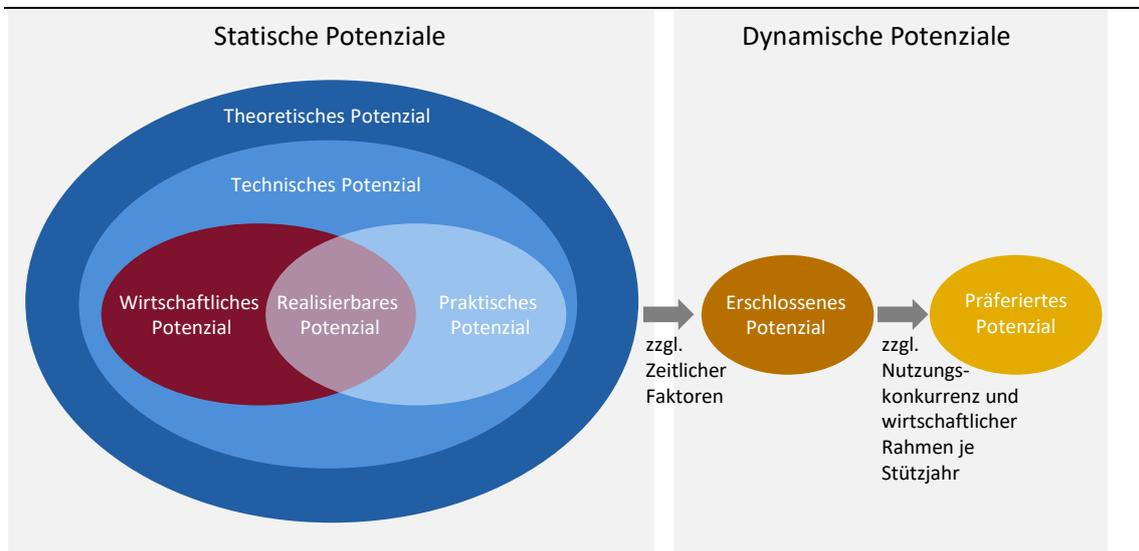
Quelle: Eigene Darstellung (FfE).

Ein **Wechsel der Energiequelle** ist beispielsweise durch hybride Wärmebereitstellung möglich. Durch die Möglichkeit, sowohl Strom als auch (Erd-)Gas als Energieträger einzusetzen, kann Flexibilität erschlossen werden. Zusätzlich kann durch **Energiespeicherung** in Batterie-, Wärme- oder Kältespeichern die Erzeugung vom Verbrauch entkoppelt werden, um einen flexibleren Produktionsprozess zu ermöglichen. Dies kann auch durch die (Zwischen-)Speicherung von Rohstoffen bzw. (Zwischen-)Produkten erfolgen, ohne dass Lieferverpflichtungen eingeschränkt werden müssen. **Prozessunterbrechungen**, also das Abschalten ganzer Anlagen(-teile), ist in der Regel mit einer Lastnachholung verbunden, um keine Produktionsausfälle in Kauf zu nehmen. Ein weniger drastischer Eingriff ist die **Anpassung von Prozessparametern ohne Qualitätseinbußen am Produkt**, wie beispielsweise das Auf-/Abregeln einzelner Anlagen(-teile), um die Produktionsgeschwindigkeit anzupassen oder die Variation von Temperaturen in Kühlungs- oder Trocknungsprozessen. Häufig kann auch die **Änderung der Produktionsplanung** in Abhängigkeit der Energieintensitäten verschiedener Produkte angepasst werden. Der gleiche Gedanke steht hinter der **Anpassung der Maschinenbelegung** in einer Produktionslinie. Ebenso können auch **Schichtzeiten angepasst** werden, um Prozesse zu flexibilisieren. Ähnlich wirkt auch die **Verschiebung von Pausenzeiten**. Unter **Verschieben der Auftragsart** werden Maßnahmen zusammengefasst, die beispielsweise statt eines fixen Liefertermins variable Liefertermine zulassen.

Wie unterscheiden sich die verschiedenen Potenzialbegriffe?

Der Begriff des **Flexibilitätpotenzials** lässt sich stufenweise eingrenzen. Zu Beginn steht das **theoretische Potenzial**, als rein rechnerische Ausgangsgröße. Dieses verringert sich unter Berücksichtigung von sicherheits- und anlagenrelevanten Restriktionen auf das **technische Potenzial**, welches die aus technischer Sicht verschiebbare Last abbildet. Innerhalb des technischen Potenzials gibt es zum einen das aus Unternehmenssicht **wirtschaftliche Potenzial**, sowie das beispielsweise durch unternehmensinterne, regulatorische oder administrative Hemmnisse begrenzte **praktische Potenzial**. Nur die sowohl wirtschaftlich als auch praktisch umsetzbaren Maßnahmen bilden schließlich die Menge des **realisierbaren Potenzials**. Berücksichtigt man zeitliche Faktoren, erhält man das tatsächlich **erschlossene** und dem Markt zur Verfügung stehende Energieflexibilitätpotenzial.

Abbildung 5
Eingrenzung des Flexibilitätspotenzial-Begriffes



Quelle: Eigene Darstellung (FFE).

3.2 Flexibilisierbare Prozesse und Technologien

Allgemein sind für die Betrachtung der flexibilisierbaren Prozesse und Technologien in Industrieunternehmen zwei Kategorien zu unterscheiden:

- **Branchenspezifische Industrieprozesse** sind flexibilisierbare Anlagen und Einzelprozesse. Insbesondere in den energieintensiven Branchen liegt hier ein hohes Potenzial zur Flexibilisierung vor.
- **Querschnittstechnologien (QST)** bezeichnen Technologien, deren Anwendung nicht auf einen bestimmten Wirtschaftszweig oder Produktionsschritt beschränkt ist, sondern branchen- bzw. werksübergreifend Anwendung finden. Diese bieten vor allem kleinen und mittelständischen Unternehmen relevante Flexibilitätspotenziale. Die Bedeutung einzelner QST kann sich dabei je nach Branche unterscheiden.

Die im folgenden betrachteten flexibilisierbaren Prozesse und Querschnittstechnologien basieren auf bestehenden Arbeiten^{8,9} und den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Interviews.

⁸ Gruber, A.: 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).

⁹ Jetter, F. / Veitengruber, F. / Schmid, T. et al.: Regionale Lastmanagementpotenziale - Quantifizierung bestehender und zukünftiger Lastmanagementpotenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft und Guidehouse Germany (2021).

Branchenspezifische Industrieprozesse

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die flexibilisierbaren Prozesse in bestimmten Branchen.

Die Flexibilisierungsmöglichkeiten der einzelnen Prozesse bzw. Anlagen werden im Folgenden genauer beschrieben. Neben den im Text angegebenen Quellen stützt sich die Beschreibung auf die im Rahmen der Studie durchgeführten Interviews mit bayerischen Industriebetrieben.

Tabelle 1

Flexibilisierbare Anlagen bei den branchenspezifischen Industrieprozessen

| Branche | Flexibilisierbare Anlagen |
|--|---|
| Primär- & Sekundärstahl | <ul style="list-style-type: none"> – Lichtbogenofen (Electric Arc Furnace, EAF) – Walzanlagen – Induktionstiegelofen/Bivalenter Tiegelofen |
| Nicht-Eisen Metalle (Primär- & Sekundäraluminium) | <ul style="list-style-type: none"> – Elektrolyse (elektrolytische Veredelung) – Aluminiumelektrolysezellen – (Bivalenter) Tiegelofen |
| Zement | <ul style="list-style-type: none"> – Roh- & Zementmühlen |
| Glas (Hohl- & Flachglas) | <ul style="list-style-type: none"> – Elektrische Zusatzbeheizung des Wannens (bzw. hybride Schmelzwannen) |
| Grundstoffchemie | <ul style="list-style-type: none"> – Chlorelektrolysezellen |
| Gummi- und Kunststoffwaren | <ul style="list-style-type: none"> – Spritzgussmaschine |
| Papier | <ul style="list-style-type: none"> – Holzschleifer – Papiermaschine |

3.2.1 Metall-, Zement- und Glasproduktion

In der Eisen- und Stahlerzeugung weist insbesondere der elektrische Lichtbogenofen (Electric Arc Furnace, EAF) ein hohes positives Flexibilitätspotenzial auf. Der Prozess kann mehrmals täglich für wenige Minuten unterbrochen werden. Eine Erhöhung der Leistung (negatives Potenzial) ist nicht möglich. Die Gießereien sind in einem kontinuierlichen Betrieb und können nur eingeschränkt bzw. gar nicht (beispielsweise beim Strangguss) unterbrochen werden. Die in dieser Branche eingesetzten Schmelzöfen bieten die Möglichkeit der Hybridisierung durch den Einsatz von Zusatzbrennern. Damit kann zwischen verschiedenen Brennstoffen (Erdgas, H₂) variiert und damit Flexibilität erschlossen werden. Das Projekt Synergie untersucht einen bivalenten Tiegelofen, um zwischen Strom und Gas

wechseln zu können¹⁰. Der Prozess des Warmwalzens weist ein Flexibilitätspotenzial durch Unterbrechungen (Zwischenlagerung) der Teile auf. Zu beachten ist jedoch, dass diese dabei abkühlen und bei der Wiederaufnahme des Prozesses neu erwärmt werden müssen. Im Gegensatz dazu kann beim Kaltwalzen Flexibilität durch eine Unterbrechungen bzw. Verzögerungen diskontinuierlicher Prozesse durch Verlangsamung des Walzprozesses auf der Walzstraße bereitgestellt werden. Band- und Schlingenspeicher gewährleisten einen insgesamt kontinuierlichen Betrieb der Schweißmaschine sowie der Beizanlage und gleichen unterschiedliche Geschwindigkeiten des gewalzten Bandes in der Anlage aus. Die entsprechende Speichergröße stellt damit auch die entscheidende Restriktion des Flexibilitätspotenzials dar. Bereits heute wird diese Flexibilität genutzt, um die Höchstlast der Anlage zu begrenzen und damit Netzentgelte zu reduzieren¹¹.

Im Bereich der Nicht-Eisen-Metalle bietet insbesondere die Aluminiumelektrolyse ein hohes Flexibilitätspotenzial, beispielsweise durch Abschaltung der Zellen oder durch die Variation der Stromstärke von in Serie geschalteten Zellen. Eingeschränkt wird der flexible Betrieb dadurch, dass die Stromstärkevariation zu einem veränderten Magnetfeld und somit zu Kurzschlüssen innerhalb der Zelle führen kann. Insgesamt ist die Variation der Nennleistung um +/- 25 Prozent innerhalb einer Elektrolysezelle möglich¹².

In der Zementproduktion bieten ebenfalls verschiedene Prozessschritte das Potenzial zur Flexibilitätsoption. Zunächst können die Rohmühlen flexibel gefahren werden, indem sie von den anschließenden Prozessschritten entkoppelt werden. Dafür müssen sowohl vorgelagerte Rohmaterialhalden, als auch nachgelagerte Rohmehlsilos vorhanden sein. Die Kapazität der Rohmühlen ist in der Regel sowieso etwas größer ausgelegt, als für den kontinuierlichen Betrieb des Drehrohrofens notwendig wäre. Somit kann trotz Flexibilitätsabruf die Verfügbarkeit von Rohmehl zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden. Weiterhin können auch die Zementmühlen am Ende der Prozesskette flexibel eingesetzt werden. In den Mühlen wird Zementklinker, der in Klinkersilos zwischengelagert ist, feingemahlen. Das entstehende Zementpulver wird ebenfalls in Silos gelagert. Diese Mühlen machen etwa 45 Prozent des elektrischen Energieverbrauchs der gesamten Zementherstellung aus. Durch Nutzung der beiden Silokapazitäten, können die Mühlen flexibel eingesetzt werden, ohne die Erfüllung von Lieferverpflichtungen zu gefährden¹³.

In der Glasproduktion bieten sich Flexibilitätspotenzial vor allem durch die Hybridisierung der Schmelzwannen. So werden aktuell bereits Wannen vermarktet, welche durch elektrische Zusatzheizung ihren Gaseinsatz anpassen können. Zukünftig werden vollständig hybride Wannen ergänzt durch Wasserstoff-Feuerung, um größere Flexibilität bereitstellen zu können¹⁴.

¹⁰ Bivalenter Tiegelofen – SynErgie (2024).

¹¹ Schlemme, J. / Bons, M.: Flexibilitätssteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK (2019).

¹² Hübner, T. / Guminski, A. et al: Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK (2019).

¹³ Hübner, T. / Guminski, A. et al: Flexibilitätssteckbrief der Zementindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

¹⁴ Leisin, M.: Flexibilitätssteckbrief der Glasindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK (2019).

3.2.2 Chemie- und Papierindustrie

Der Chemiesektor hat insbesondere in der Chlorelektrolyse Potenziale zur Flexibilisierung. Diese entstehen aus der Entkopplung der Elektrolyse von den Lieferverpflichtungen durch die Speicherung des entstehenden Chlors. Limitierend ist hierbei, dass die Speicherung größerer Mengen aufgrund von Sicherheitsbestimmungen nur begrenzt möglich ist. Teilweise wird das Chlor jedoch zu einem einfach speicherbaren, flüssigen Zwischenprodukt (Ethylenhydrochlorid, EDC) weiterverarbeitet, welches dann in der PVC-Herstellung eingesetzt wird. Die bessere Speicherfähigkeit erhöht auch das zugehörige Flexibilitätspotenzial. Die resultierende Flexibilität wird bereits im Regelleistungsmarkt (Minutenreserve) vermarktet. Sowohl im Membran-, als auch im Diaphragma-Verfahren können die Elektrolyseure flexibel zwischen Voll- und Teillast betrieben werden, was in der Regel zwischen 50 bis 100 Prozent der maximalen elektrischen Last entspricht¹⁵.

In der Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren bieten vor allem Spritzgussmaschinen Möglichkeiten zur Flexibilisierung. Diese ist aber durch die oft hohe Komplexität des Produktionsprozesses und der produzierten Bauteile mit Schwierigkeiten verbunden, da die Flexibilisierung keine negativen Auswirkungen auf die Qualität der Produkte haben darf. Das macht eine Anpassung der technischen Produktionsparameter schwierig. Aus diesem Grund eignet sich hier vor allem eine Anpassung der Produktionsplanung oder des Produktionsstarts, um die Stromlast zu flexibilisieren.

In der Papierindustrie eignen sich durch ihre hohe elektrische Leistung und Regelbarkeit insbesondere die strombasierten Anwendungen wie beispielsweise Holzschleifer gut zur Flexibilisierung. Diese können kaskadenförmig zu- bzw. abgeschaltet werden. Dazu müssen sie mit Überkapazität im Vergleich zur nachgelagerten Papiermaschine ausgelegt und die Erzeugung durch Materialspeicher von den weiteren Verarbeitungsschritten getrennt werden. Infolgedessen können sowohl positive als auch negative Flexibilitätspotenziale bereitgestellt werden. Die Faserstoffaufbereitung in der Altpapierverwertung kann ebenfalls beide Arten an Flexibilitätspotenzialen bereitstellen. Auch hier müssen dazu die Fasersuspensionen in Zwischenspeichern lagerbar sein. Die Dimensionierung der Speicher entscheidet in beiden Fällen über das Flexibilitätspotenzial. Auch im Trocknungsbereich der Papiermaschine wäre eine Hybridisierung durch die Nutzung verschiedener Trocknungsverfahren denkbar. Zusätzlich kann die Prozesswärmebereitstellung hybridisiert und/oder durch Wärmespeicher flexibilisiert werden. Das ist einerseits durch Elektrodenheizkessel, andererseits mit Großwärmepumpen möglich¹⁶.

¹⁵ Fichter, T. / Creutzburg, P.: Flexibilitätssteckbrief der Grundstoffchemie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK (2019).

¹⁶ Godin, H.: Flexibilitätssteckbrief der Papierindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK (2019).

3.2.3 Branchenübergreifende Querschnittstechnologien

Aus der Vielzahl an Querschnittstechnologien soll im Folgenden ein Überblick über jene Technologien gegeben werden, die besonders gut Flexibilität bereitstellen können (siehe Tabelle 2).

Allgemein liegt der Betriebspunkt regelbarer elektrischer Antriebe und Motoren häufig so, dass die Last in beide Richtungen veränderbar ist und sie sowohl langsamer als auch schneller laufen können. Damit können sie positive und negative Lastflexibilität bereitstellen. Analog dazu können auch regelbare Pumpen in unterschiedlichen Lastbereichen betrieben werden. Auch Verdichter können – besonders in Kombination mit Speichern – zu Phasen mit Niedrigstrompreisen hochgeregelt werden, so dass zu Hochstrompreiszeiten die Versorgung aus den Speichern stattfindet.

Tabelle 2

Flexibilisierbare Anlagen bei branchenunspezifischen Querschnittstechnologien

| Technologie | Flexibilisierbare Anlagen |
|-------------------------|--|
| Lüftung | – Motoren von Ventilatoren |
| Klima- und Prozesskälte | – Elektrische Verdichter (Kompressionskältemaschinen, Splitgeräte) – Motoren von Ventilatoren/Umwälzpumpen – Speicher* |
| Wasserbereitstellung | – Motoren von Grund- bzw. Trinkwasserpumpen – Umwälzpumpen – Reservoirs |
| Raumwärme/ Warmwasser | – Wärmepumpe – Heizstäbe zur elektrischen Warmwasserbereitung – Heizungsumwälzpumpen – Speicher* |
| Prozesswärme | – Elektrodenkessel – Großwärmepumpen – Hybride Systeme |
| Kraft-Wärme-Kopplung | – Blockheizkraftwerke / KWK-Anlagen |
| Netzersatzanlagen | – Notstromaggregate |
| Batteriespeicher | – Batterien |

* Zur Ermöglichung der Flexibilisierung

Lüftungsanlagen verfügen über ein geringes Flexibilitätspotenzial. Unter Berücksichtigung der vorgegebenen Grenzwerte kann die Luftqualität bei höherer Lastaufnahme über die vorgeschriebenen Grenzen hinaus verbessert und anschließend für kurze Zeit abgeregelt werden, ohne dass die Grenzwerte überschritten werden.

Weiterhin verfügt die Wärme- und Kälteversorgung über viele Optionen zur Flexibilitätsbereitstellung. So können Wärme- und Kältespeicher je nach Netzauslastung und Strompreis befüllt oder entleert werden, wodurch die Erzeugung vom Verbrauch zeitlich entkoppelt wird. Die Speichergröße bestimmt dabei die Höhe des verfügbaren Potenzials. Kältebereitstellung kann dabei generell branchenübergreifend Abrufdauern von bis zu 0,3 h bereitstellen¹⁷. Weiterhin geben hybride Systeme die Möglichkeit, flexibel zwischen verschiedenen Energieträgern (z. B. Strom und Gas) zu wechseln, um (Prozess-)Wärme zu produzieren. Insbesondere Elektrodenheizkessel, Heizstäbe (Power-to-Heat) oder (Groß-)Wärmepumpen können flexibel an- und abgefahren werden, jedoch müssen die Rückwirkungen auf Wirkungsgrad und Jahresarbeitszahl berücksichtigt werden.

Weitere Speichermöglichkeiten und damit Flexibilitätspotenziale sind durch die Lagerung von Rohstoffen und (Zwischen-)Produkten möglich (materielle Zwischenspeicherung). Außerdem können Batteriespeicher vielfältig eingesetzt werden, beispielsweise um PV-Anlagen eigenverbrauchsoptimiert zu nutzen oder am Regelleistungs- bzw. Intraday-Handel teilzunehmen. Auch Notstromaggregate werden bereits heute zur Vermarktung von Flexibilität genutzt.

Eine besondere Form der Flexibilitätsbereitstellung ist durch Blockheizkraftwerk-/KWK-Anlagen möglich, die sowohl wärme- als auch stromgeführt gefahren werden können.

3.2.4 Industriezweige mit hohem Anteil flexibilisierbarer Querschnittstechnologien im Prozess

In vielen Industriezweigen ergibt sich durch den industriespezifischen Prozess ein relevantes Flexibilitätspotenzial durch die eingesetzten Querschnittstechnologien, z. B. für Kühlung, Wärmebereitstellung oder Trocknung. Unter diesen Industriezweigen ist insbesondere die Automobil- und Nahrungsmittelindustrie in Bayern von Bedeutung. Beide Branchen weisen durch die im Prozess eingesetzten Querschnittstechnologien (siehe Prozesse in Tabelle 3) ein wesentliches Flexibilitätspotenzial auf.

Im Folgenden werden die Prozesse daher detaillierter beschrieben. Neben den im Text angegebenen Quellen stützt sich die Beschreibung auf die im Rahmen der Studie durchgeführten Interviews.

¹⁷ Gruber, A: 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).

Tabelle 3

Flexibilisierbare Querschnittstechnologien in industriespezifischen Prozessen

| Branche | Relevante Prozesse |
|---------------------------------------|--|
| Nahrungs- und Futtermittelherstellung | <ul style="list-style-type: none"> – Pasteurisierung – Trocknungsanlagen – Kühlhaus |
| Automobil | <ul style="list-style-type: none"> – Lackieranlagen – Gießereien |

Die Nahrungsmittelherstellung zeigt insbesondere in den Querschnittstechnologien, wie z. B. Pumpen, Lüftung, Wärme- und Kälteerzeugung, ein hohes Flexibilitätspotenzial¹⁸. Ein Beispiel dafür ist das Pasteurisieren in der Rohmilchverarbeitung. Die Wärmebereitstellung ist neben konventionellen Methoden auch elektrisch per Mikrowellenerhitzung möglich. Die Hybridisierung des Prozesses kann neue Flexibilitätspotenziale bieten. Ähnlich kann auch der Trocknungsprozess hybridisiert werden oder durch eine veränderte Produktionsreihenfolge Flexibilität bereitstellen. Damit lassen sich insbesondere in den folgenden Teilbereichen der Nahrungsmittelherstellung Flexibilität erzielen: In der Fleischverarbeitung zeigen die Kühlhäuser und -prozesse ein hohes Flexibilitätspotenzial, beispielsweise durch die zeitweise Unterbrechung der Kühlung bei dennoch gewährleisteter Kühltemperatur. In der Milchverarbeitung kann hybride Wärmebereitstellung (Power-to-Heat, Mikrowellenerhitzung etc.) Flexibilität bereitstellen. Bereits heute werden außerdem sogenannte Wärmeschaukeln eingesetzt. So werden Wärmespeicher bezeichnet, welche die Rückgewinnung von Abwärme aus verschiedenen Prozessen zeitlich von der Nutzung im Erwärmungsprozess trennen. Bei der Herstellung von Backwaren kommen ebenfalls überwiegend flexibilisierbare Querschnittstechnologien zur Anwendung. Über 70 Prozent des Stromverbrauches fallen hierbei für die Wärme- und Kältebereitstellung an. Hinzu kommen Pumpen, Lüftung und Beleuchtung.

Die Automobilindustrie besitzt vor allem durch die werkseigenen Gießereien ein Flexibilitätspotenzial durch Hybridisierung des Prozesses (siehe Eisen- und Stahlerzeugung). Hinzu kommt, dass auch die den Lackieranlagen nachgelagerte Trocknung hybridisiert werden kann und damit flexibilisierbar ist.

¹⁸ Creutzburg, P. / Bons, M.: Flexibilitätssteckbrief der Nahrungsmittelindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK (2019).

3.3 Vermarktungsmöglichkeiten

Haben Industrieunternehmen flexibilisierbare Prozesse und Technologien identifiziert, stellt sich die Frage, inwiefern die Potenziale vermarktet werden können. Die Vermarktung der Flexibilität ist von einer Optimierung des Eigenverbrauchs abzugrenzen. Mit der Eigenverbrauchsoptimierung kann sich für viele Unternehmen mit Eigenerzeugungsanlagen eine Flexibilisierung der Prozesse bereits lohnen. Durch die **Vermarktung** können darüber hinaus **weitere Erlöse** für das Industrieunternehmen und **Mehrwerte für das Energiesystem** generiert werden.

Grundsätzlich können aus Energiesystemperspektive industrielle Flexibilitätspotenziale für netzdienliche und marktdienliche Anwendungsfälle eingesetzt werden. Zur Erläuterung:

- **Netzdienlich** beschreibt den Einsatz von Flexibilität zur Begegnung von Netzengpässen (Engpassmanagement) im Übertragungs- und Verteilnetz.
- **Marktdienlich** beschreibt den Einsatz von Flexibilität auf Systemebene für den Systembilanzausgleich (Ausgleich von Erzeugung und Nachfrage). Hier könnte industrielle Flexibilität dazu eingesetzt werden, um **kurzfristige Schwankungen** im Sekunden- oder Minutenbereich, **Schwankungen im Tagesverlauf** im Stundenbereich oder **Dunkelflauten und Hellbrisen** über mehrere Tage ausgleichen¹⁹.

Für eine **netzdienliche Vermarktung** industrieller Flexibilität besteht derzeit kein Rechtsrahmen und dementsprechende **keine Vermarktungsmöglichkeiten**. Daher werden im Folgenden die marktdienlichen Anwendungsfälle betrachtet.

Bei den **marktdienlichen Anwendungsfällen** ist zunächst zwischen der **Vermarktung am Großhandel** oder der **Bereitstellung von Systemdienstleistungen**, die marktbasierend durch Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) beschafft werden, zu unterscheiden. Im europäischen Stromsystem findet der Großhandel ohne Berücksichtigung des Stromnetzes statt. Das heißt der Stromhandel unterstellt die sogenannte „Kupferplatte“, ohne mögliche Transportkapazitäten im Stromnetz zu berücksichtigen. Der Handel findet vor der physikalischen Lieferung auf mehreren sequenziell aufeinanderfolgenden Märkten statt: dem Terminmarkt und anschließend dem Spotmarkt bestehend aus Day-Ahead und Intraday Markt. Gehandelt werden kann entweder an der **Strombörse** oder bilateral über den „**Over-the-Counter**“ (**OTC**)-Handel. Abbildung 6 stellt die sequenzielle Abfolge der Strom- und Regelreservemärkte dar.

Über den **Terminmarkt** oder durch Terminkontrakte im OTC-Handel kann der Stromeinkauf mittel- bis langfristig optimiert werden. Der Handel über den längeren Zeithorizont erlaubt es auch, sich gegenüber Preisschwankungen abzusichern (Hedging).

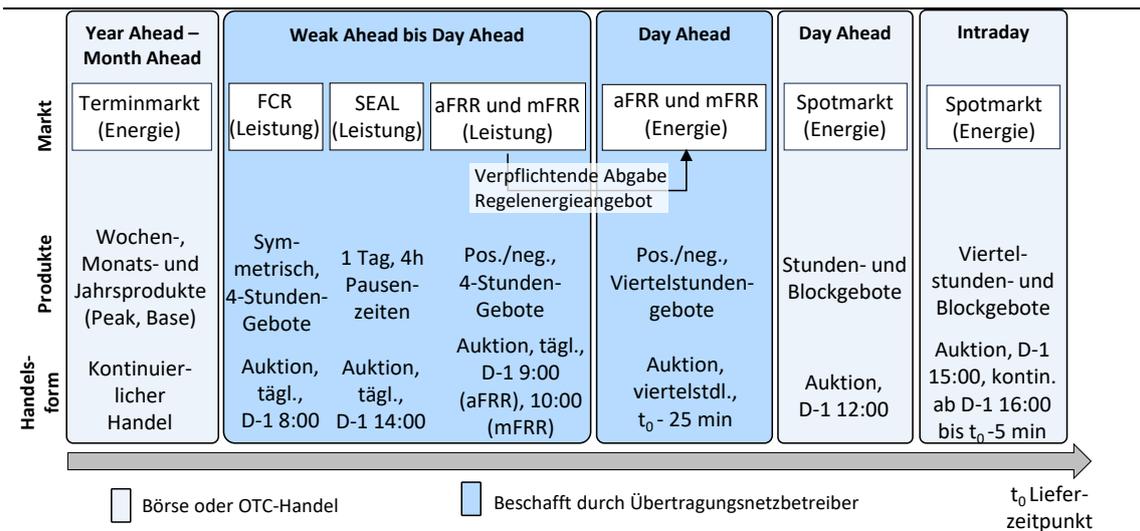
Anschließend folgt der **Spotmarkt** an der Börse bzw. Day-Ahead und Intraday-Kontrakte im OTC-Handel. Informationen zum Day-Ahead und Intraday-Markt finden sich auf der Internetseite der Spotmarkt-Börse EPEX SPOT (www.epexspot.com). Am Spotmarkt werden die folgenden Märkte unterschieden:

¹⁹ Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE): Anforderungsprofile für Flexibilität (2021)

- Der **Day-Ahead-Handel** findet am Vortag des tatsächlichen Stromverbrauchs oder der Stromerzeugung statt. An der Börse erfolgt die Auktion um 12:00 Uhr am Vortag. Gehandelt werden Stundenprodukte und Blockgebote für den Folgetag. Im Intraday-Markt können dann kurzfristige Anpassungen vorgenommen werden, beispielsweise durch eine veränderte Prognose zur Erzeugung aus erneuerbaren Energien mit aktuelleren Wetterdaten.
- Der **Intraday-Handel** startet am Vortag mit einer Eröffnungsauktion um 15:00 Uhr an der Börse. Gehandelt werden Viertelstunden für den Folgetag bzw. Blockgebote. Ab 15:00 bzw. 16:00 Uhr startet der kontinuierliche Intraday-Handel mit Stunden- bzw. Viertelstundengeboten. Gehandelt werden kann bis fünf Minuten vor der physikalischen Erbringung. Der Intraday-Handel erlaubt Industrieunternehmen eine kontinuierliche stündliche und viertelstündliche Optimierung des Stromverbrauchs mit dem Vorliegen neuer Informationen.

Abbildung 6

Darstellung der Vermarktungsmöglichkeiten im Zeitverlauf



Hinweis: FCR = Primärregelreserve; aFRR = Sekundärregelreserve; mFRR = Minutenreserve; SEAL = Systemdienstleistungsprodukt im Echtzeitbereich aus abschaltbaren Lasten

Quelle: Eigene Darstellung (FFE) nach ENERKO²⁰, EPEX SPOT²¹ und Informationen auf www.regelleistung.net

Industriebetriebe können mit einer direkten Vermarktung der Flexibilität an den Strommärkten oder der Reaktion auf einen Stromtarif, der die Börsenpreise abbildet, durch die Preisdifferenzen Erlöse generieren bzw. ihre Energiekosten optimieren. Daneben gibt es noch die Vermarktungsmöglichkeiten im Rahmen von **Systemdienstleistungen**.

²⁰ ENERKO: Flexible Strom- und Wärmeerzeugung - Die drei Leitfragen für die Vermarktung flexibler Erzeugungsanlagen.

²¹ EPEX SPOT: Trading Products (2024).

Systemdienstleistungen werden von ÜNB beschafft, um die Sicherheit des Stromsystems zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten. Derzeit wird durch ÜNB die **Regelreserve** und das „**Systemdienstleistungsprodukt im Echtzeitbereich aus abschaltbaren Lasten**“ (kurz: SEAL) für die Leistungs-Frequenz-Regelung marktbasiert beschafft. Letzteres ist dabei das Nachfolgeprodukt für die bis 2022 geltende abschaltbare Lastenverordnung. Detaillierte Informationen zu der Beschaffung der Regelreserve und SEAL finden sich auf www.regelleistung.net. Beide Produkte werden von den ÜNB um die Netzfrequenz stabil zu halten. Bei der Regelreserve sind drei verschiedene Produktqualitäten mit unterschiedlichen Anforderungen zu unterscheiden: die **Primärregelreserve** (Frequency Containment Reserve, FCR), die **Sekundärregelreserve** (automatic Frequency Restoration Reserve, aFRR) und die **Minutenreserve** (manual Frequency Restoration Reserve, mFRR). Zusätzlich wird noch zwischen positiver und negativer Regelreserve unterschieden. Negative Regelreserve wird eingesetzt, wenn die eingespeiste Energie den Verbrauch übersteigt (Leistungsüberschuss) und die Netzfrequenz infolgedessen ansteigt. Für einen Industriebetrieb würde dies bedeuten die Last zu erhöhen, um Erzeugung und Verbrauch wieder auszugleichen. Positive Regelreserve wird bei einem Frequenzabfall, also einem Leistungsdefizit eingesetzt. Für den Industriebetrieb würde dies bedeuten, die Last zu verringern. Für die drei Regelreservequalitäten, Primärregelreserve, Sekundärregelreserve und Minutenreserve, werden von den ÜNB Regelreserveprodukte (Leistung und Energie) über Märkte beschafft (siehe Abbildungen 3-3). Die Regelleistung wird derzeit täglich ausgeschrieben. Eine Teilnahme am Regelleistungsmarkt würde für Industriebetriebe bedeuten, dass sie bei Zuschlag einen Teil der Anlagenleistung für einen möglichen Abruf durch die ÜNB vorhalten bzw. reservieren. Das Vorhalten der Leistung wird durch die ÜNB vergütet (€/MW), auch wenn kein Abruf erfolgen sollte. Für Sekundär- und Minutenreserve wird auf einem separaten Markt noch Regelennergie ausgeschrieben. Eine Vergütung bei Zuschlag erfolgt dabei in €/MWh. Hat ein Industriebetrieb am Regelleistungsmarkt teilgenommen, muss er zwingend auch ein Gebot am Regelenenergiemarkt abgeben.

Zusätzlich zu den Regelreservemärkten gibt es noch das **Produkt SEAL**, welches durch ÜNB bei Unterfrequenz aktiviert werden kann. Das Produkt richtet sich explizit an abschaltbare Lasten. Die Angebotsabgabe öffnet eine Woche vor Erbringungstag und schließt am Vortag um 14:00 Uhr. Bezuschlagt und vergütet wird nach dem Leistungspreis. Ausgeschrieben wird in der Regel eine Menge < 750 MW. Das Produkt wurde zum ersten Mal am 15. Mai 2024 ausgeschrieben²². Nach den bisher veröffentlichten Daten wird das Produkt bisher aber kaum genutzt.

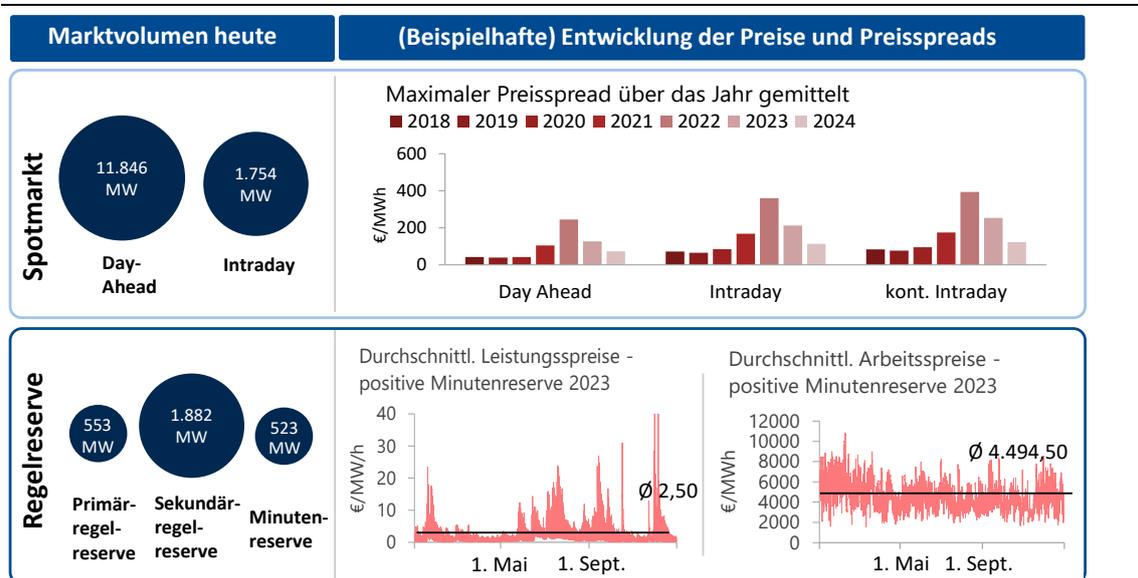
Welche Vermarktungsmöglichkeiten für einen Industriebetrieb relevant sind, richtet sich maßgeblich nach den **technischen Anforderungen der einzelnen Märkte**. Auf den Spotmärkten erfordert der Intraday-Markt einen hohen Automatisierungsgrad und schnelle Reaktionsfähigkeit der Prozesse (in Viertelstunden), dafür sind die Preisspreads in der Regel höher als auf dem Day-Ahead-Markt. Noch höhere Anforderungen stellen ÜNB an die Erbringung der unterschiedlichen Regelreservequalitäten – die Anforderungen der Primärregelleistung werden für Industriebetriebe in der Regel nur schwer erfüllbar sein.

²² Regelleistung.net: Bestätigung Starttermin zur Einführung der FSV SEAL. (2024).

Durch die besonderen Anforderungen können auf den Regelreservemärkten meist hohe Preise erzielt werden. Da die Marktvolumina teilweise sehr begrenzt sind, spielt jedoch die Konkurrenzsituation auf diesen Märkten eine besondere Rolle. Industriebetriebe müssen sich beispielsweise gegen Betreiber von Pumpspeicherkraftwerken und großen Batteriespeichern durchsetzen. Dadurch ist das neu eingeführte Produkt „SEAL“ für größere Industriebetriebe besonders interessant. Um ein Gefühl für die Marktvolumina und Preise zu bekommen, zeigt die Abbildung 7 die historische Entwicklung der Preisspreads auf dem Spotmarkt und die Preise der positiven Minutenreserve für 2023.

Abbildung 7

Marktvolumen heute und (beispielhafte) Entwicklung der Preise und Preisspreads zur Einordnung



Quelle: Eigene Darstellung (FFe) basierend auf Daten aus einer Veröffentlichung von Vollmuth, P.23 , EPEX SPOT und Regelleistung.net.

Um eine Orientierung zu geben, welche Vermarktungsmöglichkeiten in den jeweiligen Branchen von Relevanz sein könnten, erfolgt in Abbildung 8 ein **Vergleich verschiedener Flexibilitätsoptionen** für den marktdienlichen Einsatz an den Spot- und Regelreservemärkten. Der dargestellte Flexibilitätszeitraum soll eine Einordnung zur möglichen Dauer der Flexibilitätsbereitstellung (Ausgleich kurzfristiger oder täglicher Schwankungen oder Überbrückung von Dunkelflauten bzw. Hellbrisen²⁴) je Flexibilitätsoption geben aufgrund technischer, organisatorischer oder ökonomischer Restriktionen der jeweiligen

²³ Vollmuth, P. / Ganz, K. / Kern, T.: Smart e-mobility: user potential in Germany today and in the future. In: Tagungsband NEIS 2023 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems. Hamburg: VDE (2023).

²⁴ Unter einer Dunkelflaute versteht man das gleichzeitige Auftreten von Dunkelheit und einer Windflaute. Der Zustand beschreibt ein Unterangebot an Strom aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen. Das Gegenteil davon sind Hellbrisen, also Situationen in denen zu viel Windaufkommen auch die Sonne scheint und ein Überangebot an Strom besteht.

Flexibilitätsoption. Dabei handelt es sich um eine generalisierte Darstellung je Branche. Die tatsächlichen Vermarktungsmöglichkeiten müssen in der Praxis für jeden Betrieb individuell bewertet werden. Basierend auf diesen Restriktionen werden Vermarktungsmöglichkeiten auf der rechten Seite der Abbildung ausgeschlossen. Bei den Vermarktungsmöglichkeiten, die von Relevanz sind, erfolgt noch eine Einordnung, ob die Flexibilitätsoption in dem jeweiligen Markt bereits vermarktet wird (also es bereits Beispiele in der jeweiligen Branche für eine Vermarktung gibt) oder erst in Zukunft potenziell vermarktet werden könnte.

Abbildung 8
Einordnung und Vergleich der Vermarktungsmöglichkeiten verschiedener Flexibilitätsoptionen

| | Industriezweig/Technologie | Flexibilitätszeitraum | | | Vermarktungsmöglichkeiten | | | | | |
|---------------------------|---|-----------------------|---------|------|---------------------------|----|--------------------|------|------|--|
| | | Minuten | Stunden | Tage | Spotmarkt | | Regelreservemärkte | | | |
| | | | | | DA | ID | FCR | aFRR | mFRR | |
| Industrielle Flexibilität | Eisen, Stahl | ✓ | | | | | | | | |
| | Nicht-Eisen-Metalle | ✓ | | | | | | | | |
| | Zement | ✓ | (✓) | (✓) | | | | | | |
| | Glas | (✓) | | | | | | | | |
| | Grundstoffchemie | ✓ | ✓ | (✓) | | | | | | |
| | Papier | ✓ | ✓ | | | | | | | |
| | Nahrungsmittel | ✓ | (✓) | | | | | | | |
| | Automobil | ✓ | (✓) | | | | | | | |
| | QST (Lüftung, Raumwärme) | (✓) | (✓) | | | | | | | |
| | QST (Prozesswärme, Prozesskälte) | ✓ | (✓) | | | | | | | |
| | QST (KWK-Anlagen) | ✓ | ✓ | | | | | | | |
| | QST (Batterien, Notstromaggregate) | ✓ | (✓) | | | | | | | |
| Sonstige | Großbatterien | ✓ | (✓) | | | | | | | |
| | Pumpspeicherkraftwerke | ✓ | ✓ | | | | | | | |
| | Elektroautos (Bidirektional) | ✓ | (✓) | | | | | | | |
| | Gaskraftwerke (künftig H ₂) | ✓ | ✓ | | | | | | | |
| | Elektrolyse und Power-to-Heat | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | |

Leeres Feld = ungeeignet; ✓ = geeignet; (✓) = bedingt geeignet
■ Wird bereits vermarktet
■ Nicht geeignet aus technischen, organisatorischen und/oder ökonomischen Gründen
■ Potenzielle Vermarktung

Hinweis: DA = Day-Ahead; ID = Intraday; FCR = Primärregelreserve; aFRR = Sekundärregelreserve; mFRR = Minutenreserve; QST = Querschnittstechnologie; KWK = Kraft-Wärme-Kopplung

Quelle: Eigene Darstellung (FFe); Einordnung basierend auf bestehenden Arbeiten^{25,26,27} und den durchgeführten Interviews.

²⁵ Guidehouse Germany und Öko-Institut: Überblick zu nachfrageseitigen Flexibilitätsoptionen und Speichern sowie Flexibilitätshemmnissen. Wissenschaftliches Inputpapier für die AG 2 der PKNS (2023).

²⁶ Veitengruber, F. / Kigle, S. / Helmer, N. / Strobel, Q.: Volkswirtschaftlicher Nutzen von Flexibilitätspotenzialen in der Industrie. München.

²⁷ Jetter, F./ Veitengruber, F. et al.: Regionale Lastmanagementpotenziale - Quantifizierung bestehender und zukünftiger Lastmanagementpotenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft und Guidehouse Germany (2021)

4 Flexibilitätspotenziale in Bayern

Von 7,5 GW Flexibilitätspotenzialen durch Lastreduktion in Deutschland sind 1,1 GW in Bayern verortet

In Kapitel 2 wird aus systemischer Perspektive aufgezeigt, wie viel Flexibilitätsbedarf in Bayern besteht und welche Flexibilitätsoptionen dafür in Frage kommen. Industrielle Flexibilität ist dabei eine der Flexibilitätsoptionen, die zur Deckung dieses Bedarfs herangezogen wird. Welche Prozesse in der Industrie dabei prinzipiell flexibilisiert werden können, wird in Kapitel 3.2 gezeigt. Darauf aufbauend wird im Folgenden ausgewiesen, wie groß das mögliche Flexibilitätspotenzial für eine Lastverschiebung ist, das in der Industrie in Deutschland und in Bayern erschlossen werden könnte.

4.1 Bestimmung der deutschen Flexibilitätspotenziale

Die in dieser Studie ausgewiesenen und aktualisierten **industriellen Flexibilitätspotenziale** basieren zunächst auf Szenarien aus bestehenden Arbeiten^{28,29}. Dabei wurden die Potenziale hinsichtlich Eintrittszeitpunkt und -Wahrscheinlichkeit von neuen Technologien sowie als Ergebnis der Interviews mit einzelnen bayerischen Industriebetrieben aktualisiert. Bei den Potenzialen handelt es sich um Szenarien, die eine mögliche Entwicklung des Flexibilitätshochlaufs abbilden, und nicht um eine Prognose.

Die ausgewiesenen Wirtschaftszweige wurden im Rahmen dieser Studie um die Branchen Gummi- und Kunststoffwaren sowie Nahrungs- und Futtermittelherstellung erweitert. Dazu wurden Interviews mit Vertretern beider Branchen durchgeführt und Schätzungen zum jährlichen Stromverbrauch der Werke sowie mögliche flexibilisierbare Leistungen abgefragt. Anschließend wurde die Übertragbarkeit auf den gesamten Wirtschaftszweig abgeschätzt. Dafür wurde je Branche ein Skalierungsfaktor unter Berücksichtigung des Jahresstromverbrauchs des Wirtschaftszweigs im Vergleich zum Jahresverbrauch des Werkes abgeleitet. Da die befragten Unternehmen anonym bleiben möchten, werden keine genaueren Parameter in diesem Bericht spezifiziert.

Zur Berechnung zukünftiger Potenziale wurde ein technologischer Hochlauf sowie eine zunehmende Elektrifizierungsquote angenommen. Für die Berechnung wurden die im Folgenden genannten Branchen und Querschnittstechnologien berücksichtigt:

²⁸ Jetter, F. / Veitengruber, F. et al.: Regionale Lastmanagementpotenziale - Quantifizierung bestehender und zukünftiger Lastmanagementpotenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft und Guidehouse Germany (2021).

²⁹ Veitengruber, F. / Kigle, S. / Helmer, N. / Strobel, Q.: Volkswirtschaftlicher Nutzen von Flexibilitätspotenzialen in der Industrie. München.

Betrachtete Branchen:

- Primär- und Sekundärstahl
- Chemie
- Gummi- und Kunststoffwaren
- Hohl- und Flachglas
- Papiermaschine
- Primär- und Sekundäraluminium
- Chlor
- Nahrungs- und Futtermittelherstellung
- Zement
- Holzstoff

Berücksichtigte übergreifende Querschnittstechnologien:

- Prozesskälte
- Lüftung
- Klimakälte
- Raumwärme/Warmwasser

Damit der Beitrag einzelner Industriezweige besser nachvollziehbar ist, wird Nahrungs- und Futtermittelherstellung bei den prozessspezifischen Potenzialen gelistet, auch wenn die Flexibilitätspotenziale sich zum Großteil auf bei den Prozessen eingesetzte Querschnittstechnologien konzentrieren (siehe Kapitel 3.2).

Die in der Studie angegebenen Potenziale berechnen sich wie folgt:

1) Bestimmung der Grenzen der Flexibilität

Die Berechnung der Potenziale erfolgt auf Basis der installierten Leistung je Technologie. Unter Berücksichtigung der mittleren jährlichen Auslastung der Prozesse je Wirtschaftszweig und sicherheits- und anlagenspezifischen Restriktionen wie Wartungen wird eine mögliche Reduktion und Erhöhung der Last in Prozent ermittelt. Da die Gesamtproduktion von Waren in Unternehmen nicht eingeschränkt werden soll, werden nur verschiebbare Lasten betrachtet. Lastabschaltungen, die mit Produktionsausfällen einhergehen, sind nicht berücksichtigt.

Beispiel: Für die Last einer Maschine, die mit einer mittleren Jahreslast von 90 kW betrieben wird, wird eine realisierbare Erhöhung um 6 Prozent angenommen. Damit ist ein zusätzlicher Puffer beispielsweise für Ausfälle und Wartungen vorbehalten. Eine Reduktion ist hingegen vollständig möglich, solange dadurch kein zusätzlicher Verschleiß der Maschinen erzeugt wird.

2) Bestimmung von Abrufzeiten und der verschiebbaren Energiemenge

Anschließend werden minimale und maximale Abrufzeiten der Lasterhöhung bzw. -reduktion bestimmt. Diese basieren auf Literaturrecherchen und Experteninterviews mit Industrieunternehmen. Die Abrufzeiten werden genutzt, um unter Berücksichtigung von Pausen- und Schichtzeiten, Verschleiß, Mindeststillstandszeiten zwischen Abrufen und weiteren Parametern die maximal verschiebbare Energie zu berechnen.

Beispiel: Eine Anlage mit einer mittleren Last von 90 kW kann auf 70 kW reduziert bzw. 96 kW erhöht werden. Die ausgefallene Produktion soll innerhalb einer 8-Stunden-Schicht nachgeholt werden. Wird die Anlage nur für 1 h um 20 kW auf 70 kW reduziert, entsteht ein Nachholbedarf von 20 kWh. Die Lasterhöhung um 6 kW auf 96 kW muss nun für $20 \text{ kWh} / 6 \text{ kW} = 3,33 \text{ h}$ laufen, um diesen Nachholbedarf zu decken. Die gesamte

Lastverschiebung dauert somit mindestens 4,33 h und ist damit nur einmal innerhalb von einer 8 h-Schicht möglich.

3) Abbildung des Hochlaufs der Erschließung der Flexibilitätspotenziale

Um den Hochlauf der Erschließung der Flexibilitätspotenziale abzubilden, wird ein branchenspezifischer Erschließungsfaktor berücksichtigt. Dieser bildet die zunehmende Umsetzung von Flexibilitätsmaßnahmen in Unternehmen ab, so dass das erschlossene Potenzial über die Jahre einen immer größeren Anteil der theoretischen Flexibilitätspotenziale ausmacht.

4) Ergebnisdarstellung der deutschen Potenziale

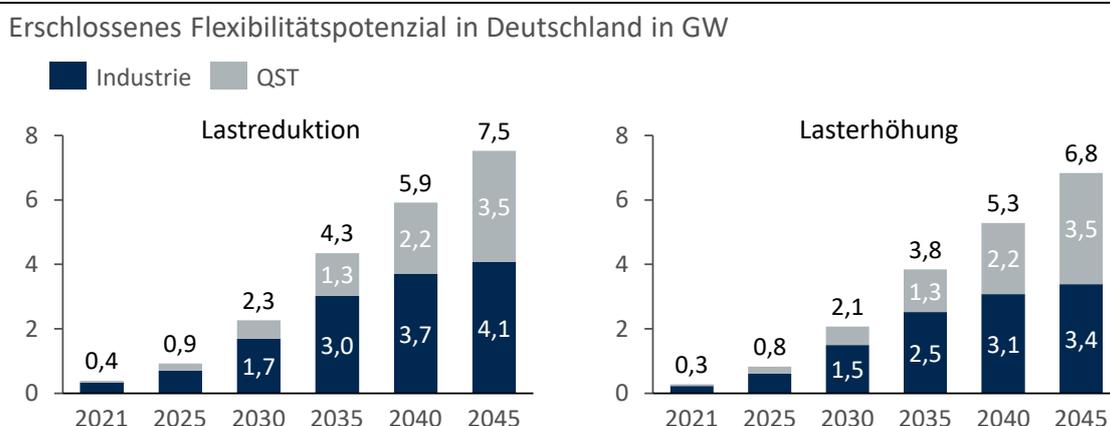
Insgesamt ergeben sich – zunächst für **Deutschland** – die in Abbildung 9 dargestellten erschlossenen Potenziale. Dabei ist auf der linken Seite das Potenzial zur Lastreduktion und auf der rechten Seite das zur Lasterhöhung, welches durch die Berücksichtigung der prozestypischen Lastprofile geringer ausfällt, abgebildet.

Im **Jahr 2025** beträgt das erschlossene Potenzial zur **Lastreduktion etwa 0,9 GW**. Dies wird zum Großteil durch industrielle Prozesse bereitgestellt. Querschnittstechnologien machen in diesem Jahr nur 0,2 GW der Leistung aus. Die erschlossene Leistung für Lastreduktion steigt über die Jahre hinweg an, bis auf **7,5 GW in 2045**. Davon stammen ca. 47 Prozent aus Querschnittstechnologien. Bei den Industrieprozessen weisen Papierherstellung, elektrische Papierherstellung und Chlorelektrolyse die höchsten Potenziale zur Flexibilisierung auf. Auch bei den ergänzten Wirtschaftszweigen Gummi- und Kunststoffwaren sowie Nahrungs- und Futtermittelherstellung wurden deutliche Potenziale identifiziert.

Der Hochlauf der Potenziale zur Lasterhöhung verläuft analog zur Lastreduktion, lediglich mit etwas geringeren Potenzialen. Das erschlossene Potenzial beläuft sich in **2025 auf insgesamt 0,8 GW** und steigt bis **2045 auf 6,8 GW** an.

Abbildung 9

Erschlossenes Flexibilitätspotenzial im Szenario in Deutschland in GW, das für Lastreduktion (links) und Lasterhöhung (rechts) zur Verfügung steht



Quelle: Eigene Darstellung (FFE).

4.2 Regionale Verortung und bayerische Flexibilitätspotenziale

Die in Abschnitt 4.1 vorgestellten Potenziale für Deutschland werden im Anschluss auf Landkreisebene regionalisiert. Dabei wird für die Industrieprozesse der Stromverbrauch der verschiedenen Wirtschaftszweige (WZ) je Landkreis aus dem Jahr 2019 verwendet. Hierbei wird der Regionalisierungsschlüssel für die Potenziale über folgende Formel bestimmt:

$$\frac{\text{WZ Verbrauch des Landkreises}}{\sum \text{WZ Verbrauch in DE}}$$

Die Potenziale werden über den gesamten Stromverbrauch des jeweiligen Wirtschaftszweigs in Deutschland normiert. Hieraus ergibt sich je Landkreis und Wirtschaftszweig ein prozentualer Anteil, nach dem das Gesamtpotenzial auf die Landkreise verteilt wird.

Da es sich bei den Querschnittstechnologien um branchenübergreifende Prozesse handelt, wird für diese je Landkreis der restliche industrielle Stromverbrauch nach Abzug der Prozessstromverbräuche für die Regionalisierung herangezogen. Die Ausnahme bilden hier Querschnittstechnologien wie die Bereitstellung von Raumwärme, die aktuell noch zum Großteil durch fossile Brennstoffe betrieben werden und bei denen zukünftig mit einer zunehmenden Elektrifizierung zu rechnen ist. In diesem Fall wird der fossile Brennstoffverbrauch für die Regionalisierung verwendet.

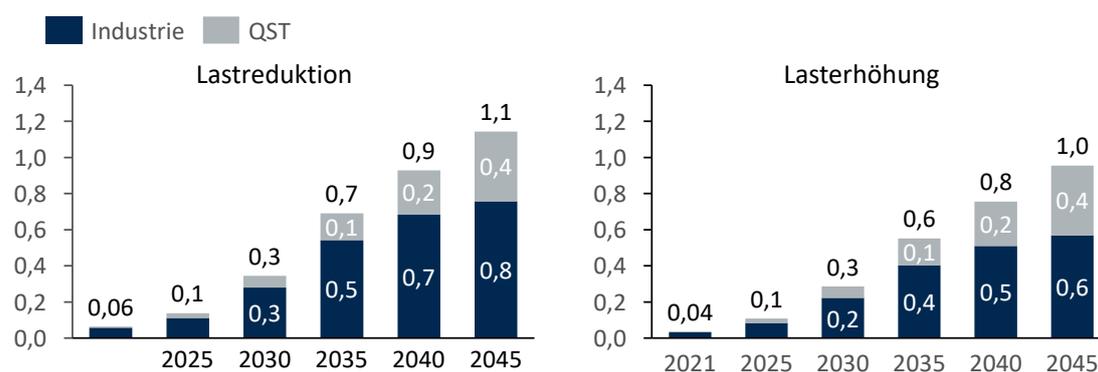
Die sich durch die Regionalisierung ergebenden **Gesamtpotenziale für Bayern** sind in Abbildung 10 dargestellt. Während **im Jahr 2025** nur knapp über **0,1 GW zur Lastreduktion** zur Verfügung stehen, steigt der Wert bis **2045** durch die zunehmende Erschließung der

Potenziale auf **1,1 GW** an. Davon stammen 0,4 GW aus Querschnittstechnologien und 0,75 GW aus industriellen Prozessen.

Abbildung 10

Erschlossenes Flexibilitätspotenzial im Szenario in Bayern in GW, das für Lastreduktion (links) und Lasterhöhung (rechts) zur Verfügung steht

Erschlossenes Flexibilitätspotenzial in Bayern in GW



Quelle: Eigene Darstellung (FfE).

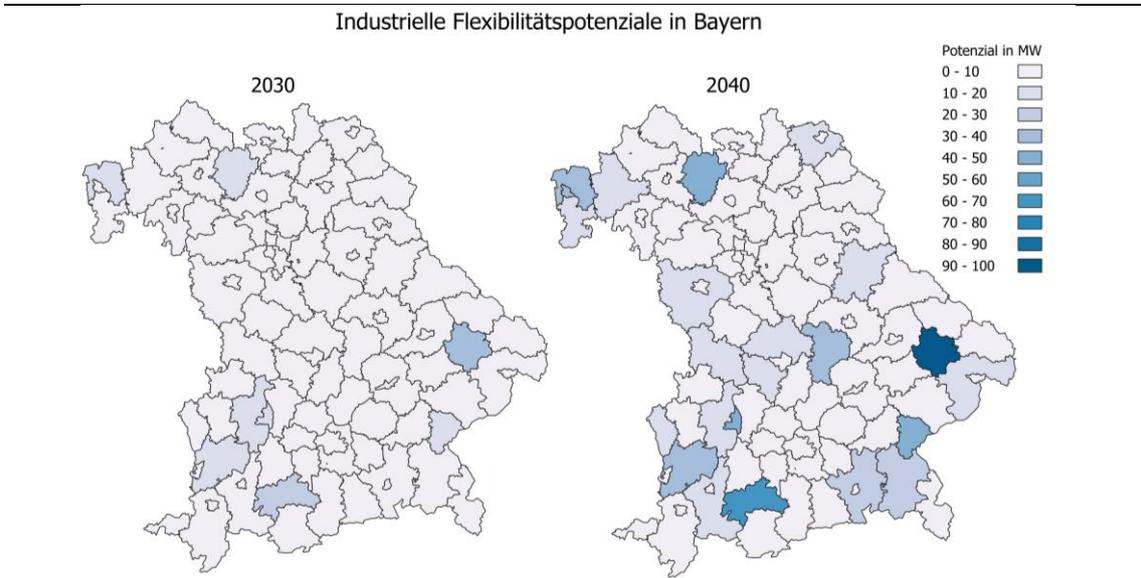
Die für Lasterhöhung zur Verfügung stehenden Potenziale fallen insgesamt etwas niedriger aus. Insgesamt ergibt sich für das Jahr 2045 ein Lasterhöhungspotenzial von **1,0 GW**, was daran liegt, dass industrielle Prozesse generell schon auf hoher Auslastung fahren und daher die Möglichkeiten zur Erhöhung der Last deutlich eingeschränkt ist. Dies führt zu einem Lasterhöhungspotenzial von 0,6 GW in 2045. Das Potenzial der Querschnittstechnologien liegt bei 0,4 GW.

Abbildung 11 zeigt die **regionale Verteilung der Flexibilitätspotenziale zur Lastreduktion in Bayern** für die Jahre 2030 und 2040 je Landkreis. Für die Potenziale zur Lasterhöhung ergibt sich die gleiche regionale Verteilung mit lediglich geringeren Werten je Landkreis.

In 2030 wird das gesamte Potenzial von 0,3 GW in Bayern regionalisiert. Es zeigt sich, dass die Potenziale für den Großteil der Landkreise unter 20 MW liegen. Einzelne Landkreise zeigen aufgrund von geballten Industriezentren höhere Potenziale auf. Das **höchste Potenzial** ist in **Augsburg und Deggendorf** zu finden mit jeweils knapp über 30 MW. Danach folgen Weilheim-Schongau, Aschaffenburg und Altötting mit Potenzialen zwischen 15 und 25 MW. Im Jahr 2040 wird das angestiegene Gesamtpotenzial von 0,9 GW auf die Landkreise verteilt. Dabei ändert sich nichts an der grundsätzlichen Verteilung der Potenziale. Augsburg und Deggendorf weisen mit 98 MW bzw. 91 MW nach wie vor das größte Potenzial zur Lastreduktion auf. Weilheim-Schongau und Aschaffenburg folgen mit Potenzialen von knapp über 60 MW und Altötting mit 48 MW. Die Potenziale der restlichen Landkreise sind jeweils geringer als 42 MW.

Abbildung 11

Regionale Verteilung der industriellen Flexibilitätspotenziale für Lastreduktion in Bayern für die Jahre 2030 und 2040



Quelle: Eigene Darstellung (FFE).

5 Rahmenbedingungen der Bereitstellung industrieller Flexibilität

Regulatorische, technologische, organisatorische und sozio-ökonomische Einflussfaktoren beschränken das Flexibilitätspotenzial heute

Die Bereitstellung von Flexibilität durch Industrieunternehmen **unterliegt verschiedenen Einflussfaktoren**, die das Flexibilitätspotenzial in der Realität einschränken können. Im Rahmen der Studie wurden die Einflussfaktoren auf der Basis von Studien^{30,31}, Berichten aus Forschungsprojekten zu industrieller Flexibilität^{32,33,34}, Verbändedepositionen³⁵ und den durchgeführten Interviews synthetisiert und strukturiert. Unterschieden wird zwischen **regulatorischen, technologischen, organisatorischen und sozioökonomischen Einflussfaktoren**, die in Abbildung 12 dargestellt sind.

Der Fokus im Rahmen dieser Studie liegt auf Einflussfaktoren, die branchenübergreifend eine Rolle spielen. Die einzelnen Einflussfaktoren können sich grundsätzlich in ihrer Relevanz je Branche und Betrieb stark unterscheiden. Zudem können auch ganz individuelle Einflussfaktoren existieren.

Die Einflussfaktoren, die auch Hemmnisse für die Flexibilitätsbereitstellung sein können, werden genutzt, um im folgenden Kapitel Handlungsempfehlungen zu formulieren. Industriespezifische, technische Einflussfaktoren, die das Flexibilitätspotenzial begrenzen, wurden bei der Bestimmung der Flexibilitätspotenziale berücksichtigt und sind in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Vorarbeiten und durchgeführten Interviews zeigen, dass die ökonomischen Einflussfaktoren und ein unsicherer und komplexer Regulierungsrahmen insbesondere dann eine Rolle spielen, wenn Investitionen zur Hebung des Flexibilitätspotenzials notwendig sind.

³⁰ Navigant, IER, FfE, BBG und Partner: Identifikation neuer Anforderungen aus zukünftigem Strommarktdesign – Flexibilität und Eigenerzeugung. Projekt Energiewende in der Industrie. Bericht an das BMWK (2020).

³¹ dena-NETZFLEXSTUDIE: Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung (2017).

³² Wuppertal Institut: Hemmnisanalyse zu Änderungen des Nutzerverhaltens und Optimierung der Organisationsprozesse zur Schaffung von Flexibilität in gewerblich und industriell genutzten Gebäuden (2019).

³³ Sauer, A. / Abele, E. / Buhl, H.U.: Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie, 2020).

³⁴ Munzel, B. / Reiser, M. / Steinbacher, K.: Flexibilitätspotenziale und Sektorkopplung. Synthesebericht 1 des SINTEG Förderprogramms. Studie im Auftrag des BMWK (2022).

³⁵ BDI: Verlängerung der Verordnung Abschaltbare Lasten (2022).

Abbildung 12

Einflussfaktoren auf die Bereitstellung industrieller Flexibilität



Quelle: Eigene Darstellung (FFE).

6 Handlungsempfehlungen

Flexibilität stärker im regulatorischen Rahmen abbilden

Basierend auf den identifizierten Rahmenbedingungen im vorangehenden Kapitel werden in diesem Kapitel **Handlungsempfehlungen bzw. –optionen** diskutiert. Diese stützen sich auf den Erkenntnissen aus Forschungsprojekten und Studien zu industrieller Flexibilität sowie den im Rahmen der Studie durchgeführten Interviews mit Industriebetrieben.

Die Handlungsempfehlungen sind gruppiert in:
Abbau von Fehlanreizen in der Netzentgeltssystematik,
Absenkung von Zugangsbarrieren,
Auflösung negativer Wechselwirkungen mit regulatorischen Vorgaben,
Weiterentwicklung industrieller Flexibilitätsoptionen und Umfang der Nutzung.

In Tabelle 4 werden die Handlungsempfehlungen erläutert und bewertet. Die Bewertung erfolgt qualitativ und im Vergleich zu anderen Maßnahmen aus Sicht des Industrieunternehmens. Bewertet werden zwei Kriterien:

- Die **Effektivität einer Maßnahme** bezüglich des Abbaus von Hemmnissen: Bewertet wird dafür, inwieweit durch die Umsetzung der Handlungsempfehlung die Erschließung einer höheren Menge an Flexibilitätspotenzial angereizt werden könnte. Die Effektivität wird bewertet in niedrig, mittel und hoch.
- Der **Umsetzungsaufwand**: Bewertet wird dafür die regulatorische Umsetzbarkeit, also ob die Handlungsempfehlungen eine grundlegende Reform bedeuten würde oder vergleichsweise wenig Anpassung bedürfte³⁶. Daneben wird in der Bewertung die Frage der politischen Umsetzbarkeit berücksichtigt. Gegebenenfalls gibt es Interessen einzelner Akteursgruppen, die die Umsetzung einer Handlungsempfehlung in der Praxis erschweren. Der Umsetzungsaufwand wird bewertet in niedrig, mittel und hoch.

Für jede Handlungsempfehlung wird daneben noch angegeben, für welche **Unternehmenskategorie** diese relevant ist. Unterschieden werden die folgenden Kategorien:



Energieintensive Industrie



Nicht-energieintensive Industrie



Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Hemmnisse können zwar auch branchen- oder sogar unternehmensspezifisch sein, aber die maßgeblichen Unterschiede ergeben sich aus Unternehmensgröße und Energieintensität. Letzteres ist nicht zuletzt eine Folge der besonderen regulatorischen Rahmenbedingungen für energieintensive Industrie.

³⁶ Im Rahmen der Studie wurde keine fundierte rechtliche Prüfung der Handlungsempfehlungen durchgeführt.

Tabelle 4
Übersicht und Bewertung der Handlungsempfehlungen

| Handlungsempfehlung | Erläuterung | Bewertung | Relevant für |
|---|--|---|---|
| Abbau von Fehlanreizen in der Netzentgeltsystematik | | | |
| Flexibilitätsvermarktung bei Bestimmung der individuellen Netzentgelten berücksichtigen | Industrielle Großverbraucher können von reduzierten Netzentgelten nach § 19 Abs. 2 Satz 2 StromNEV (besonders stromintensive Unternehmen) oder nach § 19 Abs. 2 Satz 1 StromNEV (bei atypischer Netznutzung) profitieren. Nehmen Unternehmen an Spot- oder Regelreservemärkten teil, kann sich der Leistungsbezug, der zur ursprünglichen Bestimmung der Netzentgelte herangezogen wurde, verändern. Dadurch könnten Unternehmen die Privilegierungen nach § 19 Abs. 2 StromNEV verlieren ^{37,38} . Für viele Unternehmen ist dies ein Grund, auf Flexibilisierungsmaßnahmen zu verzichten. Im Rahmen der Energiekrise hat die Bundesnetzagentur Sonderregelungen geschaffen, um die Flexibilitätsvermarktung bei der Bestimmung der individuelle Netzentgelte in gewissem Maße zu berücksichtigen. Die Regelung ist allerdings bis 31.12.2025 befristet. | Tatsächlich flexibilisieren einzelne Industriebetriebe ihre Prozesse, um genau die Vorgaben der individuellen Netzentgelte zu erfüllen. Eine weitergehende Vermarktung der Flexibilität bspw. am Spotmarkt oder an den Regelreservemärkten findet dann jedoch nicht statt. Die Ausgestaltung der Netzentgelte ist daher ein zentrales Hemmnis. Eine Weiterführung und Ausweitung der bereits geschaffenen Regelungen wäre mit wenig Umsetzungsaufwand verbunden. Allerdings könnte dies mit der angestrebten Neugestaltung der Industriernetzentgelte durch die Bundesnetzagentur (siehe nächste Handlungsempfehlung) hinfällig sein. Effektivität: hoch; Umsetzungsaufwand: niedrig |  |

³⁷ Navigant, IER, FfE, BBG und Partner: Identifikation neuer Anforderungen aus zukünftigem Strommarktdesign – Flexibilität und Eigenerzeugung. Projekt Energiewende in der Industrie. Bericht an das BMWK (2020).

³⁸ Kopernikus Projekt SynErgie: Positionspapier zu regulatorischen Änderungen. Projekt gefördert vom BMBF (2021).

| Handlungsempfehlung | Erläuterung | Bewertung | Relevant für |
|---|---|---|---|
| Grundsätzliche Reform der Entgeltkomponenten zum Anreizen von netzdienlicher Flexibilität | Während die vorherige Handlungsempfehlung eine grundsätzliche Problematik mit weiteren Sonderregelungen zu lösen versucht, könnte auch eine grundlegende Reform der Netzentgelte oder zumindest der Sondernetzentgelte nach § 19 Abs. 2 StromNEV Abhilfe schaffen ³⁹ . Diesen Weg geht nun auch die Bundesnetzagentur und konsultiert derzeit ein Eckpunktepapier zur Reform der Industrienetzentgelte nach § 19 Abs. 2 StromNEV. Dabei hat die Bundesnetzagentur bereits angekündigt, auch die allgemeine Netzentgeltsystematik einer Prüfung zu unterziehen. Aus dem vorgelegten Eckpunktepapier geht hervor, dass die Entwicklung der Börsenpreise und die individuelle Laständerung in Zeiten besonders hoher bzw. niedrigere Preise bei der Bestimmung der Industrienetzentgelte berücksichtigt werden sollen. Ebenso sollen Ausnahmeregionen definiert werden, um die Auswirkungen auf das Netz zu berücksichtigen ⁴⁰ . | Der grundsätzliche Ansatz verspricht einen großen Hebel zur Erschließung von Flexibilitätspotenzial in der Industrie. Die Umsetzung wird jedoch zunächst zu Aufwand führen auf Seiten der Netzbetreiber (durch die neuen Prozesse zur Bestimmung und Erhebung der Netzentgelte) und vor allem auf Seiten der betroffenen Industrieunternehmen, da sich die Kostenstruktur für den Energieverbrauch fundamental verändern wird. Gleichzeitig bedeutet die Neugestaltung auch eine Chance für die Betriebe, um Flexibilisierungsmaßnahmen neu zu bewerten. Effektivität: hoch; Umsetzungsaufwand: hoch |  |

³⁹ Agora Energiewende: Zukünftige Anforderungen an eine energiewendegerechte Netzkostenallokation (2021).

⁴⁰ Bundesnetzagentur: Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich (2024).

Handlungsempfehlungen

| Handlungsempfehlung | Erläuterung | Bewertung | Relevant für |
|--|---|--|---|
| Regionale Unterschiede bei Verteilnetzentgelten angleichen | Auf den unteren Spannungsebenen sind die Netzentgelte nach Verteilnetzgebieten differenziert. Die Höhe der Netzentgelte bestimmt sich dabei derzeit hauptsächlich durch den Ausbau der erneuerbaren Energien. Dadurch werden Standortentscheidungen für Neuinvestitionen verzerrt und es besteht ein gegenteiliger Anreiz für Investitionen in Gebieten mit hoher Einspeisung durch erneuerbare Energien. Die Bundesnetzagentur konsultiert derzeit ein Eckpunktepapier für einen Wälzungsmechanismus. Eine Festlegung soll in Q3 2024 erfolgen ⁴¹ . | Die Maßnahme hat beachtliche Umverteilungswirkungen, könnte aber insbesondere Unternehmen in Bayern zugutekommen, die in Regionen mit hoher Dichte an Photovoltaik-Anlagen angesiedelt sind oder dies planen. Effektivität: mittel; Umsetzungsaufwand: mittel |  |

Absenkung von Zugangsbarrieren

| | | | |
|--|---|--|---|
| Diskriminierungsfreier Zugang zu bestehenden Flexibilitätsmärkten und -mechanismen | Die Ausgestaltung von Produkten auf Spot- und Systemdienstleistungsmärkten sollte regelmäßig in Bezug auf Hemmnisse für die Lastseite überprüft werden (u.a. Mindestmengen, Zeitscheiben, Vorlaufzeiten) ^{42,43} . Bestehende Instrumente für die Lastseite zur Netzengpassbewirtschaftung (§ 13 Abs. 6a EnWG; § 13k EnWG) sollten technologieoffen ausgestaltet werden. | Die Maßnahme führt zu mehr Wettbewerb auf Flexibilitätsmärkten und kann den Umsetzungsaufwand für eine Flexibilisierung von Unternehmen mindern. Unter Nutzung von Aggregatoren ist eine Erfüllung der Anforderungen, wenn Instrumente nicht nur auf spezifische Technologien oder Anwendungsfälle zugeschnitten sind, allerdings bereits heute möglich. Effektivität: niedrig; Umsetzungsaufwand: mittel |  |
|--|---|--|---|

⁴¹ Bundesnetzagentur: Eckpunktepapier: Festlegung zur sachgerechten Verteilung von Mehrkosten aus der Integration von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (2023).

⁴² dena-NETZFLEXSTUDIE: Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung (2017).

⁴³ Kopernikus-Projekt SynErgie: Positionspapier zu regulatorischen Änderungen. Projekt gefördert vom BMBF (2021).

| Handlungsempfehlung | Erläuterung | Bewertung | Relevant für |
|---|---|--|---|
| Weiterentwicklung von Instrumenten zur netzdienlichen Flexibilitätsbereitstellung | Während es auf Übertragungsebene, Hochspannungs- und Niederspannungsebene bereits ausgewählte Instrumente zur netzdienlichen Flexibilitätsbereitstellung gibt, fehlen entsprechende Instrumente auf Mittelspannungsebene. Daher sollten lokale Mechanismen bzw. Signalen zur netzdienlichen Erschließung industrieller Flexibilität auf der Mittelspannungsebene ausgestaltet werden. | Marktbasierte Mechanismen zur netzdienlichen Flexibilitätsbereitstellung sind komplex in ihrer regulatorischen Umsetzung. Sie würden für Gewerbe und Handel eine zusätzliche Vermarktungsoption schaffen, allerdings nur im begrenzten Maße. Effektivität: niedrig; Umsetzungsaufwand: mittel |  |
| Auflösung negativer Wechselwirkung mit weiteren regulatorischen Vorgaben | | | |
| Wechselwirkungen zwischen Effizienzvorgaben und Flexibilität adressieren | Das Prinzip „efficiency first“ darf nicht dazu führen, dass Flexibilitätpotenziale nicht gehoben werden. Aus Systemsicht sind sowohl Effizienz als auch Flexibilität essenzielle Beiträge von Unternehmen für das klimaneutrale Energiesystem. Dazu gehört beispielsweise die Berücksichtigung von Flexibilität in den ISO-Normen ⁴⁴ . | Eine Berücksichtigung von Flexibilität in Vorschriften wie ISO-Normen kann ohne Wechselwirkungen mit anderen Regelungen durchgeführt werden. Im besten Fall trägt die Berücksichtigung in Vorschriften zur Energieeffizienz auch zur Verbreitung des Themas Flexibilisierung bei. Effektivität: mittel; Umsetzungsaufwand: mittel |  |

⁴⁴ Kopernikus-Projekt SynErgie: Positionspapier zu regulatorischen Änderungen. Projekt gefördert vom BMBF (2021). In: <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/09/SynErgie-Positionspapier-Regulatorische-Rahmenbedingungen.pdf> (Abruf am 21.08.2024)

| Handlungsempfehlung | Erläuterung | Bewertung | Relevant für |
|---|--|--|---|
| Reform des Systems von Abgaben, Umlagen und Steuern zur Stärkung des Strompreissignals und von Investitionsentscheidungen | Durch staatlich induzierte Preisbestandteile wird das Strompreissignal in gewissem Maße verzerrt. Auch können durch die Belastung des Strompreises Investitionsentscheidungen im Vergleich zwischen den Energieträgern Benzin, Diesel, Gas oder Heizöl verzerrt werden. Vorgeschlagen wurde schon häufiger eine Dynamisierung einzelner Preisbestandteile und eine grundlegende Reform zwischen den Energieträgern zur Stärkung von Sektorkopplungstechnologien ⁴⁵ . | Durch das Wegfallen der EEG-Umlage ist bereits ein entscheidendes Hemmnis weggefallen. Für das produzierende Gewerbe wurde zusätzlich die Stromsteuer seit 2024 abgesenkt. Insgesamt machen Abgaben, Umlagen und Steuern 2024 ca. 10 Prozent des Strompreises für kleine und mittlere Unternehmen aus ⁴⁶ . Dagegen sind durch einen steigenden CO ₂ -Preis die Steuern für die Energieträger Gas und Öl bereits angestiegen. Mit weiter steigenden CO ₂ -Preisen könnte sich die Belastung mit der Zeit ohnehin umkehren. Effektivität: niedrig; Umsetzungsaufwand: hoch |  |
| Bessere Nutzung vorhandener Netzanschlusskapazität | Derzeit wird die Netzanschlusskapazität zwischen Anlagenbetreiber und Anschlussnehmer individuell vereinbart und statisch festgelegt. Käme es durch die Bereitstellung von Flexibilität auf Regelreservemärkten oder für netzdienliche Zwecke zu einem Überschreiten der vereinbarten Jahreshöchstlast, könnte es zu einer kostenpflichtigen Erhöhung der Netzanschlusskapazität kommen. Es könnten entweder Ausnahmeregelungen geschaffen werden oder die Anschlusskapazität nach der technisch maximalen Übertragungskapazität festgelegt werden ⁴⁴ . | Die bessere Nutzung der Netzanschlusskapazität wird vermutlich nicht der größte Hebel zur Flexibilitätsbereitstellung sein. Dennoch sollten Lösungen dort gefunden werden, wo sich Herausforderungen ergeben. Effektivität: niedrig; Umsetzungsaufwand: niedrig |  |

⁴⁵ Ausfelder, F. et al: „Sektorkopplung“ - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).

⁴⁶ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft: BDEW-Strompreisanalyse Juli 2024.

| Handlungsempfehlung | Erläuterung | Bewertung | Relevant für |
|--|---|--|---|
| Weiterentwicklung industrieller Flexibilitätsoptionen und Umfang der Nutzung | | | |
| Forschung und Entwicklung in Bezug auf das technische Potenzial bestimmter Prozesse | Gerade in der energieintensiven Industrie gibt es viele Unternehmen, die bereits ihre Prozesse flexibilisiert haben. Es wird auch hier künftig neue Prozesse oder Verfahrensschritte geben, die auf ihr Flexibilisierungspotenzial untersucht werden müssen. Wenig Erfahrung mit Flexibilisierung gibt es bei der nicht-energieintensiven Industrie. Der Fokus sollte hier zunächst auf den Anwendungen liegen, die im größeren Umfang bei mehreren Unternehmen oder ggf. Wirtschaftszweigen vorliegen. | Das Wissen, inwiefern Prozesse flexibilisierbar sind, ohne dass die Produktqualität leidet, ist die Grundlage für Flexibilitätsbereitstellung; in einzelnen Branchen ist der Forschungs- und Entwicklungsbedarf noch sehr hoch und besonders für kleine und mittlere Unternehmen schwer zu stemmen. Effektivität: hoch; Umsetzungsaufwand: mittel |  |
| Forschung und Entwicklung zur standardisierten Erschließung von Flexibilitätspotenzialen | Gerade nicht-energieintensive Industrie und Gewerbe, Handel und Dienstleistungen sind sehr heterogen und die Potenziale pro Betrieb ggf. gering. Das Heben von Flexibilitätspotenzialen sollte somit möglichst unternehmens- und wirtschaftszweigübergreifend erfolgen. | Entwicklung branchenübergreifender Lösungen kann eigentlich nur durch Dienstleister, Aggregatoren, Forschungsprojekte oder/und Verbände umgesetzt werden. Effektivität: hoch; Umsetzungsaufwand: hoch |  |
| Bilden von Netzwerken zum fachlichen Austausch | Im Bereich Energieeffizienz gibt es bereits eine Reihe von Austauschformaten innerhalb von bestimmten Branchen oder auch branchenübergreifend. Mit Vorschreiten der Energiewende wären solche Austauschformate auch in Bezug auf das Thema Flexibilität hilfreich, so dass Unternehmen mit Vorreiterrolle ihre Erfahrungen teilen können. Ein entsprechendes Netzwerk könnte auf Landes- oder Bundesebene von Instituten oder Verbänden angestoßen werden. | In vielen anderen Bereichen hat sich gezeigt, dass das Lernen voneinander nachweislich Umsetzungsaufwand spart und Motivation schafft, auch wenn die eigentlich Umsetzungsmaßnahme natürlich in jedem Unternehmen selbst erfolgen muss. Effektivität: mittel; Umsetzungsaufwand: mittel |  |

Literaturverzeichnis

AGEB Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2023 (2024)

Kigle, S. / Guminski, A. et al. (2023):

Bayernplan Energie 2040 – Wege zur Treibhausgasneutralität – Abschlussbericht im Auftrag der: VBEW Dienstleistungsgesellschaft mbH. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE).

Guminski, A. / Fiedler, C. / Kigle, S. et al. (2021):

eXtremOS Summary Report - Modeling Kit and Scenarios for Pathways Towards a Climate Neutral Europe. Munich: Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE).

Kigle, S. / Ebner, M./ Guminski, A. (2022):

Greenhouse Gas Abatement in EUROPE—A Scenario-Based, Bottom-Up Analysis Showing the Effect of Deep Emission Mitigation on the European Energy System. In: Energies 15, 1334. Basel: MDPI.

ENTSO-G und ENTSO-E (2022):

Ten Year Network Development Plan (TYNDP) 2022 Scenario Report.

Netzentwicklungsplan 2035, Version 2021 (2022):

Bestätigung des NEP 2035. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.

Netzentwicklungsplan (2022):

Genehmigung des Szenariorahmens 2023 – 2037/. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen.

Sauer, A./ Abele, E./ Buhl, H. (2019):

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.

Ausfelder, F. / Seitz, A. / von Roon, S. (2018):

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).

Gruber, A. (2017):

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).

Jetter, F. / Veitengruber, F. / Schmid, T. et al. (2021):

Regionale Lastmanagementpotenziale - Quantifizierung bestehender und zukünftiger Lastmanagementpotenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft und Guidehouse Germany. In: https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2022/01/Regionale_Lastmanagementpotenziale_DE2.pdf (Abruf am 21.08.2024)

Bivalenter Tiegelofen – SynErgie (2024):

In: <https://synergie-projekt.de/ergebnis/bivalenter-tiegelofen> (Abruf am 21.08.2024)

Literaturverzeichnis

Schlemme, J. / Bons, M. (2019):

Flexibilitätssteckbrief der Eisen- und Stahlindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-flexibilitaetssteckbrief-stahl.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Abruf am 21.08.2024)

Hübner, T. / Guminski, A. / Rouyre, E. / von Roon, R. (2019):

Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-metall.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Abruf am 21.08.2024)

Hübner, T. / Guminski, A. / Rouyre, E. / von Roon, R. (2019):

Flexibilitätssteckbrief der Zementindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-flexibilitaetssteckbrief-zement.pdf?__blob=publicationFile&v=8 (Abruf am 21.08.2024)

Leisin, M. (2019):

Flexibilitätssteckbrief der Glasindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-flexibilitaetssteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Abruf am 21.08.2024)

Fichter, T. / Creutzburg, P. (2019):

Flexibilitätssteckbrief der Grundstoffchemie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-flexibilitaetssteckbrief-chemie.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Abruf am 21.08.2024)

Godin, H. (2019):

Flexibilitätssteckbrief der Papierindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-flexibilitaetssteckbrief-papier.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Abruf am 21.08.2024)

Creutzburg, P. / Bons, M. (2019):

Flexibilitätssteckbrief der Nahrungsmittelindustrie. Energiewende in der Industrie – Potentiale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor. Bericht ans BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-flexibilitaetssteckbrief-nahrung.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Abruf am 22.08.2024)

Ffe (2021):

Anforderungsprofile für Flexibilität. In: <https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/12/Anforderungsprofile-fuer-Flexibilitaet1.pdf> (Abruf am 21.08.2024)

ENERKO (o. A.):

Flexible Strom- und Wärmeerzeugung - Die drei Leitfragen für die Vermarktung flexibler Erzeugungsanlagen. In: <https://enerko.de/themenspecial/flexible-strom-und-waermeerzeugung/> (Abruf am 21.08.2024)

EPEX SPOT (2024):

Trading Products. In: <https://www.epexspot.com/en/tradingproducts> (Abruf am 21.08.2024)

Regelleistung.net (2024):

Bestätigung Starttermin zur Einführung der FSV SEAL. In: <https://www.regelleistung.net/de-de/News/Detail/14522/bestaetigung-starttermin-zur-einfuehrung-der-fsv-seal> (Abruf am 21.08.2024)

Vollmuth, P. / Ganz, K. / Kern, T. (2023):

Smart e-mobility: user potential in Germany today and in the future. In: Tagungsband NEIS 2023 – Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems. Hamburg: VDE.

Guidehouse Germany und Öko-Institut (2023):

Überblick zu nachfrageseitigen Flexibilitätsoptionen und Speichern sowie Flexibilitätshemmnissen. Wissenschaftliches Inputpapier für die AG 2 der PKNS.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/inputpapier-flex-ag2-26042023.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Abruf am 21.08.2024)

Veitengruber, F. / Kigle, S. / Strobel, Q. / Helmer, N. (2023):

Volkswirtschaftlicher Nutzen von Flexibilitätspotenzialen in der Industrie. München. In:

<https://www.50hertz.com/de/Unternehmen/Partnerschaften/ScientificAdvisoryProjectBoardSAPB/VolkswirtschaftlicherNutzenvonFlexibilitaetspotenzialeninderIndustrie> (Abruf am 21.08.2024)

Navigant / IER / FfE / BBG und Partner (2020):

Identifikation neuer Anforderungen aus zukünftigem Strommarktdesign – Flexibilität und Eigenerzeugung. Projekt Energiewende in der Industrie. Bericht an das BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2b-executive-summary.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Abruf am 21.08.2024)

Dena (2017):

dena-NETZFLEXSTUDIE: Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung. In: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9191_dena_Netzflexstudie.pdf (Abruf am 21.08.2024)

Wuppertal Institut (2019):

Hemmnisanalyse zu Änderungen des Nutzerverhaltens und Optimierung der Organisationsprozesse zur Schaffung von Flexibilität in gewerblich und industriell genutzten Gebäuden.

In: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7963/file/7963_Hemmnisanalyse.pdf (Abruf am 21.08.2024)

Sauer, A. / Abele, E. / Buhl, H. U. (2020):

Energieflexibilität in der deutschen Industrie. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung (SynErgie). In: https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/08/urn_nbn_de_0011-n-5659211.pdf (Abruf am 22.08.2024)

Munzel, B. / Reiser, M. / Steinbacher, K. (2022):

Flexibilitätspotenziale und Sektorkopplung. Synthesebericht 1 des SINTEG Förderprogramms. Studie im Auftrag des BMWK.

In: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Sinteg/synthesebericht-1-flexibilitatspotenziale-und-sektorkopplung.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (Abruf am 21.08.2024)

BDI (2022):

Verlängerung der Verordnung Abschaltbare Lasten. In: <https://bdi.eu/publikation/news/verlaengerung-der-verordnung-abschaltbare-lasten/> (Abruf am 21.08.2024)

Kopernikus-Projekt SynErgie (2021):

Positionspapier zu regulatorischen Änderungen. Projekt gefördert vom BMBF. In: <https://synergie-projekt.de/wp-content/uploads/2020/09/SynErgie-Positionspapier-Regulatorische-Rahmenbedingungen.pdf> (Abruf am 21.08.2024)

Agora Energiewende (2021):

Zukünftige Anforderungen an eine energiewendegerechte Netzkostenallokation.

In: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_07_IND_FlexNetz/A-EW_224_Netzkostenallokation_WEB.pdf (Abruf am 21.08.2024)

Bundesnetzagentur (2024):

Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich. In: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Beschlusskammern/1_GZ/BK4-GZ/2024/BK4-24-0027/BK4-24-0027_Eckpunktepapier_24072024.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Abruf am 21.08.2024)

Bundesnetzagentur (2023):

Eckpunktepapier: Festlegung zur sachgerechten Verteilung von Mehrkosten aus der Integration von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien.

In: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Aktuelles_enwg/VerteilungNetzkosten/eckpunktepapier_verteilungnetzkosten.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Abruf am 21.08.2024)

Ausfelder, F. / Drake, F.-D. / Erlach, B. / Fishedick, M. / Henning, H.-M. / Kost, C. et al. (2017):

„Sektorkopplung“ - Untersuchungen und Überlegungen zur Entwicklung eines integrierten Energiesystems (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). In: <https://www.acatech.de/publikation/sektorkopplung-untersuchungen-und-ueberlegungen-zur-entwicklung-eines-integrierten-energiesystems/download-pdf?lang=de> (Abruf am 21.08.2024)

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (2024):

BDEW-Strompreisanalyse Juli 2024. In: <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/> (Abruf am 21.08.2024)

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--------------|--|
| Abbildung 1 | Übersicht über den Bilanzraum des Energiesystemmodells ISAaR |
| Abbildung 2 | Strombilanz (in TWh) für Bayern im Szenario „E.plan“ aus dem Bayernplan Energie 2040 für das Basisjahr 2019 und die modellierten Jahre bis 2040 |
| Abbildung 3 | Installierte Leistung an elektrischen Flexibilitäten im bayerischen Energiesystem in GW bis zum Jahr 2040 |
| Abbildung 4 | Begrifflichkeiten der verschiedenen Arten von Flexibilität |
| Abbildung 5 | Eingrenzung des Flexibilitätspotenzial-Begriffes |
| Abbildung 6 | Darstellung der Vermarktungsmöglichkeiten im Zeitverlauf |
| Abbildung 7 | Marktvolumen heute und (beispielhafte) Entwicklung der Preise und Preisspreads zur Einordnung |
| Abbildung 8 | Einordnung und Vergleich der Vermarktungsmöglichkeiten verschiedener Flexibilitätsoptionen |
| Abbildung 9 | Erschlossenes Flexibilitätspotenzial im Szenario in Deutschland in GW, das für Lastreduktion (links) und Lasterhöhung (rechts) zur Verfügung steht |
| Abbildung 10 | Erschlossenes Flexibilitätspotenzial im Szenario in Bayern in GW, das für Lastreduktion (links) und Lasterhöhung (rechts) zur Verfügung steht |
| Abbildung 11 | Regionale Verteilung der industriellen Flexibilitätspotenziale für Lastreduktion in Bayern für die Jahre 2030 und 2040 |
| Abbildung 12 | Einflussfaktoren auf die Bereitstellung industrieller Flexibilität |

Tabellenverzeichnis

| | |
|-----------|---|
| Tabelle 1 | Flexibilisierbare Anlagen bei den branchenspezifischen Industrieprozessen |
| Tabelle 2 | Flexibilisierbare Anlagen bei branchenunspezifischen Querschnittstechnologien |
| Tabelle 3 | Flexibilisierbare Querschnittstechnologien in industriespezifischen Prozessen |
| Tabelle 4 | Übersicht und Bewertung der Handlungsempfehlungen |

Ansprechpartner/Impressum

Dr. Markus Fisch

Abteilung Wirtschaftspolitik

Telefon 089-551 78-246
markus.fisch@vbw-bayern.de

Impressum

Alle Angaben dieser Publikation beziehen sich ohne jede Diskriminierungsabsicht grundsätzlich auf alle Geschlechter.

Herausgeber

vbw
Vereinigung der Bayerischen
Wirtschaft e. V.

Max-Joseph-Straße 5
80333 München

www.vbw-bayern.de

© vbw Oktober 2024

Weiterer Beteiligter

Nadja Helmer
Nele Maas
Hannes Kracht
Quirin Strobel
Dr.-Ing. Andrej Guminski

FfE
Forschungsgesellschaft für
Energiewirtschaft mbH