

Industrielles Flexibilitätspotenzial zur Bereitstellung von Redispatch

Matthias TRANINGER¹, Sophie KNÖTTNER²

Austrian Institute of Technology (AIT), Center for Energy
Giefinggasse 4, 1210 Wien

Kurzfassung:

Folgende Trends der letzten Jahre führen zu neuen Herausforderungen im Engpassmanagement: Die Bereitstellung von Maßnahmen zum Engpassmanagement erfolgt überwiegend aus kalorischen Kraftwerken, die mit Stilllegungen konfrontiert sind, während die Erzeugung aus fluktuierenden Erneuerbaren zunimmt. Im Allgemeinen lässt sich eine langfristige Zunahme des Bedarfs an Engpassmanagementmaßnahmen beobachten. Der produzierenden Industrie wird Potenzial in der zukünftigen Bereitstellung von Flexibilität u.a. für Engpassmanagement zugesprochen. Verbesserungspotenzial wird auch durch die geografische Verteilung der Standorte erhofft.

In dieser Arbeit wird mit einer kombinierten Top-down-Bottom-up-Methode positives und negatives Flexibilitätspotenzial in der Industrie, dessen Einsatz zur Bereitstellung von Redispatch geeignet ist, ermittelt. Ressourcen, um diese Flexibilität bereitzustellen sind dabei spezielle industrielle Prozesse mit hoher elektrischer Anschlussleistung sowie sektorübergreifende Technologien. Dazu gehören Energieversorgung (elektrisch und thermisch), aber auch Prozesskältebereitstellung und Beleuchtung.

Für Österreich wurden die größten Potenziale für die Bundesländer Oberösterreich (bis zu 105 MW), Steiermark (bis zu 68 MW) sowie Niederösterreich (bis zu 75 MW), exkl. Eigenerzeugung, ermittelt. Die Verteilung auf Industriesektoren, exkl. Potenziale in Eigenerzeugung, zeigte das größte Potenzial für die Sektoren Papier und Druck (bis zu 70 MW), Chemie und Petrochemie (bis zu 103 MW) sowie Steine, Erden, Glas (bis zu 60 MW). Für industrielle elektrische Eigenerzeugungsanlagen wurde das Flexibilitätspotenzial mit bis zu 110 MW abgeschätzt.

Keywords: Industrielle Energieversorgung, Energieflexibilität, Redispatch, Dekarbonisierung

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahren nahm der Bedarf an Flexibilität in den Stromversorgungssystemen stetig zu. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung ergeben sich mögliche neue Geschäftsfelder, die Vorteile sowohl für Stromnetzbetreiber als auch Industrieunternehmen bieten. Die steigende Nachfrage nach Flexibilitäten führt dazu, dass Unternehmen einen Anreiz erhalten ihre industriellen Flexibilitäten wirtschaftlich zu monetarisieren, indem etwa der Verbrauch an Preise am Spot-Markt angepasst wird

¹Jungautor, +43 664 88964925, matthias.traninger@ait.ac.at

²Jungautorin, +43 664 88904337, sophie.knoettner@ait.ac.at

(proaktive Lastanpassung), netzdienliche Services angeboten werden oder am Engpassmanagement (Redispatch) teilgenommen wird.

Mit dem Fokus auf Engpassmanagement und Redispatch im österreichischen Stromübertragungsnetz kann folgende (allgemeine) Entwicklung beobachtet werden: Die Häufigkeit der erforderlichen Maßnahmen für Engpassmanagement nahm in den letzten Jahren, getrieben durch einen wachsenden Anteil fluktuierender, erneuerbarer Strombereitstellung, zu [1].

Bisher wurden Maßnahmen zum Engpassmanagement üblicherweise von regelbaren Energieerzeugungsanlagen im österreichischen Stromnetz, etwa aus Laufwasser-, Pumpspeicher- und konventionellen kalorischen Kraftwerken, erbracht [2]. Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrzehnts werden jedoch aufgrund umfassender Bestrebungen zur Dekarbonisierung der Energieversorgung nicht nur laufend konventionelle, fossil befeuerte Kraftwerke außer Betrieb genommen, sondern auch keine neuen Anlagen in Betrieb genommen (vgl. Trend in [3]). Daraus folgend ergibt sich ein steigender Bedarf an flexibilisierbaren Anlagen, die zukünftig für Maßnahmen zum Engpassmanagement und Redispatch verwendet werden können.

Verbesserungspotenziale gegenüber aktuell durchgeführten Engpassmanagementmaßnahmen werden unter anderem in der geografischen Verteilung der Standorte erhofft, deren dezentrale Lage in Zukunft auch bei Engpässen im Verteilnetz genutzt werden könnte. Weiters bietet die Erschließung von industriellen Kapazitäten den Vorteil, dass damit Flexibilität in Form von Lastverschiebung, -reduktion oder -erhöhung bei gleichzeitiger Emissionsreduktion bereitgestellt werden kann.

1.2 Flexibilität in der Industrie

Flexibilität im Zusammenhang mit Energiesystemen im Allgemeinen und im Speziellen für Stromnetze und produzierende Industrieunternehmen wird seit Jahrzehnten in der Literatur diskutiert. Aus der Perspektive des Stromsystems wird Flexibilität oft als Erfolgsfaktor zur Dekarbonisierung der Stromerzeugung gehandelt. In der produzierenden Industrie wird Flexibilität mitunter vor allem als Wettbewerbsvorteil, um wirtschaftliches Agieren zu realisieren, gesehen. Abbildung 1 bietet einen kurzen Einblick, welche unterschiedlichen Stichworte im Kontext von „Flexibilität im Energiesystem“ verwendet werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

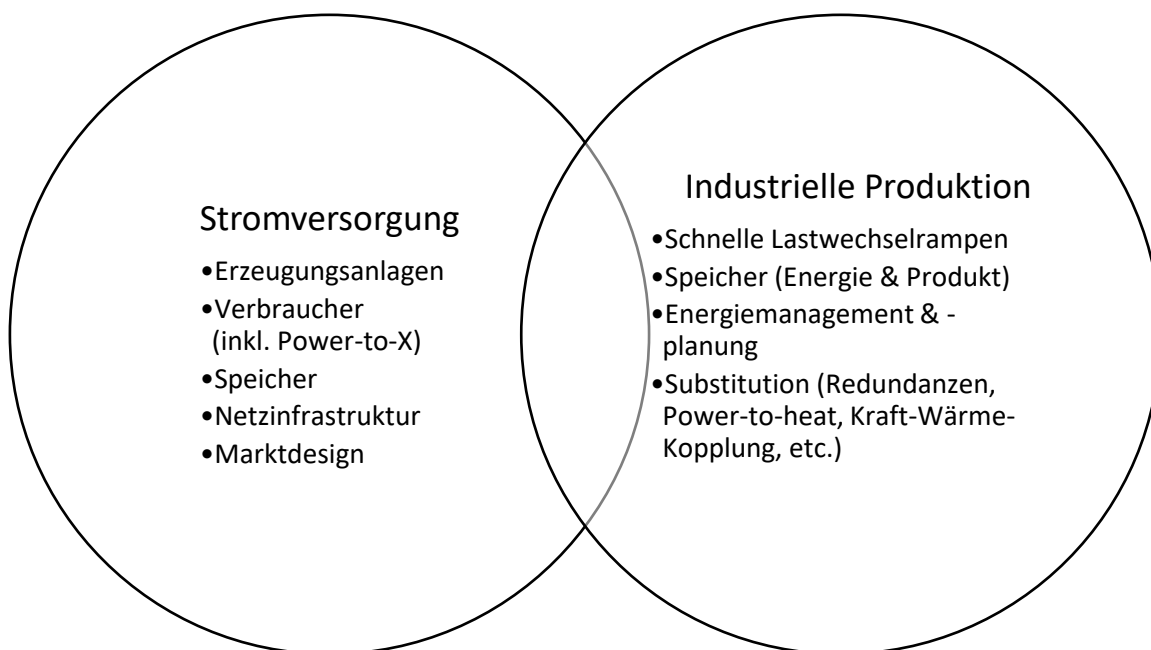


Abbildung 1: Exemplarischer Auszug von Stichwörtern im Kontext von Flexibilität im Energiesystem

Entsprechend wissenschaftlichen Veröffentlichungen lassen sich Flexibilität folgende Eigenschaften und Charakteristiken zuschreiben.

- Verständnis und Interpretation von Flexibilität sind zumeist stark abhängig von der Perspektive. Es existiert bis heute keine einheitliche Begriffsbestimmung für Flexibilität im energiewirtschaftlichen Kontext [4]. Ein gemeinsames Verständnis wird jedoch als Voraussetzung gesehen, Flexibilität bestmöglich zu nutzen [5–7]. Diese Anforderung wird auch durch das Schaffen einer VDI Richtlinie im Themenbereich *Energieflexible Fabrik* [6,7] in den letzten drei Jahren bestärkt.
- Luo et al. [8] bewerten Flexibilität als "relativen Wert". In der Regel ist eine Spezifikation (bspw. eine Einzelanlage oder aber auch ein gesamtes Energieversorgungssystem – die Systemgrenzen können hier unterschiedliche Bereiche umfassen) mehr oder weniger flexibel als eine andere. Im Vergleich zur Flexibilität sind andere Eigenschaften eines Systems, z.B. Kosten, Emissionen oder Primärenergieverbrauch, absolute Größen, die ebenfalls für verschiedene Spezifikationen verglichen werden können, aber auch eine Interpretation ohne Vergleich erlauben.
- Eine weitere Eigenschaft von Flexibilität ist, dass diese in der Regel einem höheren Zweck dient. Mit anderen Worten, es gibt typischerweise Anreize oder Ziele (vgl. [6,8]), um die Flexibilität einer Spezifikation zu erhöhen.
- Golden und Powell [9] definieren Flexibilität als Fähigkeit eines Systems sich anzupassen (engl.: *capability* statt *capacity*) sowie als polymorphe und multi-dimensionale Eigenschaft eines Systems, wodurch eine entsprechende Definition erst durch Kontext und identifizierte Dimension eine klare Bedeutung hat.
- In einem kürzlich veröffentlichten, umfassenden Überblick stellen Degefa et al. [5] verschiedene Definitionen sowie Klassifikationen von Flexibilität vor. Eine Schlussfolgerung dieser Arbeit ist die Relevanz von Taxonomien zur umfassenden Beschreibung von Flexibilität.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Komponenten industrieller Produktionssysteme dazu beitragen können, dass Flexibilität im Stromsystem genutzt werden kann. Dazu tragen sowohl die industrielle Nachfrageseite (stromintensive Prozesse des Kerngeschäfts aber auch Querschnittstechnologien, wie Kältebereitstellung, sowie Power-to-Heat-Anlagen zur Prozesswärmebereitstellung) aber auch Speicher bzw. die Erzeugungsseite durch industrielle Eigenerzeugung (z.B. Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung) bei.

1.3 Einsatz von Flexibilität im Engpassmanagement

Flexibilität von Industrieanlagen, insbesondere von industriellen Eigenerzeugungsanlagen, wird bereits seit einigen Jahren, üblicherweise auf den Spot- oder Regelenenergiemärkten, vermarktet, wobei oft *Flexibility Service Provider* die Schnittstelle zwischen Industrie und Markt bilden. Im Folgenden werden bereits etablierten Vermarktungsstrategien mit einer Einschätzung zu möglichen zukünftigen Rahmenbedingungen für die Bereitstellung von industrieller Flexibilität für Engpassmanagement bzw. Redispatch verglichen.

Zeitliche Komponente: Für Redispatch bzw. Engpassmanagement erfolgt die Auskunft über einen Abruf (=Gebotszuschlag) in der Regel am Abend des Vortages bis max. wenige Stunden vor dem Abruf. Folglich sind für den Industriebetrieb Anfahrzeiten und Rampen planbar. Für den Regelenenergiemarkt erfolgt vorab in der Regel nur ein Zuschlag zur Leistungsvorhaltung. Information über einen tatsächlichen Abruf erfolgt automatisiert (<1 s vor dem Abruf) bzw. bis zu wenigen Minuten vor dem Abruf. Wird Flexibilität genutzt, um am Day-Ahead-Spotmarkt auf fluktuierende Preise reagieren zu können, ist das Bezugsprofil ebenfalls am Vortag für den Industriebetrieb bekannt. Für Handel am Intraday-Markt verkürzt sich diese Spanne bis auf wenige Minuten.

Wirtschaftliche Komponente: Bei einer Vermarktung von Flexibilität am Day-Ahead-Spotmarkt ist für einen Industriebetrieb üblicherweise die Vorhersage von Preisen eine wesentliche Grundlage. Werden Algorithmen zur Planung des Strombezugs eingesetzt, eignen sich beispielsweise mathematische Optimierungsansätze mit der Zielfunktion „minimale Kosten“. Für Redispatch müssen aus aktueller Perspektive Gebote nicht nur eine Leistungsgröße, sondern auch damit verbundene Kosten enthalten, die dann abgegolten werden. Zur Ermittlung der Flexibilität sind somit veränderte Methoden gegenüber einer Flexibilitätsvermarktung am Day-Ahead-Markt erforderlich.

Geographische Komponente: Die geografische Lage einer Erzeugungsanlage relativ zum erwarteten Engpass wirkt sich darauf aus, wie gut die Anlage zur Beseitigung des Engpasses beitragen kann. Im Gegensatz zur Vermarktung von Flexibilität am Regelenenergiemarkt oder an Spotmärkten spielt die Position im Stromnetz innerhalb einer Regelzone somit bei der Vermarktung von Redispatch eine Rolle.

1.4 Fragestellung

Der produzierenden Industrie wird Potential in der Bereitstellung von Flexibilität zugesprochen. Verbesserungspotenziale werden u.a. in der geografischen Verteilung der Standorte erhofft, deren dezentrale Lage bei Engpässen im Verteilnetz genutzt werden kann. Zudem weisen Produktionsprozesse gegenüber konventionellen Kraftwerken das Potenzial auf, Flexibilität, wie Lastverschiebung, -reduktion oder -erhöhung bei gleichzeitiger Emissionsreduktion zu leisten. Ziel dieser Arbeit ist es, das in der produzierenden Industrie zu erwartende technische Flexibilitätspotenzial basierend auf Vorstudien, einer umfassenden Literaturrecherche und zahlreichen Experteneinschätzung abzuschätzen. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Quantifizierung der technischen Potenziale in industriellen Prozessen, Querschnittstechnologien und Eigenerzeugungsanlagen der Industrie, deren zu erwartende Abrufdauern und der geografischen Verteilung der Flexibilität auf die Bundesländer.

2 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen zur Bestimmung von installierten elektrischen Leistungen in der produzierenden Industrie und dem vorhandenen technischen Potenzial beschrieben. Abschnitt 2.1 enthält alle wichtigen Begriffsdefinitionen zum Thema Flexibilität, in Abschnitt 2.2 werden die der Analyse zugrundeliegenden Informationsquellen beschrieben und in Abschnitt 2.3 werden die wichtigsten Schritte der Analyse hin zur gewollten Information skizziert. Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Abschätzungen und der ihnen zugrundeliegenden Annahmen findet sich in den Abschnitten 2.4 bis 2.6.

2.1 Begriffsdefinition

Nicht zuletzt aufgrund verschiedener Sichtweisen auf das Thema Flexibilität, etwa aus Perspektive von Industrieunternehmen oder aus Sicht von Stromversorgern, existiert bis heute keine einheitliche Begriffsbestimmung [4,5]. Um die Herausforderungen der bevorstehenden Energiewende erfolgreich stemmen zu können, müssen alle Interessensvertreter ein gemeinsames Verständnis und eine konsistente Definition der verwendeten Begriffe erarbeiten [5].

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe entsprechend VDI Richtlinie 5207 für die *Energieflexible Fabrik* [6] definiert, voneinander abgegrenzt und näher erläutert.

2.1.1 Definition von Potenzialen gemäß VDI-Richtlinie 5207 für die „Energieflexible Fabrik“

Theoretisches Potenzial: Entspricht der „rechnerischen Größe, die durch die Anschlussleistung aller Formen (Anm.: hier elektrische Anschlussleistung) von Endenergie bestimmt wird.“

Technisches Potenzial: Anteil des theoretischen Potenzials, der „im Rahmen der technologischen Rahmenbedingungen“ variiert werden kann. Darunter sind insbesondere technische Restriktionen der Leistungsaufnahme bzw. -abgabe und verschiedene Zeitintervalle (Abrufdauer, Anstiegsdauer, usw.) zu verstehen.

Praktisches Potenzial: „Teilmenge des technischen Potenzials, worin weiche Faktoren wie regulatorische und administrative Hemmnisse berücksichtigt werden“.

Wirtschaftliches Potenzial: Wirtschaftlich nutzbarer Anteil des technischen Potenzials.

Realisierbares Potenzial: „Schnittmenge aus dem wirtschaftlichen und dem praktischen Potenzial“.

Perspektivisches Potenzial: „Zukünftiges Potenzial, das zwar technisch möglich ist, sich aber noch nicht in einem ausgereiften Bereitschaftszustand befindet.“ Mögliche Gründe sind technische oder regulatorische Hemmnisse.

2.1.2 Strategien zur Lastanpassung gemäß VDI 5207

Lasterhöhung und Lastverzicht: Entspricht einer Erhöhung bzw. Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb, wobei kein Lastnachholbedarf besteht.

Lastverschiebung: Entspricht einer „Erhöhung oder Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb“, bei der Lastnachholbedarf nötig sein kann.

2.1.3 Positive und negative Flexibilität

Positive Flexibilität: Durch verringerte Leistungsaufnahme (industrielle Prozesse) und/oder erhöhte Eigenproduktion von Strom (Eigenerzeugungsanlagen) wird der Leistungsbezug am Netzanschlusspunkt im Vergleich zum Referenzbetrieb verringert.

Negative Flexibilität: Durch erhöhte Leistungsaufnahme (industrielle Prozesse) und/oder verringerte Eigenproduktion von Strom (Eigenerzeugungsanlagen) wird der Leistungsbezug am Netzanschlusspunkt im Vergleich zum Referenzbetrieb erhöht.

Abbildung 2 zeigt beispielhaft, durch welche Aktionen Anlagen im industriellen Kontext negative und positive Flexibilität bereitstellen können.

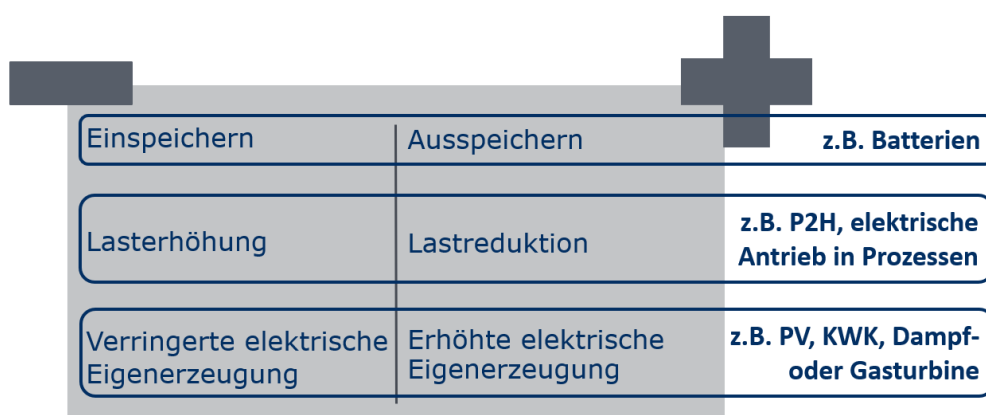


Abbildung 2: Negative und positive Flexibilität bereitgestellt durch verschiedene Anlagen industriellen Kontext.

2.2 Verwendete Quellen

Statistische Datenbanken

- Statistik Austria
Die jährlich veröffentlichte Nutzenergieanalyse (NEA) der Statistik Austria [10] erlaubt einen umfassenden Einblick in den Einsatzzweck aller wichtigen Energieträger in der produzierenden Industrie in Österreich. Der Endenergieverbrauch wird darin in vier relevante Dimensionen aufgliedert. Diese umfassen:
 - o Industrieller Sektor: 13 Sektoren der produzierenden Industrie in Österreich nach ÖNACE 2008 Klassifizierung.
 - o Nutzenergiekategorie: Energieeinsatz für Prozesswärme unter bzw. über 200 °C, Standmotoren, Beleuchtung und EDV, Elektrochemische Zwecke
 - o Energiequelle: Elektrische Energie, Erdgas, Diesel, Kohle, ...
 - o Räumliche Auflösung: Bundesländerebene
- Eurostat
Die Datenpunkte aus der Statistikdatenbank des statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat) [3] ergänzen die Daten der Statistik Austria vor allem hinsichtlich Informationen zur installierten Leistung von Eigenerzeugungsanlagen für Elektrizität in der österreichischen Industrie, dem vorhandenem Technologiemix in diesen Umwandlungsanlagen und der damit jährlich umgewandelten elektrischen Energie.
- EU-ETS
Das *European Union Emissions Trading System* (EU-ETS), dt. Europäisches Emissionshandelssystem, ist das in der EU angewandte Handelsschema für Emissionsberechtigungen, das nach dem „cap and trade“-Prinzip funktioniert. Durch die Herausgabe einer definierten Anzahl von Emissionsberechtigungen wird der zulässige Schadstoffausstoß aller emissionshandlungspflichtigen Anlagen begrenzt („cap“). Emissionsberechtigungen werden dabei entweder von den Mitgliedsstaaten kostenlos zugeteilt oder müssen in Auktionen erworben werden. Die Möglichkeit diese Berechtigungen zu handeln („trade“), setzt einen wirtschaftlichen Anreiz die Emissionen zu senken und dadurch eingesparte Emissionszertifikate zu monetarisieren.
Sowohl die Unternehmen, die dem Emissionshandel unterliegen, als auch die Anzahl der ihnen zugeteilten Emissionsberechtigungen sind im Emissionshandelsregister [11] einsehbar. Damit können Unternehmen mit Emittenten, z.B. Eigenerzeugungsanlagen, identifiziert und deren Anlagenkapazität mit Domänenwissen eingeschätzt werden.

Subsektorlastprofile

Seim et al. leiteten im Forschungsprojekt *DemandRegio* 32 branchenspezifische elektrische Lastprofile für Industrie und Gewerbe mithilfe von multipler Regressionsanalyse ab. Dafür konnte auf über 1100 gemessene Lastgänge aus den einzelnen deutschen Wirtschaftszweigen zurückgegriffen werden.

Literatur

Die in der nachfolgenden Analyse verwendeten Annahmen zur Abschätzung basieren größtenteils auf Vorstudien, wie etwa einer für die Energie-Control Austria durchgeführten Studie zum Flexibilitätspotenzial in Österreich [12] und einer umfangreichen Recherche in facheinschlägiger Literatur. Dazu zählen u.a. Arbeiten im Rahmen des SINTEG Förderprogramms (*Flexibilitätspotenziale und Sektorkopplung. Synthesebericht 1 des SINTEG Förderprogramms* [13]) und die Veröffentlichungen der Forschungsstelle für Energiewirtschaft zur *Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030* [14, 15]. Weitere wichtige Anhaltspunkte für die Analyse umfassen unter anderem Berichte von Branchenverbänden, dem österreichischen Umweltbundesamt, Firmenpräsentationen und Vortragsfolien.

2.3 Allgemeines Vorgehen

Das methodische Vorgehen in der nachfolgenden Analyse des technischen Flexibilitätspotenzials in Österreich produzierender Industrie ist in Abbildung 3 skizziert. In einem ersten Schritt wurde die installierte elektrische Anlagenleistung unter anderem aus statistischen Energieverbrauchsdaten abgeleitet und mit bestehenden Bottom-Up-Abschätzungen abgeglichen und vereint. Durch Zuordnung von flexibilisierbaren Anteilen der ermittelten installierten Leistungen auf Basis von Experteneinschätzungen, Literatur und Rücksprache mit Industrievertretern, wurde das technische Flexibilitätspotenzial ermittelt. In einer nachfolgenden Kategorisierung der Flexibilitäten nach zeitlicher Verfügbarkeit unterschiedlicher Periodizität (untertägig, täglich, saisonal) erfolgt eine weitere Top-Down-Eingrenzung des verfügbaren technischen Potenzials. Eine abschließende Einschätzung des praktischen Flexibilitätspotenzials ist aufgrund von fehlenden Informationen zu innerbetrieblichen Abläufen nur durch Betrachtung auf Unternehmensebene möglich.

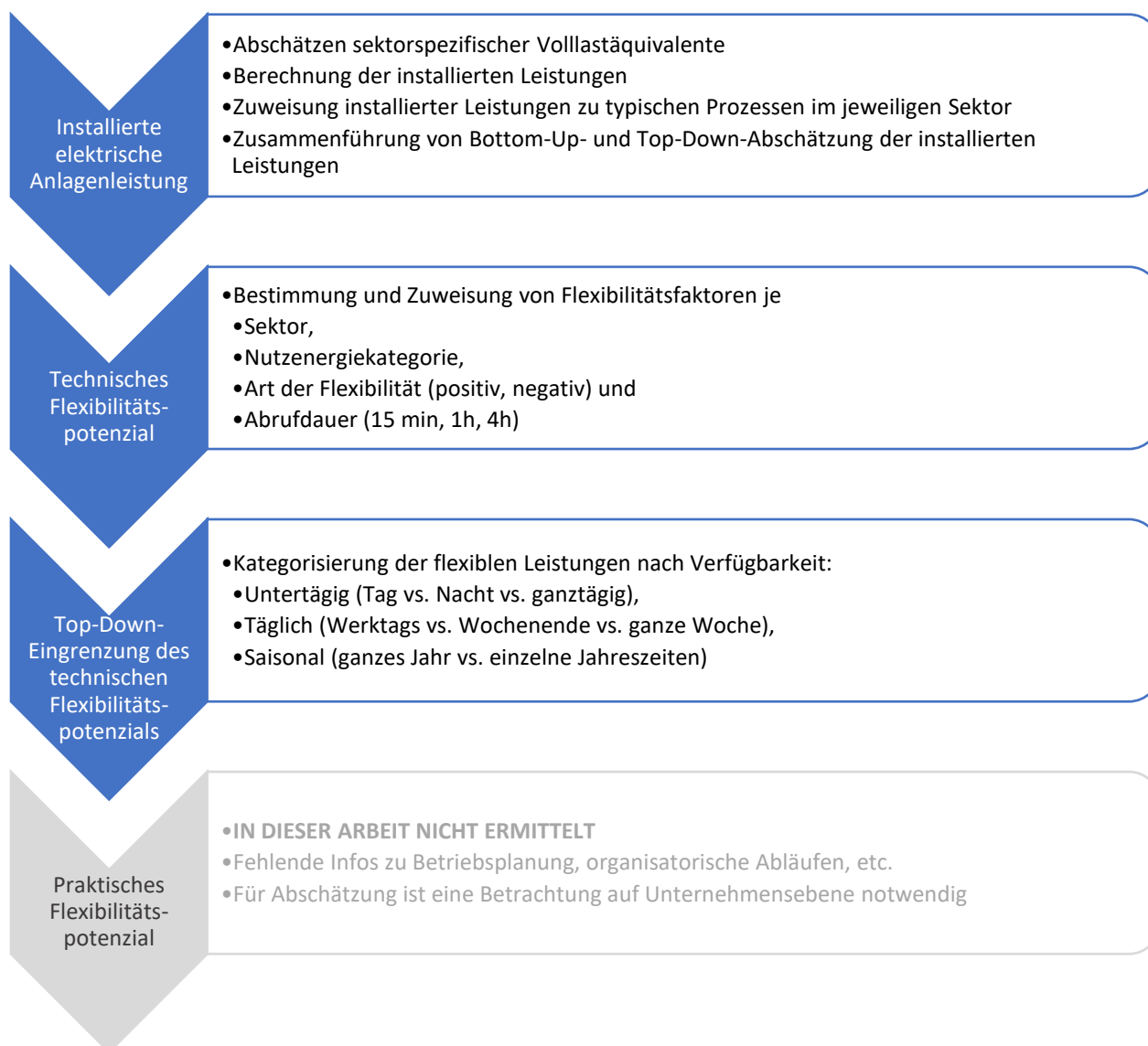


Abbildung 3: Vorgehensweise bei der Abschätzung des technischen Flexibilitätspotenzials der produzierenden Industrie in Österreich. Das praktische Flexibilitätspotenzial kann nur durch weiterführende Detailanalysen auf Unternehmensebene ermittelt werden.

2.4 Abschätzung installierter Anlagenleistungen

2.4.1 Sektorspezifische Volllastäquivalente

Für die nachfolgende Abschätzung der installierten Anlagenleistungen in den Sektoren der produzierenden Industrie in Österreich wurden durchschnittliche sektorspezifische Volllastäquivalente $T_{\text{vl}\ddot{a}\text{q}}$ ermittelt. Diese wurden einerseits durch Analyse von Regressionsmodellen von elektrischen Lastprofilen unterschiedlichster deutscher Wirtschaftszweige von Seim et al. [16] und andererseits auf Basis von Experteneinschätzungen ermittelt. Das konkrete Vorgehen wird im Folgenden genauer beschrieben.

Analyse von Subsektorlastprofilen

Mittlere Volllastäquivalente von sechs der 13 Sektoren der produzierenden Industrie konnten durch Analyse von Lastprofilen deutscher Wirtschaftszweige von Seim et al. abgeleitet werden. Die Lastprofile wurden aus im Jahr 2018 aufgenommenen Branchenlastprofilen mittels multipler Regression ermittelt und haben eine zeitliche Auflösung von einer Stunde.

Die Berechnung der mittleren Volllastäquivalente erfolgt über den Kapazitätsfaktor a_s des Sektors s gemäß folgender Formel:

$$a_s = \sum_{i=1}^N \frac{P_{\text{tats},i,s} * t}{P_{\text{max},s} * t} = \frac{E_{\text{act},s}}{E_{\text{max},s}} \quad (1)$$

Dabei entspricht N der Anzahl der vorhandenen Zeitschritte, t der Zeitschrittlänge in Stunden, $P_{\text{max},s}$ der maximal im Sektor auftretenden Last im betrachteten Jahr und $P_{\text{tats},i,s}$ der zum Zeitschritt i im Sektor auftretenden Last. $E_{\text{tats},s}$ entspricht dem tatsächlichen Energiebedarf des Sektors, $E_{\text{max},s}$ entspricht dem fiktiven Energiebedarf des Sektors bei ganzjähriger Produktion mit Maximallast $P_{\text{max},s}$.

Die der Analyse zugrundeliegenden Annahmen und damit behafteten Limitationen sind:

- Der Lastgang (qualitativer Verlauf) und die Auslastung der österreichischen Industrie stimmen mit jenen der deutschen Industrie überein.
- Volllastäquivalente sind per Definition auf die Nennleistung von Anlagen bezogen. In dieser Auswertung wird angenommen, dass die maximal im Sektor auftretende Last der installierten Nennleistung im Sektor entspricht. Dabei werden Gleichzeitigkeitseffekte nicht berücksichtigt, was folglich zu einer Unterschätzung der tatsächlich installierten Nennleistung und damit einer Überschätzung der berechneten Volllastäquivalente führt.
- Für sechs von 13 Sektoren liegt kein Lastprofil vor.
- Sektoren mit einer Vielzahl von Teilsektoren werden von den verfügbaren Lastprofilen möglicherweise nicht vollständig erfasst.

Eine grafische Darstellung von Formel (1) ist in Abbildung 4 zu sehen. Dabei ist der Lastgang eines Sektors in Form einer Dauerlinie dargestellt. Der Kapazitätsfaktor entspricht der tatsächlich bezogenen Energie $E_{\text{tats},s}$ eines Industriesektors im Verhältnis zum fiktiven Energiebezug bei Volllast über den gesamten Betrachtungszeitraum $E_{\text{max},s}$.

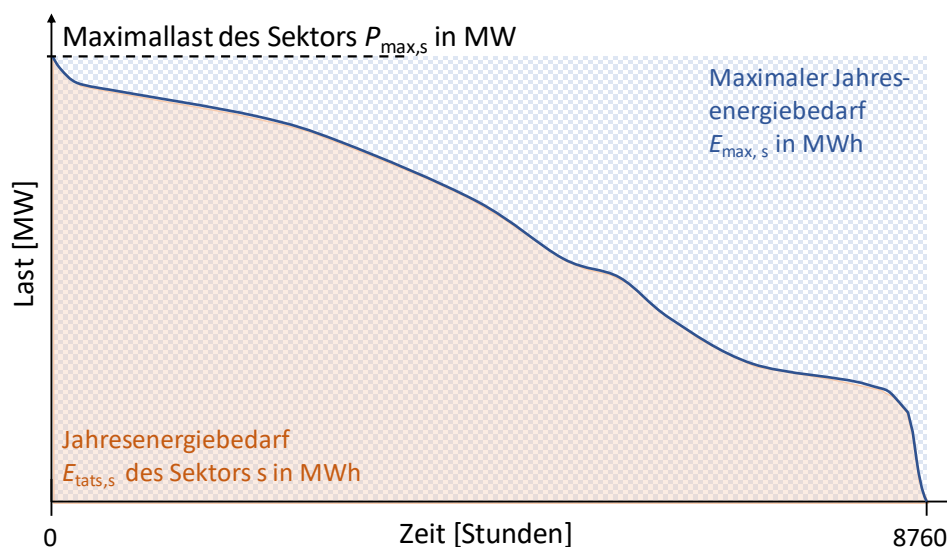


Abbildung 4: Generische Lastdauerlinie des Industriesektors s . Der Kapazitätsfaktor a_s entspricht dem Quotienten von $E_{tats,s}$ [MWh] (orange Fläche) und $E_{max,s}$ [MWh] (blaue, rechteckige Fläche).

Die sektorspezifischen Volllastäquivalente lassen sich mit Formel (2) errechnen.

$$T_{vl\ddot{a}q,s} = a_s * 8760 \left[\frac{h}{a} \right] \quad (2)$$

Domänenwissen

Zur Ermittlung von typischen Volllastäquivalente von Sektoren für die keine regressionsbasierten Lastprofile in der Analyse von Seim et al. [16] enthalten waren (sechs der 13 Industriesektoren), wurden zusätzliche Quellen herangezogen. Gleichzeitig wurde diese Methodik auch zur Absicherung und Anpassung der errechneten Volllastäquivalente der anderen Sektoren verwendet. Anpassungen waren insbesondere in Sektoren nötig, in denen nur für einen Teil der Subsektoren Lastprofile vorhanden waren und die bezüglich ihrer Auslastung erfahrungsgemäß eher heterogen sind.

In diese Experteneinschätzungen flossen verschiedenste Abschätzungen auf Basis von Energieverbräuchen, Wissen aus Vorprojekten, Daten zur Unternehmensdemografie [17], Informationen der Branchenverbände und weiteren, in Kapitel 2.2 genannten, Quellen ein.

2.4.2 Berechnung installierter elektrischer Leistungen

Die Nutzenergieanalyse der Statistik Austria gliedert den Endenergieverbrauch der einzelnen Industriesektoren nach Energieträgern, Bundesländern und Nutzenergiekategorien, also dem Einsatzzweck der Energie, auf. Diese granulare Aufteilung erlaubte in weiterer Folge sowohl eine Zuteilung der ermittelten Leistungen zu unterschiedlichen sektortypischen Anlagentypen (Prozesse, Querschnittstechnologien, Power-to-Heat Anwendungen) als auch eine geografische Zuordnung der errechneten Leistungen zu Bundesländern.

Die Berechnung der installierten Leistung erfolgt gemäß Gleichung (3).

$$\frac{E_{el} \left[\frac{GWh}{a} \right]}{T_{vl\ddot{a}q} \left[\frac{h}{a} \right]} = P_{el,installed} [GW] \quad (3)$$

Dabei entspricht E_{el} dem elektrischen Endenergieeinsatz pro Jahr aus der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria, $T_{vl\ddot{a}q}$ den in Kapitel 2.4.1 ermittelten sektortypischen Volllastäquivalenten in Stunden pro Jahr und $P_{el,installed}$ der ermittelten installierten elektrischen Leistung.

2.4.3 Kombination der Top-Down- und Bottom-Up-Analysen

Durch die Kombination der Ergebnisse aus der durchgeführten Top-Down-Analyse mit der Bottom-up-Analyse aus Esterl et al. [12], die in dieser Arbeit ergänzt wurde, konnte einerseits die Annahmen für die Abschätzung bestätigt werden, andererseits aber auch die Granularität der nachfolgenden Analyse des technischen Potenzials weiter erhöht werden. Dazu wurden die beiden Abschätzungen auf Übereinstimmung geprüft und die bekannten Prozesse und deren installierte Leistungen in die bestehende Top-Down-Analyse integriert.

2.5 Ermittlung des technischen Potenzials

Die Quantifizierung der technischen Flexibilität basiert auf den in den vorangegangenen Schritten ermittelten installierten Leistungen und den ihnen zugewiesenen flexibilisierbaren Anteilen. Diese bezeichnen jenen Anteil an der installierten Leistung, der technisch in der Lage ist, für eine gewisse Abrufdauer (15 min, 1 h und 4 h) eine Art der Flexibilität (positiv oder negativ) bereitzustellen. Die Zuordnung der flexibilisierbaren Anteile erfolgt auf der Grundlage von Expertenwissen zu den Prozessen in ihrem Einsatzkontext, Literaturdaten zur Flexibilität in industriellen Prozessen und einer engen Abstimmung mit Prozessexperten.

2.6 Top-Down-Eingrenzung des technischen Flexibilitätspotenzials

Um den Informationsgehalt der Auswertung weiter zu erhöhen, wurden alle technischen Potenziale hinsichtlich ihrer zeitlichen Verfügbarkeit für unterschiedliche Periodizität bewertet und kategorisiert (siehe Tabelle 1). Die Informationen dazu stammen vorwiegend aus der Analyse der in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Branchenlastprofile und den anderen, in Kapitel 2.2 beschriebenen, Quellen.

Tabelle 1: Zusätzliche Kategorisierung der technischen Flexibilitätspotenziale nach Verfügbarkeit

Verfügbarkeit	Mögliche Ausprägungen
untertägig	Tag, Nacht, ganztägig
täglich	Werktags, Wochenende, ganze Woche
saisonal	ganzes Jahr, einzelne Jahreszeiten

Durch diese Kategorisierung werden die technischen Potenziale durch gewisse administrative Hemmnisse (z.B. Arbeitszeiten, Schichtarbeit, ...) weiter eingeschränkt. Regulatorische Hemmnisse werden hierbei jedoch noch nicht berücksichtigt, weshalb die ermittelten Potenziale laut Definition noch nicht den praktischen Potenzialen entsprechen.

3 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden typische Flexibilitätspotentiale aus industriellen Prozessen (sektorspezifisch) sowie von sektorübergreifende Querschnittstechnologien (Beleuchtung, Kühlung und Energiebereitstellung) beschrieben. Die einleitend angeführten Eigenschaften, die bei Bereitstellung von Flexibilität für Redispatch bzw. Engpassmanagement zu erfüllen sind, wurden grundsätzlich qualitativ berücksichtigt, wobei vor allem für kleine Potentiale (kW-Bereich) angenommen wurde, dass bei Bedarf eine Aggregation über *Flexibility Service Provider*/Aggregatoren vorgenommen wird. Die tatsächliche Realisierbarkeit (bspw. eine frühzeitige Übermittlung eines Fahrplans, die Schaffung der nötigen Schnittstellen, etc.) ist jedoch immer standortspezifisch zu bewerten. Die Prozentwerte für den flexibilisierbaren Anteil beziehen sich jeweils auf die installierte Leistung des Prozesses bzw. der Technologie.

3.1 Flexibilitätspotentiale – Industrielle Prozesse

Gemäß Literatur [12] wird vor allem folgenden Sektoren und industriellen Einzelprozessen mit hoher elektrischer Anschlussleistung ein Flexibilitätspotential zugesprochen:

- Papier und Zellstoff: Mechanische Holzschleifer, Pulper und Refiner, Papiermaschinen
- Chemie: Chlorelektrolyse, Luftzerlegung, Calciumcarbiderzeugung
- Eisen- und Stahl: Elektrolichtbogenofen
- Nichteisenmetalle: Aluminiumelektrolyse (Primärroute zur Aluminiumerzeugung)
- Steine, Erden & Glas: Mühlen für keramische Produkte (z.B. Zementherstellung), Pressen für keramische Produkte, Elektrische Glaswannen

Zur Potentialabschätzung für die Bereitstellung von Flexibilität für Redispatch in Österreich wurden folgende Prozesse nicht berücksichtigt:

- die Aluminiumelektrolyse, da in Österreich an keinem Standort Aluminium über die Primärroute erzeugt wird,
- die Papiermaschinen, da sich diese durch aufwändige An- und Abfahrprozesse sowie durch die Risiken von Papierabrissen nur bedingt flexibilisieren lassen
- Glasherstellung und Pressen von keramischen Produkten – hier wurden die ermittelten installierten Leistungen als deutlich geringer eingeschätzt, als die weiteren flexibilisierbaren Prozesse. Sie werden im Rahmen des Top-Down-Ansatzes für die Querschnittstechnologien berücksichtigt.

Die weiteren Prozesse sowie die Abschätzung der Potentiale für Österreich werden im Folgenden beschrieben. Dabei werden basierend auf Esterl et al. [12] installierte Leistungen sowie die geographische Verortung der flexiblen Prozesse mittels Branchenberichten, veröffentlichten Unternehmensberichten sowie statistischen Datenbanken unterstützt.

Die Größenordnung und Häufigkeit der Flexibilisierbarkeit wird basierend auf Rückmeldungen aus der produzierenden Industrie sowie einer Analyse von regionalen Lastmanagementpotentialen für die deutsche Industrie [18] abgeschätzt. Eine genauere, einzelstandortbasierte Potentialermittlung kann nur durch eine Vielzahl an Interviews, beispielsweise gemäß des in der VDI-Richtlinie für energieflexible Fabriken [7] veröffentlichten Leitfadens, ermittelt werden.

3.1.1 Flexible Prozesse im Sektor Papier und Zellstoff

Mechanische Holzschleifer weisen folgende Charakteristiken auf:

- Hohe elektrische Anschlussleistungen der Einzelanlagen, wobei ein Schleifer üblicherweise einige MW hat (vgl. Angaben bei Berger, et al. [19]).
- Gesamtleistungen in großen Anlagen liegen oft im Bereich von 30 bis 40 MW [20]

- Grundsätzlich ist ein batchartiger Betrieb möglich, was ein großes Lastverschiebepotential für diese Anlagen bedeuten würde.
- Apel et al. schreiben Holzschleifern Teillastbetrieb zu [21]. Die Last ist je nach Anlagentyp entweder kontinuierlich oder in der Größenordnung von einigen Megawatt schrittweise reduzierbar.
- Limitierend ist vor allem die begrenzte Speicherbarkeit des erzeugten Zwischenprodukts [22] mit einigen Stunden bis zu maximal einem Tag [23]. Gemäß Unternehmensangaben kann diese Dauer jedoch durch Beheizen der Zwischenspeicher verlängert werden.
- Der spezifische elektrische Energieeinsatz ist abhängig von der konkreten Technologie des Schleifers und der erforderlichen Qualität im Endprodukt. Dieser kann gemäß *EU IPPC BAT & BREF Dokument* zwischen 1,1 bis 4,3 MWh/t liegen [24].

In Österreich gibt es gemäß Branchen-Fachverband Austropapier drei Standorte mit Holzschliffproduktion [25]. Die dazu installierte Leistung in Österreich wird gemäß erzeugten Mengen, Vollaststundenäquivalent und spezifischen Energieeinsatz auf ca. 70 MW abgeschätzt. In der Praxis limitieren vor allem hohe Produktionsauslastung und somit hohe Betriebsstunden (Bereich: 7000-8000 h/a, berechnetes Vollaststundenäquivalent 7200 h/a) sowie limitierte Speicherbarkeit die Höhe und Häufigkeit der Flexibilitätsnutzung (vgl. Rückmeldungen Industrie und [18]). Das Potenzial zur Reduktion des Leistungsbezugs wird mit bis zu 20 % für maximal 100 Abrufe im Jahr geschätzt.

Allgemein, auch für Altpapieraufbereitung bzw. in Werken, in denen Marktzellstoff eingesetzt wird, werden die Rohstoffe in speziellen Anlagen (Pulpern) zerfasert und im Anschluss in Refinern aufgelöst. Dazu sind ein hoher spezifischer Stromeinsatz und Anschlussleistungen im hohen Kilowattbereich erforderlich. **Pulper bzw. Refiner** haben gemäß *EU IPPC BAT und BREF Dokument* [24] folgende Charakteristiken: kontinuierliche Pulper zur Altpapierzerfaserung haben einen spezifischen Energieeinsatz von 20 bis 40 kWh/t aufbereitetem Rohstoff. Batch-Anlagen haben höhere spezifische Werte. Die gesamte Prozesskette für Altpapieraufschluss inkl. Refiner beträgt, je nach Produkt 150- 600 kWh/t Endprodukt. Ähnliche Werte werden für den Bezug von trockenem Marktzellstoff angegeben. [24]

Zur Potentialabschätzung in Österreich wurde der elektrische Energieeinsatz für Standmotoren herangezogen. Die dafür ermittelte Leistung wurde um die abgeschätzten installierten Leistungen für mechanischer Holzschleifer reduziert. Die resultierende Leistung ergibt sich zu 434,5 MW, wobei hier auch weitere Komponenten, wie Antriebe von Papiermaschinen, Druckluft- und Kältebereitstellung enthalten sind. Eine Abschätzung der E-Control-Studie resultierte in ca. 125 MW für Pulper und Refiner, was in etwa 30 % der oben genannten Leistung entspricht. Gemäß Literatur können diese Anlagen für wenige Stunden um bis zu 100 % ihres Leistungsbezugs reduzieren. Da sich in der Praxis jedoch auch hier Limitationen durch hohe Auslastungen sowie oft kleine Zwischenproduktspeicher ergeben, wird von einem geringeren Potential (ca. 30 %) ausgegangen. Dadurch ergibt sich in dieser Arbeit, dass für die resultierende Leistung ohne Holzschleifer (434,5 MW), ein Flexibilisierungspotenzial (positiv und negativ) von 10 % für 15 und 60 Minuten angenommen werden kann.

3.1.2 Flexible Prozesse im Sektor Eisen und Stahl

Gemäß Literaturangaben kann im Sektor Eisen und Stahl vor allem der Betrieb von Elektrolichtbogenöfen in geringem Ausmaß flexibilisiert werden. In Österreich gibt es drei (große) Standorte, an denen großtechnisch Elektrostahl produziert wird. Elektrostahl wird durch typischerweise chargenweises Einschmelzen von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen hergestellt. Der Einschmelzvorgang mit bis zu 3.500 °C hat einen elektrischen Energiebedarf zwischen 350 und 500 kWh/t Rohstahl und dauert ca. 40 bis 60 Minuten. Unter Berücksichtigung von Jahresrevisionen, Störungen, Instandsetzung, Chargieren, etc. ergibt sich, dass der Prozess ca. die Hälfte des Jahres effektiv betrieben wird. [26]

Die Abschätzung der dazu in Österreich installierten, elektrischen Leistung solcher Anlagen ergibt in Summe ca. 115 MW. Der positiv und negativ flexibilisierbare Anteil wird mit 5 % für 15 Minuten abgeschätzt, was einer konservativen Annahme gegenüber einer gezeigten Lastflexibilität von ± 10 %

in einem Hamburger Stahlwerk [13] entspricht. Mittelfristige Verschiebungen für Standorte ohne Vollauslastung, z.B. Produktion in der Nacht vs. Tag oder umgekehrt, können zusätzlich durch entsprechende organisatorische Maßnahmen realisiert werden und werden in Österreich mit ca. 65-75 % der gesamten installierten Kapazität eingeschätzt.

3.1.3 Flexible Prozesse im Sektor Chemie und Petrochemie

Zur **Chlorherstellung** mittels Membranverfahren werden je nach Anlagengröße mehrere Elektrolysezellen zu einem Modul verschaltet. Günstig ist der Betrieb bei einer möglichst hohen Stromdichte, da dann die erzeugte Lauge eine höhere Produktqualität aufweist (geringerer NaCl-Gehalt). Durchschnittlich werden zwischen 2,1 und 2,6 MWh elektrische Energie je Tonne Chlor zur Produktion eingesetzt [26]. In Österreich wird großtechnische Chloralkalielektrolyse nur an einem einzigen Standort durchgeführt wird. Für die Nennlast des Standortes werden Werte zwischen 20 bis 22 MW [19,27] sowie 30 MW [12] angegeben. In dieser Arbeit wird sie mit 24 MW abgeschätzt, die Flexibilisierung wird bis zu 100 Abrufen je Jahr sowie 50 % Leistungsreduktion für 15 bzw. 60 Minuten angenommen [12].

Gemäß Esterl et al. [12] wurde in Österreich in den letzten Jahren großtechnisch an sechs Standorten (drei Unternehmen) **Luft zerlegt** und in Summe zwischen 700 bis 900 Millionen m³ Sauerstoff hergestellt [28]. Gemäß Unternehmensberichten hat die größte Einzelanlage eine Produktionskapazität von bis zu 400 Millionen m³ pro Jahr. Unter der Annahme von 7.500 Volllaststunden und einem spezifischen elektrischen Energieeinsatz von 0,45 kWh/m³ ergeben sich dafür knapp 25 MW elektrischer Anschlussleistung während gemäß Literatur übliche elektrische Einzelanlagenleistungen im Bereich 10 bis 15 MW liegen (Stigler, et al., 2013). Flexibilisierbar ist die Lastreduktion der Verdichter, bzw. eine Abschaltung der Luftverflüssigung. Die installierte Kapazität in Österreich wird mit ca. 50 MW abgeschätzt. Die Leistungsreduktion wird mit 100 % (was einem Abschalten der Anlage) sowie Verlagern der Produktion angegeben.

Die Produktion von **Calciumcarbid** findet in Österreich an einem Standort statt. Die Anschlussleistung des Elektrolichtbogenofens zur Calciumcarbidproduktion beträgt gemäß Unternehmensangaben 19 MW. Aufgrund der Abschätzungen zu Produktionsmengen, spezifischem Stromeinsatz und Anschlussleistung in Esterl et al. [12] kann von hohen Volllaststunden ausgegangen werden. Das Potential wird gemäß Literatur [20] mit einer Lastreduktion von 50 % für maximal 15 Minuten abgeschätzt.

3.1.4 Flexible Prozesse im Sektor Steine, Erden, Glas

In dieser Arbeit wird die Flexibilisierung von Mühlen zur Roh- aber auch zur Zementmahlung in der Zementherstellung berücksichtigt. Dazu werden folgende Annahmen berücksichtigt. Installierte Leistungen solcher Mühlen liegen in der Regel bei wenigen Megawatt (ca. 3 MW) (vgl. [26]) die Betriebszeiten sind zum einen oft an den Betrieb des Drehrohrofens, aber auch an saisonale Einflüsse (weniger oder keine Produktion im Winter) gekoppelt [26].

Gemäß Analyse zu Emissionen in der österreichischen Zementindustrie [29] gibt es in Österreich neun erzeugende Standorte mit 20 Zementmühlen. Die installierte Leistung der Zement- und Rohmehlmühlen wurde folgendermaßen abgeschätzt: Die Zahl der Zementmühlen je Standort (2-3) wird gemäß [29] mit je 2,25 MW angenommen. Gemäß Literatur beträgt der Stromeinsatz für Zerkleinerungsprozesse ca. 70 %, wobei sich die Anteile für Zement- bzw. Rohmehlmahlen zu ca. 50 bzw. 20 % ergeben [18]. Die ermittelte Leistung für die Zementmühlen noch mit Faktor 1,4 ($= * \frac{7}{5}$) multipliziert. Dadurch ergibt sich eine installierte Leistung von ca. 63 MW. Technisch kann maximal diese Leistung reduziert, bzw. bei Stillständen der Mühlen erhöht werden. Für die Abschätzung in dieser Studie wurde angenommen, dass die volle Leistung für 15 bzw. 60 Minuten reduziert werden kann. Aufgrund hoher Auslastung ist keine Lasterhöhung vorgesehen, bzw. die Reduktion in ihrer Häufigkeit limitiert.

3.2 Flexibilitätspotentiale – Sektorübergreifende Technologien

3.2.1 Querschnittstechnologie Energiebereitstellung

Industrielle Energiebereitstellungsanlagen, die bereits heute beispielsweise auf Spotmärkten oder zur Regelenenergiebereitstellung in nennenswertem Ausmaß Nutzung von Flexibilität anbieten, lassen sich vor allem in folgenden Kategorien zuordnen:

- (Konventionelle) Stromeigenerzeugungsanlagen („Autoproducer“), die oft als positive und negative Flexibilität an Spot- und Regelenenergiemärkten genutzt werden und deren Kapazität sich 2021 gemäß Eurostat Statistik zu Energieinfrastruktur und Erzeugern auf knapp 2000 MW beläuft [30]. Dazu gehören:
 - Gasturbinen (gemäß Eurostat 58 MW installiert)
 - Dampfturbinen (gemäß Eurostat 2018 707 MW bzw. 2021 1304 MW installiert)
 - Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (gemäß Eurostat 2018 378 MW bzw. 2021 497 MW installiert)
 - Verbrennungsmotoren (gemäß Eurostat 2018 145 MW bzw. 2021 72 MW installiert)
- Power-to-heat Anlagen, die mitunter als negative Flexibilität genutzt werden (siehe Abschnitt 3.2.2), wie zum Beispiel
 - Elektrokessel bzw. Elektrodenkessel
 - sowie zunehmend industrielle Wärmepumpen, wobei diese aktuell noch in geringerem Ausmaß zur Flexibilitätsbereitstellung genutzt werden.

In den oben genannten Stromeigenerzeugungsanlagen wurden im Zeitraum 2018 bis 2021 ca. 8500 GWh Strom jährlich erzeugt. Diese Zahl ergibt sich als Abschätzung aus Angaben von ca. 8000 GWh gemäß Eurostat-Daten [31] und 7.500 GWh 2021 bzw. 10.900 GWh 2018 (aus brennstoffbefeuerten Kraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen in Unternehmen mit Eigenerzeugung) gemäß Energiebilanz der Statistik Austria [32]. Über alle Anlagentypen hinweg ergeben sich geschätzte durchschnittliche Volllastäquivalente von ca. 4400 Stunden pro Jahr. Die tatsächlichen Betriebsstunden wurden jedoch für einen großen Teil der Anlagen als wesentlich höher bzw. als wesentlich niedriger eingeschätzt.

Zur ersten Gruppe, den Anlagen mit höheren Betriebsstunden, gehören gemäß Literaturvergleichen sowie aus Rückmeldungen von Industrieunternehmen beispielsweise die Sektoren *Papier und Zellstoff* sowie *Eisen und Stahl*. Gemäß Angaben des Branchenberichts des Sektors „Papier- und Zellstoff“ [25] entfielen 2021 3294 GWh auf diesen Sektor sowie gemäß der Energiebilanz der Statistik Austria für 2021 von ca. 2000 GWh auf den Sektor Eisen- und Stahl (Kohlegase). Eine Abschätzung mit der Annahme von 7000 Volllaststunden für diese beiden Sektoren ergibt eine installierte Leistung von ca. 750 MW. Darüber hinaus lässt eine Analyse der Emissionszuteilungen in Österreich die Schlussfolgerung zu, dass auch in den Sektoren Holzverarbeitung, Chemie und Nahrungsmittelherstellung mittlere bis größere Stromeigenerzeugungsanlagen zu finden sind. Basierend auf der elektrischen Eigenerzeugung gemäß Statistik Austria ergibt sich wieder unter der Annahme von 7000 Volllaststunden für elektrische Eigenerzeuger in Betrieb eine installierte Leistung von knapp 1100 MW. Gemäß Einschätzungen sowie Use-Case Simulationen zur Flexibilitätsbereitstellung aus einem industriellen Energieversorgungssystem wird der flexibilisierbare Anteil in positive und negative Richtung mit 5-10 % abgeschätzt. Dazu wird die konservative Annahme von einer Abrufdauer bis zu einer Stunde angenommen. Mitunter werden hier auch längere Zeitintervalle möglich sein.

Eine erste Abschätzung basierend auf den oben zusammengefassten Zahlen ergibt eine Flexibilität von 55-110 MW, die aber in der Regel nicht gleichzeitig abrufbar sein wird und stark von der tatsächlichen Auslastungssituation in den Industriebetrieben abhängt. Somit kann diese Flexibilität im zeitlichen Verlauf auch Änderungen unterliegen. Die nutzbare Flexibilität und vor allem die zeitliche Auflösung ist

stark von der Auslastung der Industriebetriebe abhängig. Darüber hinaus sind viele Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung ausgeführt. Die tatsächliche Flexibilität hängt in diesem Fall von der Zahl der Freiheitsgrade ab. Dampfspeicher oder flexible Entnahmestufen haben somit einen unmittelbaren Einfluss auf die nutzbare Flexibilität

Niedrigere Betriebsstunden haben vor allem Anlagen, die als Notstromaggregate genutzt werden und deren Hauptaufgabe die ständige Bereitschaft zur schnellen und flexiblen Energielieferung für den Standort ist. Für solche Anlagen wird in dieser Studie angenommen, dass kein Flexibilitätspotential zur Verfügung steht. Für beide Kategorien ist somit das Potential der Flexibilitätsbereitstellung nicht in vergleichbarer Höhe zur installierten Anlagenkapazität einzuschätzen.

3.2.2 Querschnittstechnologie Wärmebereitstellung

Einen ersten Indikator für den Einsatz von Power-to-Heat Anlagen, insbesondere Elektro- und Elektrodenkessel, zur (Hochtemperatur-)Warmwasser- oder Dampferzeugung liefert der Strombedarf aus der Nutzenergiekategorie *Prozesswärme <200°C*. Dabei sticht vor allem der Sektor Papier- und Zellstoff heraus, in dem 753 GWh an Prozesswärme unter 200°C mit elektrischer Energie bereitgestellt werden. Bei einer angenommenen Volllastdauer von 4000 Stunden entspricht das einer installierten Leistung von 185 MW. Berücksichtigt man die Tatsache, dass auch Hilfsantriebe in Dampferzeugern betrieben werden, wird abgeschätzt, dass die installierte Anschlussleistung unter diesem Wert liegt und in erster Näherung mit 100 MW angenommen werden kann. Bekannte Einzelanlagen in diesem Sektor haben Leistungen bis zu 20 MW. Für bekannte Elektro(den)kessel-Einzelanlagen wurde ein negatives Flexibilitätspotential von 100 % für 15 min bis zu 4 h angenommen.

Für die übrige installierte Leistung in dieser Nutzenergiekategorie und diesem Sektor wurde ein durchschnittliches positives und negatives Flexibilitätspotential von 10 % für 15 bzw. 60 Minuten für Elektrifizierung in der Prozesswärmebereitstellung abgeschätzt. Diese Annahme wurde auch für die Sektoren Nahrungs- und Genussmittel sowie Chemie und Petrochemie, Holzverarbeitung und Textil und Leder getroffen, da hier relevante Anteile der benötigten Energie der Nutzenergiekategorie *Prozesswärme <200°C* zuzuordnen sind.

Für die Nutzenergiekategorie *Prozesswärme >200°C* wurden 5 % Leistungsreduktion für 15 bzw. 60 Minuten für elektrische Anteile in der Wärmebereitstellung in folgenden Sektoren angenommen: Fahrzeugbau, Maschinenbau, Textil und Leder sowie Nahrungs- und Genussmittel. Für den letzten Sektor wurde zudem ein negatives Potential in der gleichen Größenordnung angenommen.

Basierend auf der Analyse im Rahmen der Studie *Regionale Lastmanagementpotentiale in Deutschland bis 2045 [18]*, in der für die Querschnittstechnologie Lüftung 11 % Lastreduktionspotential für bis zu 1 Stunde angegeben wird, wurde für diese Arbeit folgende Annahme getroffen. Für die installierte Leistung für die Nutzenergiekategorie *Raumwärme und Warmwasserbereitstellung* wird ein Lastreduktionspotential von 5 % für 15 bzw. 60 Minuten angenommen. Ausgenommen wurden aufgrund ihres mobilen Charakters die Sektoren Bau und Bergbau.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die perspektivischen Potenziale für die Wärmebereitstellung zunehmend größer werden, da eine fortschreitende Elektrifizierung der Wärmebereitstellung in der Industrie als Trend erkennbar ist.

3.2.3 Querschnittstechnologie Beleuchtung

Als Grundlage zur Abschätzung der Flexibilität durch Beleuchtung wurde die Nutzenergieanalyse der Statistik Austria (Kategorie *Beleuchtung und EDV*) sowie die ermittelten Volllaststundenäquivalente je Sektor angenommen. Basierend auf der Angabe von 7 % für bis zu maximal 4 Stunden aus der Studie *Regionale Lastmanagementpotentiale in Deutschland [18]* wurde angenommen, dass 5 % der installierten Leistung für die Bereiche EDV und Beleuchtung für bis zu 4 Stunden reduziert werden kann. Ausgenommen wurden aufgrund ihres mobilen Charakters die Sektoren Bau und Bergbau. Eine

Lasterrhöhung (negatives Flexibilitätspotenzial) von Beleuchtungsanlagen wird zwar als technisch möglich interpretiert, entspricht aber in der Regel einer reinen Erhöhung des Energiebezugs und wird aus Effizienzgründen hier nicht angenommen.

3.2.4 Querschnittstechnologie Kühlung

Zunächst wurden basierend auf Analysen zur Flexibilisierung der Kältebereitstellung in Deutschland [33] folgende Sektoren als relevante Verbraucher von Prozesskälte identifiziert: Chemie & Petrochemie (inkl. Kunststoffherstellung und Pharmaindustrie), Fahrzeugbau, Maschinenbau, Nahrungs- und Genussmittel. Auch für die Bauindustrie wurde ein relevanter Kältebedarf in der Studie identifiziert, in dieser Arbeit wurden aufgrund ihres mobilen Charakters die Sektoren Bau und Bergbau jedoch ausgenommen. Im Bericht wurden zwischen 2 und 30 % des Strombedarfs im Sektor für Kältebereitstellung angegeben. Aufgrund der Heterogenität der Subsektoren wurde im für diese Arbeit für die oben genannten Sektoren ein Lastreduktionspotential im Zuge einer Verschiebung oder Abschaltung von 5 % für 15 bzw. 60 Minuten (vgl. [18]) für Prozesskältebereitstellung der Nutzenergiekategorie *Standmotoren* zugeordnet.

3.3 Zusammenfassung

Installierte elektrische Anlagenleistung

Die installierte elektrische Leistung in der produzierenden Industrie beläuft sich laut Analyse auf rund 6290 MW in industriellen Prozessen und Querschnittstechnologien (exklusive Eigenerzeugungsanlagen). Weiters sind etwa 1100 MW an installierter elektrischer Leistung im Bereich der Eigenerzeugungsanlagen für Strom in der Industrie zu erwarten. Die Verteilung der absoluten und relativen Anteile der vorhandenen installierten Leistung auf die Bundesländer ist in Abbildung 5 ersichtlich. Wie aufgrund der Verteilung der energieintensiven Industrieunternehmen in Österreich zu erwarten war, befinden sich zwei Drittel (67,7 %) der Anlagenleistung in den 3 Bundesländern Oberösterreich, Steiermark und Niederösterreich. Außerdem zeigt sich, dass sich die sektoralen Anteile an der installierten Leistung in den einzelnen Bundesländern durchaus unterscheiden. Das ist etwa an der sehr großen Anlagenleistung im Sektor Eisen und Stahl in der Steiermark (369 MW) oder dem Anteil des Sektors Holzverarbeitung in Salzburg (109 MW) erkennbar.

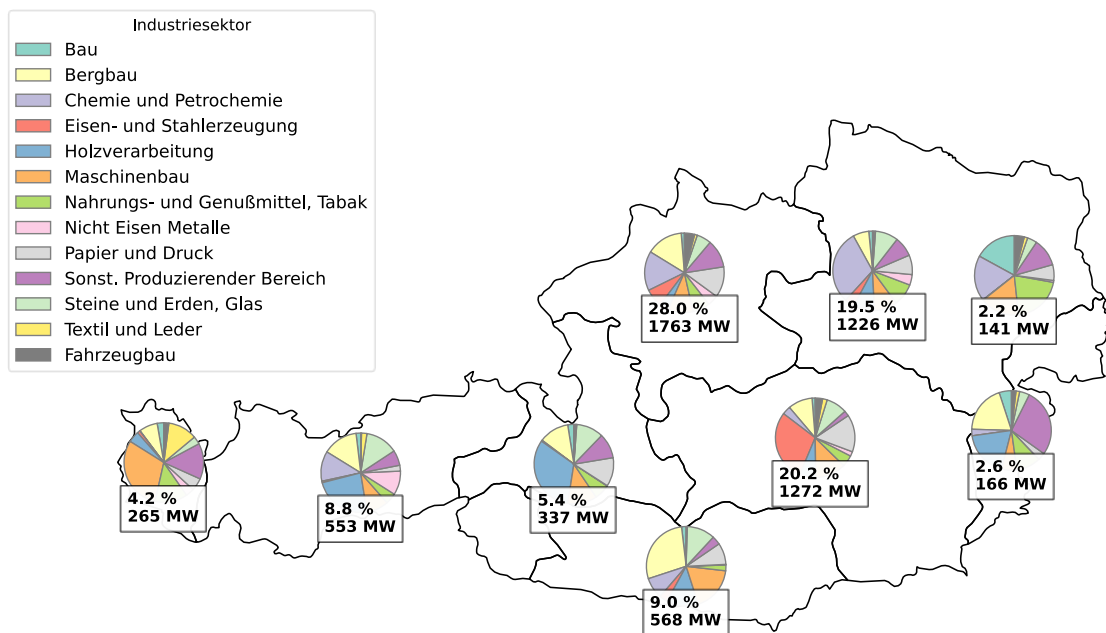


Abbildung 5: Abgeschätzte installierte elektrische Leistung in MW für industrielle Prozesse und Querschnittstechnologie ohne Eigenerzeugungsanlagen und Anteil an gesamter installierter Leistung in der produzierenden Industrie im Jahr 2020. Die Größe der Kreisdiagramme ist nicht proportional zur installierten Leistung.

Technisches Flexibilitätspotenzial nach Sektoren

Abbildung 6 zeigt die positiven und negativen technischen Flexibilitätspotenziale aus Prozessen und Querschnittstechnologien (ohne Eigenerzeugungsanlagen). Die größten positiven Potenziale werden in den energieintensiven Sektoren Chemie und Petrochemie; Steine, Erden und Glas; Papier und Druck und im Maschinen- und Fahrzeugbau vermutet. Negatives Potenzial wird vor allem in den Sektoren Papier und Druck; Chemie und Petrochemie sowie in der Sekundärstahlerzeugung mit Elektrolichtbogenöfen erwartet.

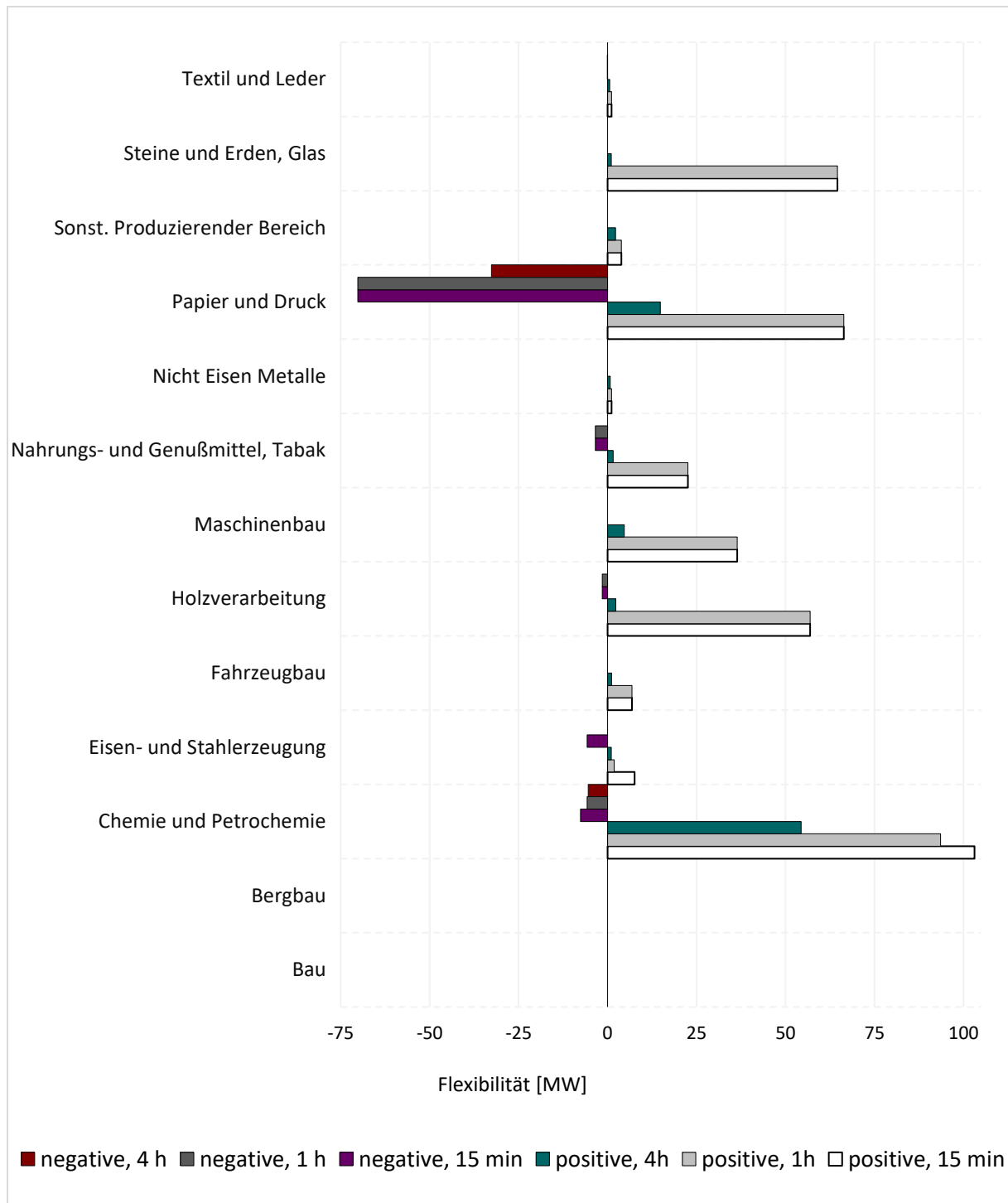


Abbildung 6: Technische positive und negative Flexibilität in den Sektoren der produzierenden Industrie (exkl. Eigenerzeugungsanlagen) in MW für die Abrufdauern 15 min, 1 h und 4 h

Geografische Verteilung des Flexibilitätspotenzials

Die Konzentration der installierten Anlagenleistung im Zentralraum Österreichs zeigt sich erwartungsgemäß auch im flexibilisierbaren technischen Potenzial (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8).

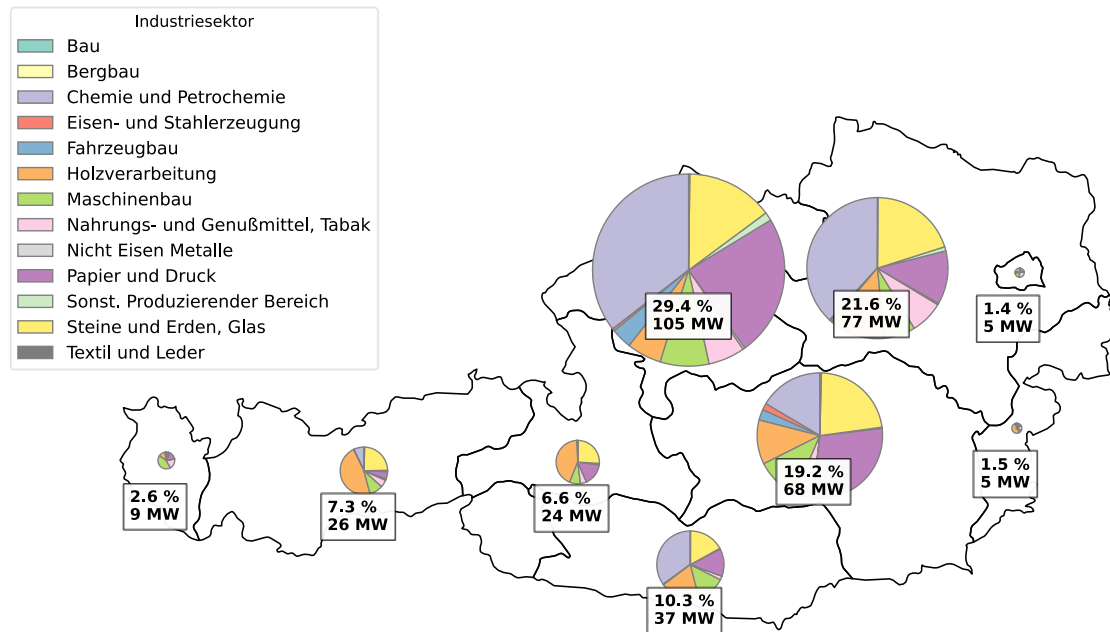


Abbildung 7: Verteilung des positiven technischen Flexibilitätspotenzials (exklusive Eigenerzeugungsanlagen) mit 1h Abrufdauer auf die Bundesländer und Industriesektoren. Positives technisches Potenzial in MW und relative Anteile am gesamt verfügbaren positiven technischen Potenzial in Österreich. Die Größe der Kreisdiagramme ist proportional zum Anteil am gesamt verfügbaren positiven Potenzial.

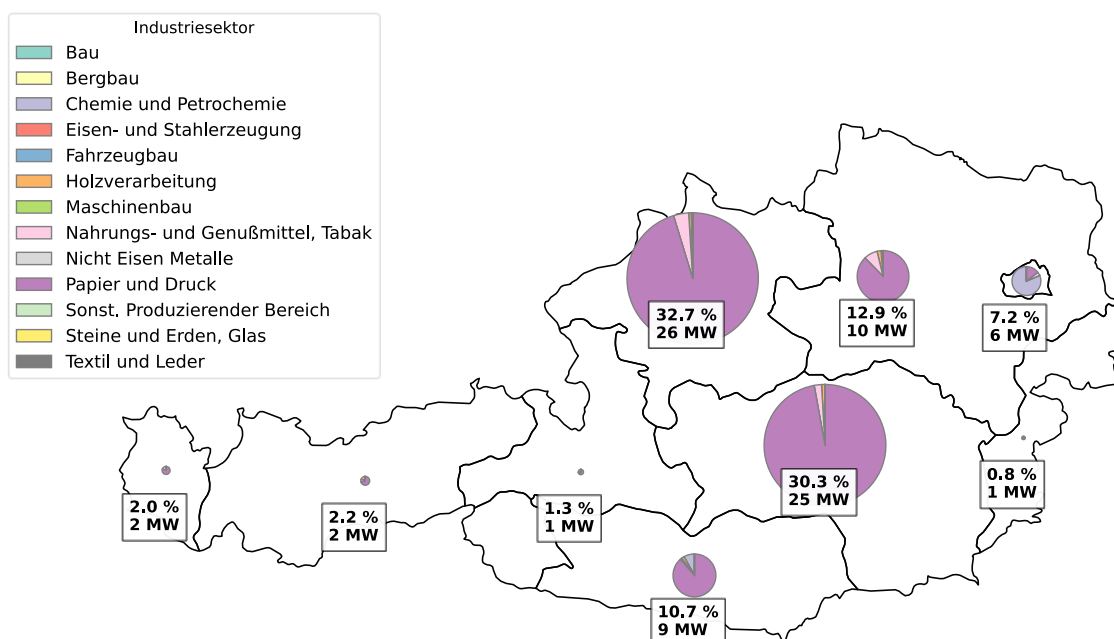


Abbildung 8: Verteilung des negativen technischen Flexibilitätspotenzials (exklusive Eigenerzeugungsanlagen) mit 1h Abrufdauer auf die Bundesländer und Industriesektoren. Negatives technisches Potenzial in MW und relative Anteile am gesamt verfügbaren negativen technischen

Potenzial in Österreich. Die Größe der Kreisdiagramme ist proportional zum Anteil am gesamt verfügbaren negativen Potenzial.

Gesamt verfügbares technisches Flexibilitätspotenzial (inklusive Eigenerzeugung)

In Summe werden in Österreichs produzierender Industrie 410 MW an positivem und 190 MW an negativem technischen Flexibilitätspotenzial in Prozessen und Querschnittstechnologien, inklusive Eigenerzeugungsanlagen, für eine Abrufdauer von einer Stunde erwartet (siehe Abbildung 9). Während sich das positive Flexibilitätspotenzial gleichmäßig über alle energieintensiven Sektoren hinweg verteilt, ist negatives Potenzial vor allem in Prozessen des Papiersektors vorhanden. Ein nicht unerheblicher Teil der Flexibilität wird in den Eigenerzeugungsanlagen aller Industriesektoren gesehen, der auf etwa 55 MW (positive Flexibilität) bzw. 110 MW (negative Flexibilität) für jeweils 15 min und 1 h eingeschätzt wird.

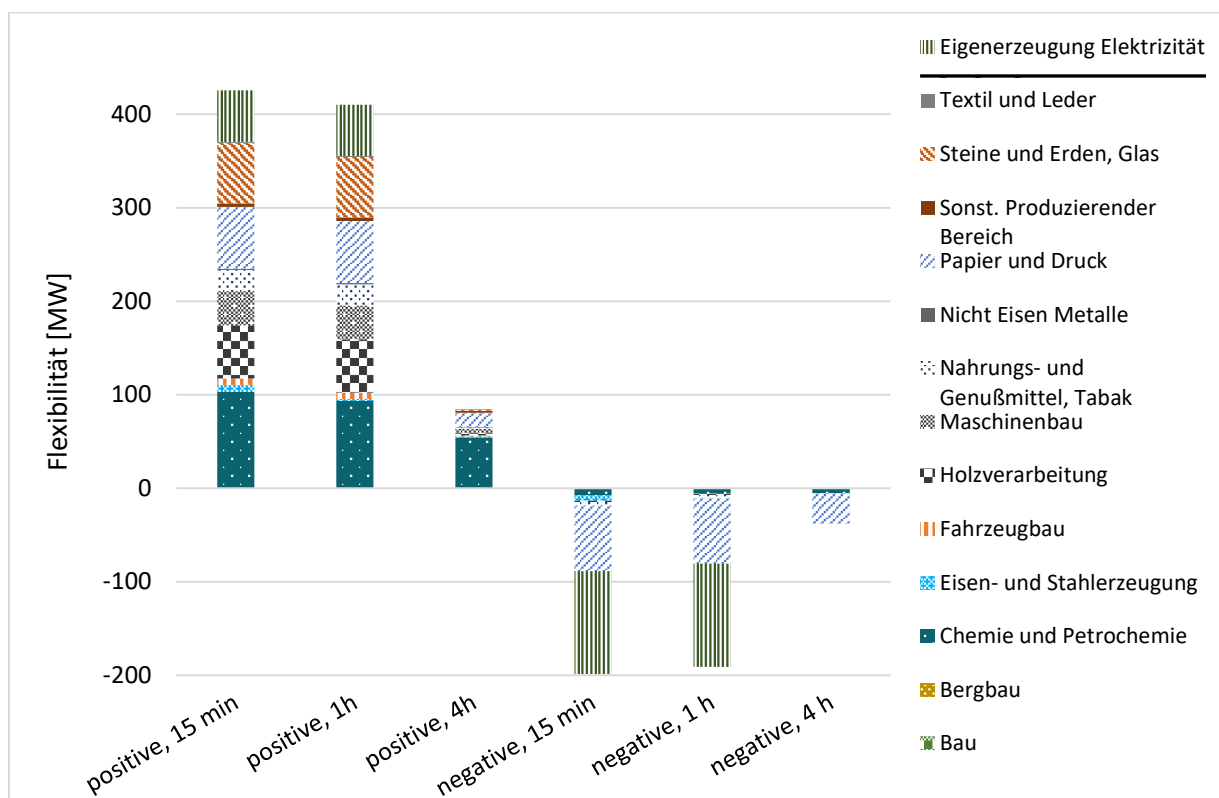


Abbildung 9: Ermittelttes technisches Flexibilitätspotenzial in Österreichs produzierender Industrie in MW im Jahr 2020

3.4 Hemmnisse und Limitationen

Einen umfassenden Überblick von Hemmnissen, oft technischer oder organisatorischer Art, basierend auf einer Vielzahl von Publikationen präsentieren Ausfelder et al. [26]. Esterl et al. [12] differenzieren darüber hinaus technische, regulatorische, wirtschaftliche und kulturelle Hemmnisse. Beispiele für Ursachen technischer und organisatorischer (bzw. kultureller) Limitationen in der Nutzung von industriellem Flexibilitätspotenzial sind u.a. Folgende:

- Fehlende Messung, Datenverarbeitung und Steuerungsmöglichkeit, wodurch vor allem kleine Flexibilitätspotenziale nicht ermittelt und genutzt werden können
- Hohe Auslastung der Anlagen, wodurch eine Leistungsreduktion bzw. -verschiebung zu Produktionsausfällen führt
- Risiko für Produktionsausfälle oder Qualitätsminderung durch flexible Fahrweise eines Prozesses

- Gekoppelter Betrieb von Energieversorgungsanlagen, bspw. Power-to-Heat oder Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, reduziert die Verfügbarkeit für flexiblen Anlagenbetrieb
- Organisatorische Restriktionen im Anlagenbetrieb (qualifiziertes Personal nicht in jeder Schicht verfügbar)

Regulatorische Einschränkungen können sich durch das Risiko, mit Flexibilisierung Grenzwerte für Lärmemissionen oder für Vorgaben wie Effizienzziele zu verletzen, ergeben. Dadurch können Prozesse bspw. nicht in die Nacht verlagert werden bzw. kann das Potenzial vom Wechsel der Energiebereitstellungstechnologie (Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage vs. brennstoffbefeuerter Dampferzeuger) nicht genutzt werden.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

Vergleicht man die in dieser Arbeit ermittelten technischen Potenziale in einer Größenordnung von ca. 200 MW (negativ) bis 400 MW (positiv) mit dem Flexibilitätspotenzial anderer Technologien, lässt sich erkennen, dass das industrielle Flexibilitätspotenzial aktuell noch sehr gering ausgeprägt ist. Im Vergleich dazu lag das Potenzial von Pumpspeicher- und Speicherkraftwerken gemäß Esterl et al. [12] im Jahr 2020 bei 8844 MW (positiv) bzw. 4200 MW (negativ).

Jedoch ist in Zukunft mit steigenden Potenzialen in der Industrie zu rechnen. Ein perspektivisch höheres negatives Potenzial ergibt sich vor allem im Bereich der Elektrifizierung von Wärmebereitstellung, bspw. durch industrielle Wärmepumpen – vgl. Angabe im Bericht *Innovative Energietechnologien in Österreich: Marktentwicklung 2021* [34]. Dort wurde abgeschätzt, dass 2021 bereits 680 GWh/a Wärme durch industrielle Wärmepumpen bereitgestellt wurden. In Windholz et al. [35] wird das technische Potential zur Nutzung industrieller Wärmepumpen bis 150°C für Österreich in den Sektoren Papier und Zellstoff bzw. einigen Subsektoren der Nahrungsmittelindustrie mit ca. 400 MW Heizleistung (entspricht ca. 200-250 MW_{el}) abgeschätzt. Auch für Öfen, etwa in der metallverarbeitenden Industrie und in der Eisen- und Stahlherstellung, aber auch für Prozesse im Bereich von 200°C in der Nahrungsmittelindustrie sowie in Trocknern, lassen sich Trends zur Elektrifizierung erkennen. Prozessumstellungen, beispielsweise höhere Recyclingraten und verstärkter Altpapiereinsatz in der Papierindustrie, haben mitunter das Potential die flexiblen Kapazitäten der Holzschleifer hinsichtlich Höhe und Häufigkeit zu erhöhen.

Die Wahrscheinlichkeit von relevanten Änderungen in bestehenden Anlagenparks der Energieeigenversorgung von Unternehmen (z.B. Gasturbinen, etc.) wird als eher gering eingeschätzt. Nicht zuletzt zeichnen sich diese Anlagen durch eine lange Lebensdauer und aufwändige Beschaffungsprozesse aus. Dazu zählen Umweltverträglichkeitsprüfungen, Unsicherheit für Investitionen, steigende Anforderungen hinsichtlich Dekarbonisierung, die ganzheitlich neuen Konzepte erfordern, limitierte Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern und vieles mehr. Ohne besagte Änderungen in den Anlagenparks kann eine Erhöhung des Potentials nur durch gleichzeitige Reduktion der Produktionsvolumina gelingen.

5 Literatur

- [1] APG, Tage mit Redispatch im Vergleichszeitraum Jänner-September., 2022, <https://app.23degrees.eu/view/oTOEcoGRHahY4unK-bar-vertical-tage-mit-redispatch-im>, accessed 7 February 2023.
- [2] APG, Struktur bisheriger Redispatch Maßnahmen, 2022, <https://app.23degrees.eu/view/fIIEFVpjHLzhT2y9-donut-struktur-bisheriger-redispatch>, accessed 7 February 2023.
- [3] Eurostat, Umwelt- und Energiestatistik, <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/envir>, accessed 8 February 2023.
- [4] S. Beucker, C. Heyken, A. Hüttner, S. Maeding, C. Over, M. Richter, M. Richter, F. Stein, A. Weber, Best Practice Manual: Flex identifizieren. Let's talk about flex, Berlin, 2020.
- [5] M.Z. Degefa, I.B. Sperstad, H. Sæle, Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources, *Electric Power Systems Research* 194 (2021) 107022.
- [6] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Energieflexible Fabrik - Blatt 1: Grundlagen, Beuth Verlag GmbH, Berlin 91.120.10, 2020.
- [7] Verein Deutscher Ingenieure e.V., Energieflexible Fabrik - Blatt 2: Identifikation und technische Bewertung, Beuth Verlag GmbH, Berlin 27.010, 2021.
- [8] J. Luo, J. Moncada, A. Ramirez, Development of a Conceptual Framework for Evaluating the Flexibility of Future Chemical Processes, *Ind. Eng. Chem. Res.* 61 (2022) 3219–3232.
- [9] W. Golden, P. Powell, Towards a definition of flexibility: in search of the Holy Grail?, *Omega* 28 (2000) 373–384.
- [10] Statistik Austria, Nutzenergieanalyse für Österreich 2020, <https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/nutzenergieanalyse>, accessed 8 February 2023.
- [11] European Commission, European Union Transaction Log, <https://ec.europa.eu/clima/ets/welcome.do>, accessed 8 February 2023.
- [12] T. Esterl, A. Zegers, J. Spreitzhofer, G. Totschnig, S. Knöttner, S. Strömer, S. Übermasser, F. Leimgruber, H. Brunner, R. Schwalbe, D. Suna, G. Resch, F. Schöniger, S. von Roon, T. Hübner, K. Ganz, F. Veitengruber, L. Freiberger, A. Djamali, Flexibilitätsangebot und -nachfrage im Elektrizitätssystem Österreichs 2020/2030, Wien, 2022.
- [13] B. Munzel, M. Reiser, K. Steinbacher, Flexibilitätspotentiale und Sektorkopplung: Synthesebericht 1 des SINTEG Förderprogramms. Studie IM Auftrag des BMWK, Berlin, 2022.
- [14] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030: Teil 1: Hauptbericht, 2016.
- [15] Forschungsstelle für Energiewirtschaft, Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030: Teil 2: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher, 2016.
- [16] S. Seim, D. Ruedt, Q. Wu, M. Held, P. Verwiebe, J. Mueller-Kirchenbauer, Regression-based electricity load profiles of 32 industrial and commercial subsectors in Germany, Zenodo, 2021.
- [17] Statistik Austria, Allgemeine Unternehmensdemografie 2020, accessed 8 February 2023.
- [18] F. Jetter, F. Veitengruber, T. Schmid, A. Guminski, S. von Roon, T. Hübner, K. Staschus, P. Creuzburg, T. Sach, Regionale Lastmanagementpotenziale: Quantifizierung bestehender und zukünftiger Lastmanagementpotenziale in Deutschland, 2021.
- [19] H. Berger, T. Eisenhut, S. Polak, R. Hinterberger, Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector, 2011.
- [20] C. Gutschi, H. Stigler, Potenziale und Hemmnisse für Power Demand Side Management in Österreich, in: Technische Universität Graz (Ed.), 10. Symposium Energieinnovation, 13.-15. Feb. 2008.
- [21] R. Apel, T. Aundrup, B.-M. Buchholz, H.P. Domels, S. Funke, T. Gesing, Demand Side Integration. Lastverschiebungspotenziale in Deutschland (Gesamttext): Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE, Frankfurt am Main, 2012.

- [22] M. Klobasa, Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten, Fraunhofer-Gesellschaft, 2007.
- [23] H. Stigler, D. Hütter, A. Schüppel, C. Gutschi, C. Huber, EDRC - European Demand Response Center, 2013.
- [24] M. Suhr, G. Klein, I. Kourti, M. Rodrigo Gonzalo, G. Santonja, S. Roudier, L. delgado Sancho, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board, 2015.
- [25] Austropapier - Vereinigung der Österreichischen Papierindustrie, Branchenbericht 2021/2022, 2022.
- [26] Ausfelder, F., Seitz, A. & von Roon, S., Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie: Methodik, Potentiale, Hemmnisse. Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie im KopernikusProjekt SynErgie, Frankfurt am Main, 2018.
- [27] M. Schmitdthaler, c. Elbe, A. Kollmann, A. Kraussler, H. Steinmüller, F. Frank, L. Rebhandl, E. Schmutzner, Loadshift: Lastverschiebung in der Industrie. Projektbericht 4/9, Juni/b2014.
- [28] Eurostat, Statistics on the production of manufactured goods. Total production by PRODCOM list (NACE Rev. 2), <https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/database>.
- [29] G. Mauschitz, Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie: Berichtsjahr 2020, Wien, 2021.
- [30] Eurostat, Energy statistics: Energy infrastructure and capacities. Electricity production capacities for combustible fuels by technology and operator (NRG_INF_EPCT), 2023, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/envir?lang=en&subtheme=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_inf&display=list&sort=category&extractionId=NRG_INF_EPCT__custom_4905518, accessed 10 February 2023.
- [31] Eurostat, Energy statistics: Energy balances. Production of electricity and derived heat by type of fuel (NRG_BAL_PEH), 2023, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/explore/all/envir?lang=en&subtheme=nrg.nrg_quant.nrg_quanta.nrg_bal&display=list&sort=category&extractionId=NRG_BAL_PEH__custom_4905780, accessed 10 February 2023.
- [32] Statistik Austria, Energiebilanzen Österreich ab 1970, 2022, <https://statcube.at/statistik.at/ext/statcube/jsf/dataCatalogueExplorer.xhtml>, accessed 10 February 2023.
- [33] D. Schmidt, R. Rogotzki, C. Goetschkes, C. Pollerberg, Kältetechnik in Deutschland: Steckbriefe zu Kälteanwendungen, 2020th ed., Oberhausen.
- [34] P. Biermayr, C. Dißauer, M. Eberl, M. Enigl, H. Fechner, B. Fürnsinn, M. Jaksch-Fliegenschnee, K. Leonhartsberger, S. Moidl, E. Prem, S. Savic, C. Schmidl, C. Strasser, W. Weiss, M. Wittmann, P. Wonisch, E. Wopienka, Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2021: Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft, 2022.
- [35] B. Windholz, S. Knöttner, P. Schmidberger, F. Helminger, Schneeberger A, Marktpotentialabschätzung dampferzeugender Hochtemperatur-Wärmepumpen bis 150°C, in: Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V. (Ed.), Tagungsband, 2022.