

# FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE

METHODIK | POTENZIALE | HEMMNISSE

Herausgeber:  
Florian Ausfelder  
Antje Seitz  
Serafin von Roon



GEFÖRDERT VOM

**KOPERNIKUS**  
SynErgie **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

Tabelle 1: Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse

	Elektrolichtbogenofen	Glasschmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	Roh- und Zementmahlung	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Rohstoffschmelzanlage	
<b>Randbedingungen</b>	Stranggussanlage in ausgelastetem Werk	Kontinuierlicher Betrieb über bis zu mehr als 15 Jahre	Mahlwerk und integriertes Werk	Teillastbetrieb, Chlorspeicher, EDC-Speicher	Voll ausgelastete Anlage	
<b>Teillastbetrieb</b>	Nein	EZH: Ja	Nein	Ja	Ja	
<b>Technisches Flexibilitätspotenzial</b>	<b>Durchschnitt<sup>1</sup>/ Median<sup>2</sup></b>		eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: ca. 3 MW Negativ: ca. 3 MW	Positiv: 13 MW <sup>2</sup> Negativ: 1 MW <sup>2</sup>	Positiv: 0,3 MW Negativ: 0,2 MW	
	<b>Bereich (Min – Max)</b>		Positiv: 0-11 MW <sup>3</sup> Negativ: 0-8 MW <sup>3</sup>	Positiv: 0-77 MW Negativ: 0-4 MW	Positiv: 0-4 MW Negativ: 0-0,5 MW	
	<b>Potenzial für Deutschland (Anzahl Werke/ Anlagen   Verfügbarkeit)</b>	Positiv: 766 MW Negativ: – (26   52 %)	Positiv: 25 MW Negativ: 25 MW (≈60   ≤75 %)	je Werk eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: 172 MW Negativ: 172 MW (55   saisonabhängig)	Positiv: 421 MW Negativ: 15 MW (21   95 %)	Positiv: 23 MW Negativ: 3 MW (13   45 %)
	<b>Abrufdauer</b>	Wenige Minuten	Minuten	Bis zu 12 h abhängig von Betriebssituation und Produktvorrat ggf. länger möglich	Teillast: 15 Min. EDC-Speicher: bis zu mehreren Tagen	Positiv: 5-60 Min. Negativ: 15 Min.
	<b>Abrufhäufigkeit</b>	Mehrmals täglich	Je nach Abrufdauer, ggf. mehrmals täglich	Ggf. mehrmals täglich möglich	Mehrmals täglich	Mehrmals täglich
	<b>Besonderheiten des Prozesses</b>	Verfügbarkeit von Flexibilität nur bedingt planbar	Änderung der elektrischen Leistung muss durch Eintrag des fossilen Energieträgers substituiert werden	Starke Saisonalität; Mindestbetriebszeit von 4 h	Starke Einbindung in Prozessketten, Flexibilität abhängig von der Speicherbarkeit der Zwischenprodukte	Produktion in einem kontinuierlichen Chargenprozess

<sup>1</sup> Durchschnitt; <sup>2</sup> Median; <sup>3</sup> Maximalwert für ein integriertes Werk. Entspricht der Summe aus Roh- und Zementmahlung.

Tabelle 2: Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile in Abstimmung mit dem Betriebsleiter bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen

Branche	Prozess (Art der Prozesskette)	Anforderungsprofil 1 - Kurzfristige Anpassung der Last - Abrufdauer: 15 min - Vorankündigungszeit: wenige Minuten	Anforderungsprofil 2 - Verschieben der Last über mehrere Stunden - Abrufdauer: 3–12 h - Vorankündigungszeit: 1 Tag	Anforderungsprofil 3 - Reduktion der Last über mehrere Tage - Abrufdauer: 1–5 Tage - Vorankündigungszeit: 2–5 Tage
Stahl	Elektrolichtbogenofen (nur Strangguss)	(✓) <sub>pos</sub>	✗	✗
	Elektrolichtbogenofen (Strang- und Blockguss)	✗	✗	✗
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	✗	✗
Zement	Zementmühlen	(✓) <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>
	Rohmühle	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	✗
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	✓ <sub>pos</sub>	✗	✗
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (EDC-Produktion)	✓ <sub>pos</sub>	✓ <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos</sub>
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	✗	✗

✓ Erfüllbar (✓) Abhängig von den spezifischen Anforderungen der Prozesskette nur zu bestimmten Zeiten erfüllbar

✗ Nicht erfüllbar S Nur an wenigen Standorten erfüllbar

pos/neg Vorwiegende Art der verfügbaren Leistung, positiv: Lastminderung, negativ: Lasterhöhung. Bei hohen Auslastungen meistens asymmetrische Leistungsverfügbarkeit, da hohe, kurze Lastminderungen durch lange, geringe Lasterhöhungen ausgeglichen werden müssen.

# FLEXIBILITÄTSOPTIONEN IN DER GRUNDSTOFFINDUSTRIE

METHODIK | POTENZIALE | HEMMNISSE

Herausgeber:  
Florian Ausfelder  
Antje Seitz  
Serafin von Roon

Bericht des AP V.6 „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ im Kopernikus-Projekt „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung.

## FÖRDERKENNZEICHEN

03SFK3P0 (VDEh-BFI)  
03SFK3N0 (DEC)  
03SFK3S0 (DIW)  
03SFK3C1 (DLR)  
03SFK3O0 (FFE)  
03SFK3M1 (FGF)  
03SFK3M0 (HVG)  
03SFK3E1 (TUM)  
03SFK3K0 (VDZ)  
03SFK3L0 (WI)

# VERWENDETE METHODIK ZUR ERMITTLUNG DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN

1. Definition der Potenzial-/Perspektiv-Begriffe und ihrer relevanten Parameter
2. Definition der Anforderungsprofile zur Flexibilitätserhebung
3. Identifizierung und technische Beschreibung der relevanten Prozesse
4. Definition und Strukturierung der Hemmnis-Ebenen
5. Modellierung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen
6. Interviews mit technischen Experten aus den Betreiberunternehmen und weiteren Experten
7. Ermittlung des technischen Potenzials und der technischen Perspektive des Prozesses und Hochrechnung auf die betriebenen Anlagen
8. Diskussion und Validierung in den branchenspezifischen Expertennetzwerken
9. Herausarbeiten der branchenspezifischen und branchenübergreifenden Aspekte
10. Modellierung der regionalen Verteilung in Deutschland



Abbildung 1.2:  
Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe

	2020	2030	2040
<b>1</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Kurzzeitige Anpassung</li> <li>Geringe Vorankündigungszeit</li> </ul>	✓	✓	✓
<b>2</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verschiebung über 3 – 12 Std.</li> <li>1 Tag Vorankündigungszeit</li> </ul>	(✓)	✓	✓
<b>3</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lastreduktion über 1 – 5 Tage</li> <li>2 – 5 Tage Vorankündigungszeit</li> </ul>	✗	(✓)	✓

Flexibilitätspotenzial  
Flexibilitätperspektive

Abbildung 1.8:  
Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren der übergeordneten SynErgie-Analyse

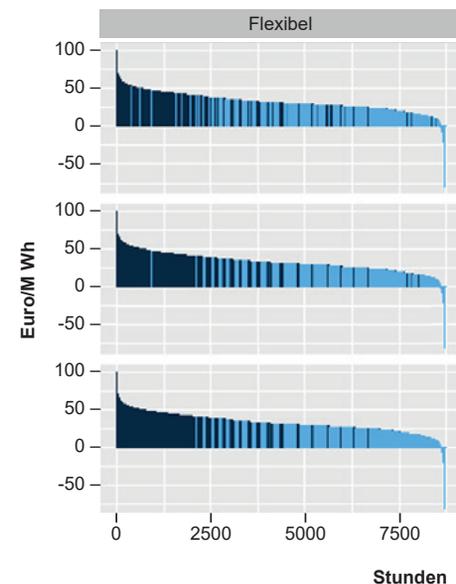


Abbildung 7.6:  
Preisdauerlinien mit und ohne Nachtschichtbegrenzung

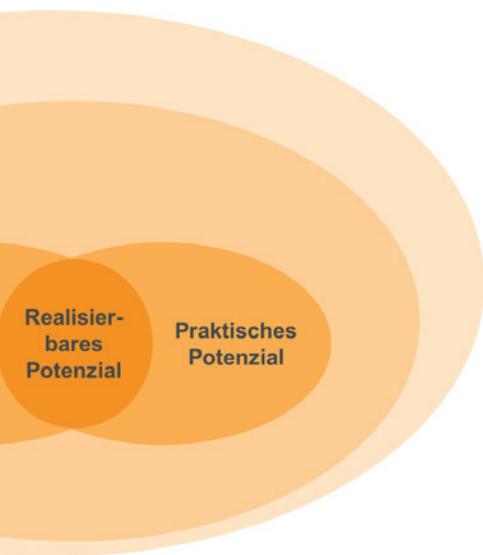


Abbildung 1.6:  
Zeitlich-organisatorische Hemmnis-Ebenen

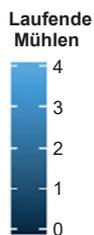
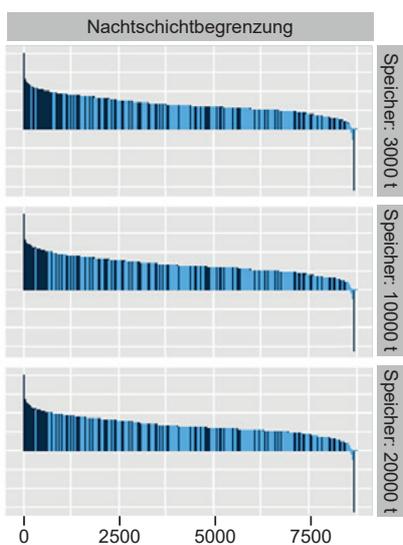


Abbildung 9.1:  
Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland

unter verschiedenen Speicherszenarien

## LISTE DER AUTOREN

**Karin Arnold**

Wuppertal Institut für Klima,  
Umwelt, Energie gGmbH,  
Wuppertal

**Florian Ausfelder**

DECHEMA Gesellschaft für  
Chemische Technik und  
Biotechnologie e. V.,  
Frankfurt am Main

**Christian Dannert**

Forschungsgemeinschaft  
Feuerfest e. V., Höhr-Grenzhausen

**Ralph-Uwe Dietrich**

Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e. V., Stuttgart

**Christa Dufter**

Forschungsgesellschaft für  
Energiewirtschaft mbH,  
München

**Hanna Ewa Dura**

DECHEMA Gesellschaft für  
Chemische Technik und  
Biotechnologie e. V.,  
Frankfurt am Main

**Stefan Estelmann**

Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e. V., Stuttgart

**Bernhard Fleischmann**

Hüttentechnische Vereinigung  
der Deutschen Glasindustrie e. V.  
(HVG), Offenbach am Main

**Anna Gruber**

Forschungsgesellschaft für  
Energiewirtschaft mbH,  
München

**Andrej Guminski**

Forschungsgesellschaft für  
Energiewirtschaft mbH,  
München

**Georg Holtz**

Wuppertal Institut für Klima,  
Umwelt, Energie gGmbH,  
Wuppertal

**Tomke Janßen**

Wuppertal Institut für Klima,  
Umwelt, Energie gGmbH,  
Wuppertal

**Olaf Krause**

Hochschule Koblenz,  
Höhr-Grenzhausen

**Karsten Neuhoff**

Deutsches Institut für  
Wirtschaftsforschung e. V., Berlin

**Clara Orthofer**

Technische Universität München,  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft  
und Anwendungstechnik

**Roland Pietruck**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut  
(BFI), Düsseldorf

**Jörn Richstein**

Deutsches Institut für  
Wirtschaftsforschung e. V., Berlin

**Serafin von Roon**

Forschungsgesellschaft für  
Energiewirtschaft mbH, München

**Holger Rosemann**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut  
(BFI), Düsseldorf

**Johannes Ruppert**

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut  
der Zementindustrie, Düsseldorf

**Antje Seitz**

Deutsches Zentrum für Luft-  
und Raumfahrt e. V., Stuttgart

**Marten Sprecher**

Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

**Kevin Treiber**

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut  
der Zementindustrie, Düsseldorf

**Hartmut Wuthnow**

Forschungsgemeinschaft  
Feuerfest e. V., Höhr-Grenzhausen

## BETEILIGTE PROJEKTPARTNER

VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI),  
Düsseldorf



DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e. V.,  
Frankfurt am Main



Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V.,  
Berlin



Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.,  
Stuttgart



Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V.,  
Höhr-Grenzhausen



Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH,  
München



Hüttentechnische Vereinigung  
der Deutschen Glasindustrie e. V. (HVG),  
Offenbach am Main



Technische Universität München,  
München



VDZ gGmbH, Forschungsinstitut  
der Zementindustrie,  
Düsseldorf



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt,  
Energie gGmbH,  
Wuppertal



## VORWORT

Die Kopernikus-Projekte wurden vom BMBF initiiert um zentrale Fragestellungen rund um die Energiewende zu bearbeiten und Lösungen in den entsprechenden Bereichen von den Grundlagen bis hin in die Anwendung zu entwickeln. Insgesamt wurden vier Projekte: P2X, E-Navi, Ensure und SynErgie ausgewählt.

Das Kopernikus-Projekt „SynErgie – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung“, untersucht die möglichen Beiträge industrieller Prozesse in dem Umfeld einer zunehmend fluktuierender werdenden Stromversorgung, insbesondere mit Blick auf die Ermittlung von Flexibilitätspotenzialen.

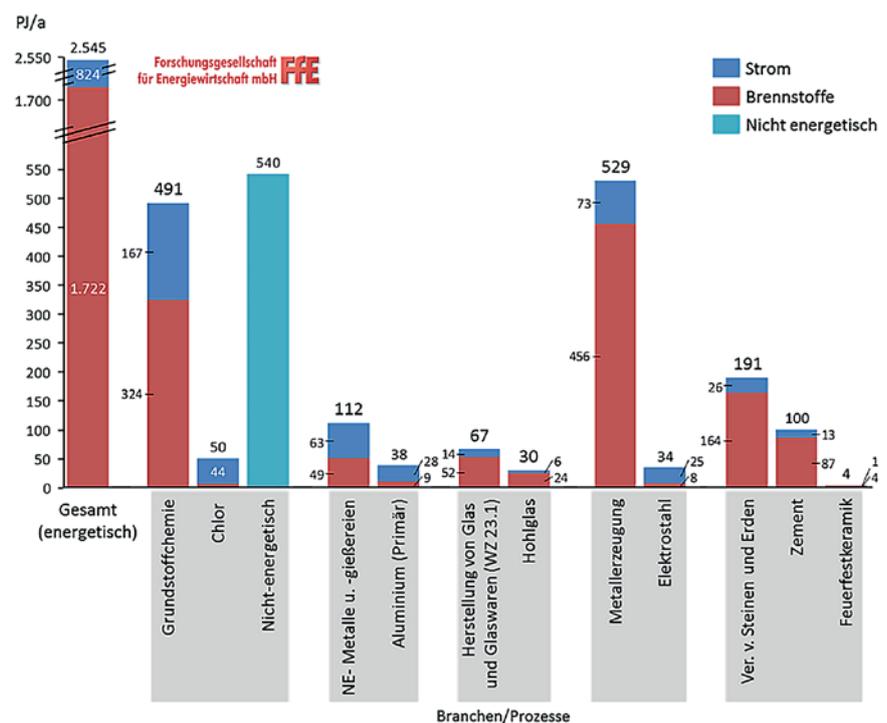
Aus dem nicht zum Zuge gekommenen Konkurrenzprojekt „INFLUX – Optionen der industriellen Produktion zur Nutzung einer fluktuierenden Bereitstellung erneuerbarer Energien“ wurde ein kleiner Teil aus der geplanten Potenzialanalyse in das SynErgie Projekt in Form des Arbeitspakets AP V.6 „Flexibilitätsoptionen und Perspektiven in der Grundstoffindustrie“ integriert.

Dieses Arbeitspaket legt mit diesem Bericht die Ergebnisse der Arbeiten aus dem ursprünglich bewilligten 15-monatigen Förderungszeitraum vor.

Die energieintensive Grundstoffindustrie (Metallerzeugung, Chemie, Papier, Zement, Glas, Keramik) ist verantwortlich für rund  $\frac{3}{4}$  des industriellen Energieverbrauchs und über die Hälfte des industriellen Stromverbrauchs in Deutschland, vgl. Abbildung 1. Dies ist auf die energieintensiven Prozesse der chemischen und physikalischen Materialumwandlungen zurückzuführen.

Abbildung 1: Energieeinsatz in der Grundstoffindustrie 2015 (AGEB, FhG ISI)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> C. Rohde, FhG ISI, „Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2016 Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) – Entwurf“, Karlsruhe 2017 und eigene Berechnungen. Online verfügbar unter: [https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article\\_id=29&fileName=isi\\_-\\_einzelbericht\\_industrie\\_2013\\_-\\_2016.pdf](https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=isi_-_einzelbericht_industrie_2013_-_2016.pdf)



Gleichzeitig sind die Prozesse der verschiedenen Branchen sehr divers und auch die Implementierung eines Prozesses variiert stark zwischen verschiedenen Standorten. Eine Erfassung des Flexibilitätpotenzials über eine einfache Hochrechnung würde daher kein verlässliches Ergebnis liefern. In dem Arbeitspaket wurde daher ein branchenübergreifender Ansatz gewählt, in dem sich (branchenspezifisches) technisches und methodisches Know-how optimal ergänzen.

Die einzelnen Branchen sind durch die Forschungseinrichtungen der Verbände bzw. die wissenschaftlich-technischen Vereine der Branchen vertreten. Diese bringen ein tiefes Prozessverständnis, genaue Kenntnisse der Branche und ein Expertennetzwerk ein, so dass eine korrekte Einordnung der Ergebnisse aus den Befragungen einzelner Experten oder Unternehmen ermöglicht wird. Die akademischen Partner bringen methodisches Know-how und ihre inhaltliche Schwerpunkte in die Beantwortung der Forschungsfragestellungen ein.

In dieser Kombination ist es möglich das Thema integriert branchenübergreifend und branchenspezifisch zu erfassen und zu bearbeiten. Dabei werden die Gemeinsamkeiten ebenso wie die Unterschiede deutlich, ohne dass eine verkürzte Perspektive die Komplexität der Fragestellungen innerhalb der Branchen vernachlässigt.

Im vorliegenden Bericht wird die gemeinsam mit den Partnern im Cluster V des SynErgie-Projektes erarbeitete Vorgehensweise zur Ermittlung von Flexibilitätpotenzialen dargestellt. Die folgenden Kapitel beschäftigen sich mit den ausgewählten Prozessen aus den beteiligten Branchen (Stahl, Zement, Glas, Chemie und Feuerfest), bevor im letzten Teil eine branchenübergreifende Auswertung und eine Einordnung der Ergebnisse erfolgt.

Die Herausgeber möchten im Namen aller beteiligten Partner im AP V.6 dem BMBF, insbesondere Herrn Dr. Christoph Rövekamp, für die Förderung dieser Arbeiten, den Vertretern des PTJ für die Begleitung des Vorhabens, den Kollegen des SynErgie-Projektes, insbesondere den Koordinatoren, der Geschäftsstelle und den anderen Partnern im Cluster V, für die gute Zusammenarbeit sowie den Experten aus den Unternehmen und in den Netzwerken für die Mitarbeit und kritische Unterstützung ganz herzlich danken.

Wir hoffen, dass der vorliegende Text in Ihnen aufmerksame Leser findet und einen wertvollen sachlichen Beitrag zur gesellschaftlichen Diskussion über Flexibilitätsoptionen darstellt.



**Dr. Florian Ausfelder**  
DECHEMA Gesellschaft  
für Chemische Technik und  
Biotechnologie e. V.



**Dr. Antje Seitz**  
Deutsches Zentrum für  
Luft- und Raumfahrt e. V.



**Dr. Serafin von Roon**  
Forschungsgesellschaft für  
Energiewirtschaft mbH

## EXECUTIVE SUMMARY

The continuous expansion of fluctuating renewable electricity generation within the power sector, mainly from photovoltaic and wind power, will lead to a strong temporal and spatial variation in the supply of renewable electricity in the power grid. This causes novel challenges for a power system that so far is designed to match current demand with electricity generation by fossil-based power plants.

The role of conventional electricity generation will shift from providing base load towards complementing fluctuating renewable electricity generation. Additionally, it is foreseeable that there will be more occasions, when renewable electricity generated exceeds the current demand.

Next to the challenge of efficient management of overall supply, the question remains on to which extent the consumption of electricity can be matched to the temporally and spatially available supply.

The different production processes of the energy-intensive process industries (metal production, chemicals, cement, glass and ceramics) are mainly based on fuels for their energy input; however they are also responsible for about  $\frac{2}{3}$  of the industrial consumption of electricity in Germany. These processes might therefore have the largest leverage to provide flexibility to the power sector.

This analysis investigates key processes from the industry sectors steel, glass, cement, chemicals and refractory materials with respect to their options to provide flexibility in the use of electricity. A common methodology (chapter 1) was developed and applied to unify definitions and terms, as well as methods for data collection and evaluation.

An unambiguous definition and a clear distinction of different concepts of “potentials” are central for this study. The “theoretical” potential for flexibility describes the difference between the full load and the actual load of a plant at any point in time. The “technical” potential for flexibility considers operating conditions like safe process windows. In this study, an additional constraint is introduced, which stipulates that quantity and quality of production remain constant. The “economic” potential for flexibility is constrained by economic consideration of the enterprise, while the “practical” potential for flexibility is limited by constraints like regulatory constraints, work schedules, etc. Within this layered structure, the “feasible” potential for flexibility of a given process or plant is defined as the intersection of economic and practical potentials for flexibility. Currently available flexibility options are defined as potentials for flexibility, while possible future developments are defined as perspectives for flexibility.

The potentials for flexibility, i.e. the options to vary the operation of a process or plant to offer flexibility, are structured according to three temporal flexibility profiles that are based on expected developments of the future power supply. Flexibility profile 1 describes a compensation of a short-term variation in the load profile for 15 min with short-timed advance notice. Flexibility profile 2 mirrors diurnal variations in the load profile and requests compensation for 3–12 hours and an advance notice

of a day. Flexibility profile 3 addresses the issue of “dark doldrums”, i.e. a situation with little or no wind or solar power contribution to the grid, with compensation of 1–5 days and several days of advance notice.

This study reports quantitative technical potentials and perspectives for flexibility on the investigated processes individually and extrapolated for Germany. Additional aspects affecting the other potentials and perspectives are raised and discussed qualitatively.

Possible constraints for tapping into these potentials are identified and structured into the layers of “market environment and customer relations”, “in-house organization” and “technical plant”. These layers of constraint are significantly characterized by the “regulatory framework” under which the enterprise operates.

A model-based economic analysis focusses on entrepreneurial opportunities for decision making to minimize electricity costs at given production and sales volume under varying regulatory frameworks and practical constraints, such as shift constraints and limited foresight.

Furthermore, the validity of the temporal flexibility profiles and their possible cost structures are analyzed with historical market data and potential model-based future developments of the electricity market.

Within each energy-intensive industry sector, steel, glass, chemicals, cement and refractory materials, one process was selected, based on its importance within the sector, its electricity consumption and its suspected technical feasibility to provide flexibility.

Each of these processes is described with their technical properties within the corresponding chapters. Their options to provide flexibility were discussed intensively with selected technical experts from the operating companies, who provided the basic data for an estimation of potentials and perspectives for flexibility, as well as additional aspects and constraints.

These findings were then consolidated with technical experts within expert sector networks with respect to being representative and valid. These consolidated findings are the base for the quantitative assessment of potentials and perspectives for flexibility.

Within steel industry (chapter 2), the electric arc furnace is investigated. In Germany, roughly one third of the crude steel production is produced via this process. Scrap is melted in electric arc furnaces and then processed in ladles, where additional metallurgical reactions are performed, before the liquid steel is subject to continuous or ingot casting. The required energy input via the electric arc into the steel is subject to numerous disruptions by individual process steps, like additional charging of scrap or blowing with technical gases. These disruptions however are not available for flexibility since they are characteristic of the temporal progression of the process. Overall, the power-on-time ratio is only about 50 %. An increase of load is generally not possible, since most electric arc furnaces are operated close to the upper production limit. Load reduction would reduce production, if no short time compensation is available. Within a continuous cast plant configuration one undisrupted work shift

of 8 hours generates a time window of 20 minutes, which would be available for flexibility, since the production capacity for continuous casting is in general slightly smaller than the production capacity of the electric arc furnace. This time window can address flexibility within flexibility profile 1, while flexibility profiles 2 and 3 lead to loss of production that cannot be compensated.

Within chapter 3, flexibility potentials and perspectives are discussed for the production process of container glass. This process is responsible for more than 50 % of the overall production volume of salable glass products in Germany. About  $\frac{3}{4}$  of these tank furnaces within the container glass industry are equipped with electric boosting (an auxiliary electric heating device), which supplies around 5–15 % of the required thermal energy to the melt, for melting coloured glass with high output. The electric boosting complements the main thermal input via combustion of natural gas. Glass melting furnaces are operated continuously over up to 15 years and more. During this time, there is no interruption of the glass melting process. However, within limits, a variation of the electrical thermal input via electric boosting is possible. Changes of electric load need to be compensated by respective adjustment of the thermal input via the combustion of fossil fuels. Deviations from the standard operating window are only possible within short-time periods as represented in flexibility profile 1. Longer time periods and associated major temperature variations, especially in the metal line, risk premature local corrosion damage on the refractory lining of the furnace.

Chapter 4 investigates the flexibility options by flexible operation of mills for raw meal and cement grinding within the context of integrated cement plants and grinding stations. These mills represent the largest electricity consumer in the cement industry. The milling process aims to achieve a homogenous distribution and at the same time compliance with required material specifications. In principle, a short shutdown of the mills is more feasible than a fast start-up on short notice, since the latter does not reach the required thermal conditions in the mill to comply with material specifications. Both mills are integrated within the overall clinker and cement production process chain but are sandwiched between silos for the raw materials and products before and after the mills respectively. The capacities of the silos provide options for some flexibility. The cement industry is subject to a seasonal variation of its production due to variations in demand by the construction industry. In high-season (spring to fall), cement plants are in some times operated at maximum capacity and then do not have practical potential to offer demand side flexibility. In low-season however, many plants operate below their maximum capacity and could use their mills to offer flexibility to the grid. Within a model-based approach by VDZ, all mills in Germany are considered and a statistical average was assessed for modeling the possible contribution of demand side flexibility. Potential to satisfy flexibility profile 1 can be provided. Flexibility profiles 2 and 3 can normally be addressed at low-season and times of partial capacity use.

Chapter 5 investigates the chlorine-alkaline electrolysis, chemical industry's largest electrical energy consumer. It is operated in three different process variants: Mercury-process, diaphragm-process and the membrane process. The chlorine product is continuously processed by its down-stream processes depending on the specific configuration of the

integrated plant site. Several different technical flexibility options are available for the chlorine-alkaline electrolysis. All options are analyzed with respect to their respective technical potential for flexibility and estimated costs are derived: Operation of the plant between maximum and minimum load, buffering of production with optional chlorine storage, operating the electrolysis in combination with an external battery as virtual power plant, buffering production via ethylene dichloride as storable intermediate within the polyvinylchloride production process chain and operation of switchable oxygen depletion cathodes in the membrane variant of the chlorine-alkaline electrolysis. All options can supply positive flexibility within flexibility profile 1. In general, this leads to loss of production however, since the average plant use of over 95 % prevents offering negative flexibility and the compensation of production loss by increased production. Utilizing ethylene dichloride as intermediate storage allows positive flexibility (i.e. reduction of load) in all flexibility profiles. The overall effect of operating an oxygen depletion cathode, depending on the operation mode, is a symmetric potential and perspective for flexibility, i.e. positive and negative flexibility are available to the same extent on all flexibility profiles. The main factors in the cost evaluation are the loss of added value by loss of production, required investment costs and loss of preferential treatment with respect to grid fees.

Chapter 6 focusses on the production of synthetic raw materials via a raw materials melting furnace for the production of refractory materials. These melting processes require very high temperatures of up to 3000 °C. This study investigates an electric arc furnace for the production of fused corundum. The furnace is usually operated with an electrical load between 3,2 and 3,7 MW. The required energy input depends on the enthalpy for melting the product. Negative flexibility can be offered within flexibility profile 1, with a notice period of one hour by increasing the electrical load of the furnace to up to 4 MW. Positive flexibility can be provided by reducing the electrical load or by short-timed turning-off the furnace, if the shed load can be recovered within one production cycle of four hours. Cooling-down and solidification of the melt has to be avoided at any cost. Both raw materials and products are solids and can be stored for later use in silos. Therefore, pre- and subsequent processing does not limit the flexibility options.

A model-based economic analysis in chapter 7 focusses on the options for entrepreneurial decision making to minimize electricity cost at given production and sales volume, considering the regulatory framework and practical constraints like shift planning and limited foresight.

Chapter 8 presents a cross-sectorial assessment based on the sector-specific analyses of the previous chapters. The technical potentials for flexibility of the investigated processes are shown in table 1.

An overview on how the flexibility of the processes under consideration can currently contribute towards the defined flexibility profiles is given in table 2.

Table 1: Comparison of technical flexibility potentials (positive: Load reduction, negative: Load increase) of the investigated processes.

	<b>Electric arc furnace</b>	<b>Container glass production</b>	<b>Raw mill and cement grinding</b>	<b>Chlorine-alkaline-elektrolysis</b>	<b>Raw materials melting furnace</b>	
<b>Framework</b>	Continuous cast plant operating at full capacity	Continuous production for up to 15 years and more	Grinding station and integrated cement plant	Partial load possible chlorine storage, ethylene dichlorid storage	Operating at full capacity	
<b>Operation at partial load possible</b>	No	Boosting electrodes: Yes	No	Yes	Yes	
<b>Technical potential for flexibility</b>	<b>Mean value<sup>1</sup> / median<sup>2</sup></b>		One large mill in flexible operation: Positive: ca. 3 MW Negative: ca. 3 MW	Positive: 13 MW <sup>2</sup> Negative: 1 MW <sup>2</sup>	Positive: 0,3 MW Negative: 0,2 MW	
	<b>Range (min – max)</b>		Positiv: 0-11 MW <sup>3</sup> Negativ: 0-8 MW <sup>3</sup>	Positive: 0-77 MW Negative: 0-4 MW	Positive: 0-4 MW Negative: 0-0,5 MW	
	<b>Potential in Germany (Number of production units   Availability)</b>	Positive:766 MW Negative: – (26   52 %)	Positive: 25 MW Negative: 25 MW (≈60 furnaces   ≤75 %)	One large mill per plant in flexible operation: Positive: 172 MW Negative: 172 MW (55   Seasonal)	Positive: 421 MW Negative: 15 MW (21   95 %)	Positive: 23 MW Negative: 3 MW (13   45 %)
	<b>Duration of recall</b>	Several minutes	Minutes	Up to 12 h depending on plant capacity use and product stock, sometimes longer	Partial Load: 15 min. EDC-storage: Up to several days	Positive: 5–60 min. Negative: 15 min.
	<b>Frequency of recall</b>	Several times a day	Depending on duration up to several times a day	Several times a day possible	Several times a day	Several times a day
<b>Characteristic attributes of the process</b>	Availability for flexibility difficult to project	Variation of electrical load has to be compensated by input of fossil fuel	Strong seasonal dependence, minimum operation time 4 h	Strong integration with up- and downstream processes. Flexibility depends on ability for storage of intermediates	Continuous batch process	

<sup>1</sup> Mean value; <sup>2</sup> Median; <sup>3</sup> Maximum value for integrated cement plant, sum of raw material and cement grinding.

Table 2: Process compliance towards the defined flexibility profiles in consultation with the plant manager under consideration of the currently high degrees of capacity utilization, delivery commitments towards the customers and without additional investments.

Sector	Process (process chain)	Flexibility profile 1 -Short-term compensation of load -Load change period: 15 min -Advance notice: Several minutes	Flexibility profile 2 -Compensation of load for several hours -Load change period: 3–12 h -Advance notice: 1 day	Flexibility profile 3 - Reduction of load for several days -Load change period: 1–5 days -Advance notice: 2–5 days
Steel	Electric arc furnace (continuous casting)	(✓) <sub>pos</sub>	✗	✗
	Electric arc furnace (continuous and ingot casting)	✗	✗	✗
Glass	Tank furnaces (electric boosting)	(✓) <sub>pos and neg</sub>	✗	✗
Cement	Cement mills	(✓) <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos and neg</sub>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>
	Raw mix mills	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	✗
Chemicals	Chlorine-alkaline-aelektrolysis (without storable intermediates)	✓ <sub>pos</sub>	✗	✗
	Chlorine-alkaline-aelektrolysis (EDC production)	✓ <sub>pos</sub>	✓ <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos</sub>
Refractory Materials	Raw materials melting furnace	(✓) <sub>pos and neg</sub>	✗	✗

✓ Can be fulfilled

(✓) Can only be fulfilled at certain times, due to process-chain specific constraints

✗ Cannot be fulfilled

S Can only be fulfilled at certain plant sites

pos/neg Dominant type of flexibility, positive: Reduction of load, negative: Increase of load. In case of high degrees of capacity utilization, mainly asymmetric flexibility can be provided, since large but short reductions of load must be compensated by small but long increases of load.

Additionally, specific constraints preventing tapping into the identified technical potentials for flexibility and macroeconomic aspects are discussed. Furthermore, technical developments which might lead to a higher technical potential for flexibility for the processes covered are presented.

Chapter 9 addresses aspects of spatial distribution of the processes under investigation. Moreover, the relation between the spatial distribution and the residual load – difference between load and volatile electricity generation from wind and photovoltaics – is analyzed. In some hours, critical situations could be mitigated by appropriate calls for flexibility. However, it must be avoided that the subsequent compensation of such flexibility calls exacerbates critical situations in other hours.

Chapter 10 summarizes the methodology and the main sector-specific and cross-sectorial results and placed into the context of future work. The main cross-sectorial results are:

1. Fulfilling the delivery commitment towards the customers is always of higher priority than providing flexibility.
2. Within the processes of the energy intensive process industries, there is an opposing trend of energetic efficiency versus flexibility.
3. Changes and variations of process conditions lead to changes in product quality.
4. The interdependencies between frequent, fast load changes and their effects on the plant and its critical plant components have not been sufficiently investigated yet.
5. Options for flexibility are site-dependent on the respective process chains and the opportunities to store some intermediate product within the process chain.
6. Potentials for load increase are very small if the process is operated close to maximum capacity. Potentials for load reduction without subsequent compensation are generally subject to loss of production.
7. In case of shift load operation, production loss needs to be recovered within a short period of time.
8. Possible loss of preferential treatment or its extent to negotiate individual grid fees according §19 Abs. 2 (StromNEV) is a major constraint for enterprises to offer flexibility.
9. The enterprises within the energy-intensive process industries insist on the primacy of operating needs with respect to external recalls for flexibility.
10. Longterm investments will only be enacted, if sufficient conditions are met for sufficient planning reliability.
11. Technical process limitations are in general not the critical constraints to offer flexibility.

Notwithstanding the diversity of the processes under investigation in this study, these results mirror the main challenges for the energy-intensive process industries in face of adapting towards increasing input of fluctuating renewable power generation into the power grid. At the same time, there are potentials for flexibility beyond the currently utilized ones. The extent to which these potentials and perspectives are tapped into is critically depending on how regulatory frameworks are designed.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der zunehmende Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien zur Stromerzeugung, im Wesentlichen Photovoltaik und Windenergie, führt absehbar zu starken zeitlichen und auch örtlichen Variationen des Angebots erneuerbar erzeugter Elektrizität im Stromnetz. Damit ergeben sich grundsätzlich neue Herausforderungen für ein Stromsystem, das bisher bedarfsgeführt das Angebot an elektrischer Energie durch einen konventionellen Kraftwerkspark angepasst hat.

Der konventionelle Kraftwerkspark übernimmt statt der Bereitstellung einer Grundlast zunehmend eine komplementäre Funktion und kompensiert erneuerbare fluktuierende Stromerzeugung. Darüber hinaus sind auch immer häufiger Zeiträume absehbar, in denen die erneuerbare Stromerzeugung über den aktuellen Bedarf an Strom hinausgeht.

Neben der Herausforderung der effizienten Steuerung des Angebots stellt sich auch die Frage, in welchem Umfang der Verbrauch an elektrischer Energie dem zeitlich und örtlich vorhandenen Angebot angepasst werden kann.

Die verschiedenen Prozesse der energieintensiven Grundstoffindustrie (Metallerzeugung, Chemie, Papier, Zement, Glas und Keramik) basieren überwiegend auf Brennstoffen als Energieeintrag, dennoch sind sie verantwortlich für rund  $\frac{2}{3}$  des industriellen Stromverbrauchs in Deutschland. Damit stellen diese Prozesse potenziell den bedeutendsten Hebel für eine Flexibilisierung des Stromsystems dar.

In dieser Analyse werden zentrale Prozesse aus den Branchen Stahl, Glas, Zement, Chemie und Feuerfest hinsichtlich ihrer Flexibilisierungsoptionen untersucht. Für die einheitliche Bewertung der Flexibilitätsoptionen wird eine einheitliche Begrifflichkeit und Methodik der Datenerhebung und -bewertung entwickelt und angewendet. Diese ist im Kapitel 1 „Methodisches Vorgehen und Voruntersuchungen zu Flexibilitätspotenzialen“ ausgeführt.

Zentral ist dabei die eindeutige Definition und Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe. Das theoretische Flexibilitätspotenzial beschreibt die Lastdifferenz einer abgeschalteten Anlage im Vergleich zu einer durchschnittlich betriebenen Anlage. Das technische Flexibilitätspotenzial berücksichtigt technische Randbedingungen, wie den sicheren Betrieb der Anlage. Darüber hinaus wird in dieser Studie vorausgesetzt, dass die Produktionsmenge und die Produktqualität gleich bleiben. Das wirtschaftliche Flexibilitätspotenzial wird begrenzt durch betriebswirtschaftliche Faktoren, während das praktische Flexibilitätspotenzial durch Hemmnisse, wie z.B. Regularien, Arbeitsordnungen etc. limitiert wird. In dieser Struktur bildet die Schnittmenge des praktischen und wirtschaftlichen Flexibilitätspotenzials das realistische Flexibilitätspotenzial, was für eine gegebene Anlage zugänglich ist. Aktuell verfügbare Optionen werden als Flexibilitätspotenziale definiert, während ggfs. zukünftig verfügbare Optionen als Flexibilitätsperspektiven ausgewiesen werden.

Das Flexibilitätspotenzial, d.h. die Möglichkeiten der Flexibilisierung der Anlage, wird strukturiert nach drei Anforderungsprofilen, die sich an den

zu erwarteten Herausforderungen der zukünftigen Stromversorgung orientieren. Anforderungsprofil 1 entspricht einer kurzfristigen Variation der abgerufenen Leistung (15 Minuten) zur Kompensation einer kurzfristigen Fluktuation der Stromerzeugung mit geringer Vorankündigungszeit. Anforderungsprofil 2 orientiert sich an tageszeitlichen Schwankungen der erneuerbaren Stromerzeugung und entspricht einer Abrufdauer von 3–12 Stunden bei einer Ankündigungszeit von rund einem Tag. Anforderungsprofil 3 hingegen erfasst Ereignisse wie eine „Dunkelflaute“ mit Abrufdauern von 1–5 Tagen und mehreren Tagen Vorankündigungszeit.

Diese Untersuchung weist die technischen Flexibilitätspotenziale, bzw. -perspektiven für die untersuchten Prozesse quantitativ aus und ermittelt dieses Potenzial auch für die in Deutschland betriebenen Prozesse. Weiterführende Aspekte zur Erfassung der anderen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven werden qualitativ erfasst und dargestellt.

Die möglichen Hemmnisse für eine Nutzung des identifizierten Potenzials werden durch eine Einteilung in die Hemmnis-Ebenen „Marktumfeld und Kundenbeziehungen“, „Innerbetriebliche Organisation“ und „Technische Anlage“ erfasst und strukturiert. Diese Hemmnis-Ebenen werden von der vierten Hemmnis-Ebene „Regulatorische Rahmenbedingungen“ maßgeblich geprägt und beeinflusst.

Die modellgestützte wirtschaftliche Analyse fokussiert sich auf die unternehmerischen Entscheidungsmöglichkeiten zur Minimierung der Strombeschaffungskosten bei gegebenen Produktions- und Verkaufsmengen unter Berücksichtigung eines gegebenen regulatorischen Rahmens.

Weitergehend werden die Validität der Anforderungsprofile und deren mögliche Kostenstrukturen auf dem Strommarkt durch eine Analyse der historischen Marktdaten und möglicher, modellgestützter zukünftiger Entwicklungen des Strommarktes untersucht.

Aus den Branchen der energieintensiven Grundstoffindustrien Stahl, Glas, Zement, Chemie und Feuerfest wurde jeweils ein Prozess ausgewählt, der aufgrund seiner Bedeutung und Verbreitung in der jeweiligen Branche, seines elektrischen Energiebedarfs und seiner technischen Voraussetzungen als prinzipiell interessant und geeignet für die Bereitstellung von Flexibilität eingeschätzt wird.

Diese Prozesse werden mit ihren technischen Eigenschaften in den jeweiligen Kapiteln detailliert beschrieben. Mit Experten aus ausgewählten Unternehmen wurden die möglichen Flexibilitätsoptionen intensiv diskutiert und die Datengrundlage für eine Abschätzung der Flexibilitätspotenziale, -perspektiven und die Diskussion weitergehender Aspekte und Hemmnisse erhoben.

Diese Erkenntnisse wurden mit den technischen Experten innerhalb der Branchennetze auf ihre Repräsentativität und Gültigkeit abgestimmt und bilden die Grundlage für die quantitativen Abschätzungen des technischen Flexibilitätspotenzials und der technischen Flexibilitätsperspektiven.

Im Kapitel 2 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven des Elektrolichtbogenofen“ wird der Elektrolichtbogenofenprozess für die Eisen- und Stahlherstellung analysiert. Mit diesem Prozess wird rund ein Drittel des Rohstahls in Deutschland produziert. Dabei wird Schrott in einem Elektrolichtbogen aufgeschmolzen, in einen Pfannenofen überführt und nach weiteren metallurgischen Schritten im Strang- und gegebenenfalls Blockguss weiterverarbeitet. Dabei wird der notwendige Energieeintrag in den Schrott durch den Elektrolichtbogen immer wieder aufgrund einzelner Prozessschritte, wie zum Beispiel erneutes Chargieren oder Gaseintrag, unterbrochen. Diese Unterbrechungen sind aber für eine Flexibilitätsbereitstellung nicht verfügbar, da ihre Taktung aus dem Prozess entsteht und keine zeitlichen Verschiebungen erlaubt. Insgesamt führt diese Betriebsweise zu einem Power-on Zeit Verhältnis von nur 50 %. Eine erhöhte Leistungsaufnahme ist in der Regel nicht möglich, da der Elektrolichtbogenofen unter Vollast betrieben wird, wenn er eingeschaltet ist. Eine Lastreduktion führt zu Produktionsausfall, wenn diese nicht in relativ kurzer Zeit nachgeholt werden kann. In einer Konfiguration mit nachfolgendem Strangguss kann innerhalb einer störungsfreien Schicht (8 Stunden) ein Zeitfenster von 20 Minuten für Flexibilität erzielt werden, da die Produktionskapazität der Strangguss-Anlage i.d.R. leicht unter der des Elektrolichtbogenofens dimensioniert ist. Dies ermöglicht prinzipiell das Anbieten von Flexibilität im Anforderungsprofil 1. Anforderungsprofil 2 und 3 führen zu Produktionsverlusten, die nicht mehr nachgeholt werden können.

Die Behälterglasherstellung, beschrieben im Kapitel 3 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Behälterglasherstellung“, stellt mit einem Produktionsmengenanteil von über 50 % an der Gesamtmenge des verkaufsfähigen Glases einen bedeutenden Prozess in der Glasindustrie dar. Viele (rund  $\frac{3}{4}$ ) der Behälterglasschmelzwannen sind mit einer elektrischen Zusatzheizung ausgestattet, die ca. 5–15 % der benötigten Heizenergie zur Schmelze des Glases beitragen kann und den Hauptenergieträger Erdgas ergänzt. Glasschmelzwannen werden kontinuierlich über Zeiträume von bis zu 15 Jahren und mehr betrieben und eine Unterbrechung des Schmelzvorganges ist nicht möglich. Eine eingeschränkte Variation des elektrischen Energieeintrags über die elektrische Zusatzheizung ist möglich. Eine elektrische Laständerung muss durch eine entsprechende Variation des fossilen Brennstoffes kompensiert werden. Eine Abweichung vom „normalen“ Betriebsfenster ist nur über relativ kurze Zeiträume, d.h. im Rahmen des Anforderungsprofils 1 möglich. Über längere Zeiträume besteht auch die Gefahr von lokalen vorzeitigen Korrosionsschäden an der Feuerfestauskleidung der Schmelzwanne.

Das Kapitel 4 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Roh- und Zementmahlung“ untersucht den Einsatz von Rohmühlen zur Mahlung des Rohmehls und Zementmühlen zur Mahlung des Zements in der integrierten Zementherstellung und in Zementmahlwerken. Diese Mühlen sind die bedeutendsten Stromverbraucher in der Zementindustrie. Der Mahlvorgang zielt auf eine möglichst homogene Verteilung und die Einhaltung spezifischer Materialspezifikationen ab. Prinzipiell ist ein kurzfristiges Abschalten der Mühlen eher möglich als ein kurzfristiges Anfahren, da sich bei Letzterem nicht die thermischen Bedingungen in der Mühle einstellen, die für die Einhaltung der Qualitätsanforderungen notwendig sind. Die Mühlen sind mit Silos für die Vorprodukte und Mahlprodukte in die Prozesskette integriert, so dass die Silokapazitäten

eine gewisse Flexibilität zulassen. Die Zementindustrie unterliegt einem saisonalen Produktionszyklus, der durch die Aktivitäten der Bauindustrie bestimmt wird. In der Hochsaison (Frühjahr-Herbst) produzieren die Zementwerke während einiger Zeit unter Volllast und weisen dann praktisch kein Flexibilisierungspotenzial auf. In der Nebensaison arbeiten viele Werke unter Teillast und können mit den Mühlen Flexibilität anbieten. Im Rahmen des VDZ-Modells wurden alle Mühlen in Deutschland im statistischen Durchschnitt erfasst und ihr möglicher Beitrag zur Flexibilität modelliert. Zu dem Anforderungsprofil 1 kann zu Betriebszeiten der Mühlen im ganzen Jahresverlauf ein Flexibilitätsbeitrag geleistet werden. Den Anforderungsprofilen 2 und 3 kann normalerweise entsprochen werden, wenn die Anforderungen in der Nebensaison oder in Zeiten teilweiser Auslastung anfallen.

Das Kapitel 5 „Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse“ befasst sich mit den größten einzelnen Stromverbrauchern in der chemischen Industrie. Sie wird in den Verfahrensvarianten der Amalgam-, Diaphragma- und Membran-Elektrolyse betrieben. Chlor wird vor Ort im Rahmen der standortspezifischen Prozesskette weiterverarbeitet. Für die Chlor-Alkali Elektrolyse stehen verschiedene Flexibilitätsoptionen zur Auswahl. Alle Optionen wurden in Bezug auf ihr technisches Flexibilitätspotenzial analysiert und die Kosten abgeschätzt, nämlich: Betrieb der Anlage im Prozessfenster zwischen Volllast und minimaler Teillast, Pufferung der Produktion über einen eventuell vorhandenen Chlorspeicher, Betrieb der Elektrolyse in Kombination mit einer Batterie als virtuelles Kraftwerk, Pufferung der Produktion über Ethylendichlorid als speicherbares Zwischenprodukt der Polyvinylchlorid-Produktion sowie der Einsatz von schaltbaren Sauerstoffverzehrkathoden in der Membran-Elektrolyse. Alle diese Optionen können positive Flexibilität im Anforderungsprofil 1 anbieten, was in der Regel mit Produktionsverlust einhergeht, da die hohe Auslastung ( $\geq 95\%$ ) das Anbieten von negativer Flexibilität und damit ein auch Nachholen der Produktion verhindert. Die Nutzung von Ethylendichlorid als Zwischenspeicher ermöglicht das Anbieten von positiver Flexibilität (d.h. Lastreduktion) in allen Anforderungsprofilen. Der Einsatz der schaltbaren Sauerstoffverzehrkathode führt, je nach Betriebsstrategie, bis hin zu einem symmetrischen Flexibilitätspotenzial/-perspektive, d.h. positive und negative Flexibilität können im gleichen Umfang angeboten werden. Die wesentlichen Faktoren in der Kostenabschätzung sind der Wertschöpfungsverlust durch entgangene Produktion, notwendige Investitionen sowie eventuell der Wegfall der Begünstigung für individuelle Netzentgelte.

Im Kapitel 6 „Flexibilitätspotenziale und –perspektiven in einer Rohstoffschmelzanlage für Feuerfestmaterialien“ wird eine Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung synthetischer Rohstoffe für die Herstellung von Feuerfestmaterialien untersucht. Dafür werden sehr hohe Temperaturen von bis zu 3000 °C benötigt. In dieser Studie wurde ein Lichtbogenofen zur Herstellung von Schmelzkorund untersucht. Der Lichtbogenofen wird im Normalbetrieb mit einer Leistung zwischen 3,2 bis 3,7 MW betrieben. Der benötigte Energieeintrag ist durch die Schmelzenthalpie des Produktes definiert. Im Anforderungsprofil 1 kann mit einer Ankündigungszeit von einer Stunde eine negative Flexibilität durch Erhöhung der Ofenleistung auf bis zu 4 MW angeboten werden. Positive Flexibilität kann durch Absenken der Ofenleistung oder kurzzeitiges Abschalten angeboten werden, so die Leistung innerhalb des Produktionszyklus von vier Stunden nachgeholt werden kann. Ein Abkühlen und Erstarren der Schmelze ist unbedingt zu vermeiden. Sowohl die Eingangsstoffe als auch die Produkte sind als Feststoffe in Silos problemlos lagerbar und die Vor-/Weiterverarbeitung somit begrenzt nicht die Flexibilitätsoptionen.

Die modellgestützte wirtschaftliche Analyse im Kapitel 7 „Vergleich der wirtschaftlichen Potenziale ausgewählter Prozesse“ fokussiert sich auf die unternehmerischen Entscheidungsmöglichkeiten zur Minimierung der Strombeschaffungskosten bei gegebenen Produktions- und Verkaufsmengen unter Berücksichtigung von verschiedenen regulatorischen Rahmenbedingungen und praktischen Hemmnissen wie Schichtbegrenzungen und begrenzter Vorräusicht.

Im Kapitel 8 „Branchenübergreifende Auswertung“ wird eine integrierte Darstellung der Ergebnisse aus den branchenspezifischen Auswertungen durchgeführt. Die technischen Flexibilitätspotenziale der einzelnen untersuchten Prozesse ist in Tabelle 1 dargestellt.

Eine Übersicht über die Möglichkeiten der untersuchten Prozesse, im Rahmen der definierten Anforderungsprofile aktuell Flexibilität anzubieten, ist in Tabelle 2 dargestellt.

## XVIII ZUSAMMENFASSUNG

Tabelle 1: Vergleich der technischen Flexibilitäts-  
potenziale (positiv: Lastreduktion, negativ:  
Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse

	Elektrolicht- bogenofen	Glasschmelz- wanne mit elektrischer Zusatzheizung	Roh- und Zementmahlung	Chlor-Alkali- Elektrolyse	Rohstoff- schmelzanlage	
<b>Randbedingungen</b>	Stranggussanlage in ausgelastetem Werk	Kontinuierlicher Betrieb über bis zu mehr als 15 Jahre	Mahlwerk und integriertes Werk	Teillastbetrieb, Chlorspeicher, EDC-Speicher	Voll ausgelastete Anlage	
<b>Teillastbetrieb</b>	Nein	EZH: Ja	Nein	Ja	Ja	
<b>Technisches Flexibilitätspotenzial</b>	<b>Durchschnitt<sup>1</sup>/ Median<sup>2</sup></b>		eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: ca. 3 MW Negativ: ca. 3 MW	Positiv: 13 MW <sup>2</sup> Negativ: 1 MW <sup>2</sup>	Positiv: 0,3 MW Negativ: 0,2 MW	
	<b>Bereich (Min – Max)</b>		Positiv: 0-11 MW <sup>3</sup> Negativ: 0-8 MW <sup>3</sup>	Positiv: 0-77 MW Negativ: 0-4 MW	Positiv: 0-4 MW Negativ: 0-0,5 MW	
	<b>Potenzial für Deutschland (Anzahl Werke/ Anlagen   Verfügbarkeit)</b>	Positiv: 766 MW Negativ: – (26   52 %)	Positiv: 25 MW Negativ: 25 MW (≈60   ≤75 %)	je Werk eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: 172 MW Negativ: 172 MW (55   saison- abhängig)	Positiv: 421 MW Negativ: 15 MW (21   95 %)	Positiv: 23 MW Negativ: 3 MW (13   45 %)
	<b>Abrufdauer</b>	Wenige Minuten	Minuten	Bis zu 12 h abhängig von Betriebssituation und Produktvorrat ggf. länger möglich	Teillast: 15 Min. EDC-Speicher: bis zu mehreren Tagen	Positiv: 5-60 Min. Negativ: 15 Min.
	<b>Abrufhäufigkeit</b>	Mehrmals täglich	Je nach Abrufdauer, ggf. mehrmals täglich	Ggf. mehrmals täglich möglich	Mehrmals täglich	Mehrmals täglich
	<b>Besonderheiten des Prozesses</b>	Verfügbarkeit von Flexibilität nur bedingt planbar	Änderung der elektrischen Leistung muss durch Eintrag des fossilen Energieträgers substituiert werden	Starke Saisonalität; Mindestbetriebs- zeit von 4 h	Starke Einbindung in Prozessketten, Flexibilität abhängig von der Speicherbarkeit der Zwischen- produkte	Produktion in einem kontinuierlichen Chargenprozess

<sup>1</sup> Durchschnitt; <sup>2</sup> Median; <sup>3</sup> Maximalwert für ein integriertes Werk. Entspricht der Summe aus Roh- und Zementmahlung.

Tabelle 2: Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile in Abstimmung mit dem Betriebsleiter bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen

Branche	Prozess (Art der Prozesskette)	Anforderungsprofil 1 - Kurzfristige Anpassung der Last - Abrufdauer: 15 min - Vorankündigungszeit: wenige Minuten	Anforderungsprofil 2 - Verschieben der Last über mehrere Stunden - Abrufdauer: 3–12 h - Vorankündigungszeit: 1 Tag	Anforderungsprofil 3 - Reduktion der Last über mehrere Tage - Abrufdauer: 1–5 Tage - Vorankündigungszeit: 2–5 Tage
Stahl	Elektrolichtbogenofen (nur Strangguss)	(✓) <sub>pos</sub>	✗	✗
	Elektrolichtbogenofen (Strang- und Blockguss)	✗	✗	✗
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	✗	✗
Zement	Zementmühlen	(✓) <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>
	Rohmühle	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	✗
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	✓ <sub>pos</sub>	✗	✗
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (EDC-Produktion)	✓ <sub>pos</sub>	✓ <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos</sub>
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	✗	✗

✓ Erfüllbar

(✓) Abhängig von den spezifischen Anforderungen der Prozesskette nur zu bestimmten Zeiten erfüllbar

✗ Nicht erfüllbar

S Nur an wenigen Standorten erfüllbar

pos/neg Vorwiegende Art der verfügbaren Leistung, positiv: Lastminderung, negativ: Lasterhöhung. Bei hohen Auslastungen meistens asymmetrische Leistungsverfügbarkeit, da hohe, kurze Lastminderungen durch lange, geringe Lasterhöhungen ausgeglichen werden müssen.

Des Weiteren werden die spezifischen Hemmnisse für das Heben der identifizierten technischen Flexibilitätspotenziale und volkswirtschaftliche Aspekte diskutiert. Darüber hinaus wird ein Ausblick über flexibilitätsrelevante Entwicklungen für die beschriebenen Prozesse gegeben.

Im Kapitel 9 „Regionale Verteilung der untersuchten Prozesse“ wird auf die räumliche Konzentration der Prozesse eingegangen und deren Auswirkung auf den Effekt von verfügbarer Flexibilität zur Netzstabilisierung für verschiedene Szenarien modelliert.

Im Kapitel 10 „Fazit und Ausblick“ werden die Methodik und die wesentlichen branchenspezifischen und -übergreifenden Erkenntnisse zusammengefasst und im Kontext der weiterführenden Arbeiten dargestellt. Branchenübergreifend ergeben sich dabei folgende Erkenntnisse:

1. Die Einhaltung von Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden hat immer Priorität vor dem Anbieten von Flexibilität.
2. Es gibt für die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie eine gegenläufige Wechselwirkung zwischen energetischer Effizienz und Flexibilität.
3. Änderungen der Prozessbedingungen führen zu Veränderungen der Produktqualität.
4. Die Wechselwirkungen zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und deren Auswirkung auf die Anlagen und ihre kritischen Komponenten sind bisher nicht ausreichend untersucht.
5. Die Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind sehr stark von den standortspezifischen Prozessketten und den Möglichkeiten zur Produktspeicherung innerhalb der Prozesskette abhängig.
6. Die Potenziale zur Lasterhöhung bei hoher Produktnachfrage sind sehr gering, die Potenziale für eine Lastreduktion sind in der Regel mit Produktionsausfall verbunden.
7. Bei Lastverschiebung muss sichergestellt werden, dass ausgefallene Produktion innerhalb kürzerer Zeit nachgeholt werden kann.
8. Der mögliche Verlust der Berechtigung oder des Umfangs individueller Netzentgelte nach §19 Abs. 2 (StromNEV) stellt eine erhebliche Hürde für das Anbieten von Flexibilität dar.
9. Die Unternehmen der Grundstoffindustrie bestehen auf einem Primat der betrieblichen Erfordernisse gegenüber dem externen Aufruf von Flexibilitätsoptionen.
10. Für langfristig zu amortisierende Investitionen wird eine ausreichende Planungssicherheit benötigt.
11. Technische Limitierungen der Prozesse sind in der Regel nicht entscheidend für das Anbieten von Flexibilität.

Diese Ergebnisse spiegeln trotz der Diversität der betrachteten Prozesse die wesentlichen Herausforderungen der Grundstoffindustrien wider, sich dem zunehmenden Eintrag der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeugung anzupassen. Gleichzeitig ergeben sich durchaus Potenziale und auch Möglichkeiten zu Flexibilitätsoptionen über das heute genutzte Maß hinaus. Inwiefern diese Potenziale und Perspektiven gehoben werden können, hängt wesentlich von der Ausgestaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen ab.



## INHALTSVERZEICHNIS

### Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie

Herausgeber und Förderkennzeichen	I
Liste der Autoren	II
Beteiligte Projektpartner	III
Vorwort	IV
<b>Executive Summary</b>	<b>VI</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>XIII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XXVIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXXII</b>
<b>Verwendete Abkürzungen</b>	<b>XXXIV</b>
Sprachliche Abkürzungen	XXXIV
Abkürzungen für Gesetze und Regularien	XXXIV
Technische Abkürzungen	XXXIV
Physikalische Einheiten und Größen	XXXV
Präfixe	XXXV
Chemische Verbindungen und Mineralien	XXXVI
<b>1. Methodisches Vorgehen und Voruntersuchungen zu Flexibilitätspotenzialen</b>	<b>1</b>
1.1 Branchenübergreifende Methodik zur Erhebung von Flexibilitätspotenziale	2
1.1.1 Einheitliche Definitionen und branchenübergreifende Methodik	2
1.1.2 Problematik der Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen	15
1.1.3 Erstellung eines Fragebogens zur Erhebung des technischen Flexibilitätspotenzials	17
1.1.4 Steckbriefe zur Aggregation der Ergebnisse	17
1.1.5 Anhang	19
1.2 Methode zur Ermittlung technischer, organisatorischer und regulatorischer Hemmnisse	24
1.2.1 Problemstellung und Ziel der Methode	24
1.2.2 Vorgehen und Datenquellen	24
1.2.3 Ableitung des Analyserahmens	28
1.3 Methodik zur wirtschaftlichen Analyse	31
1.3.1 Interviews	31
1.3.2 Methodik zur Modellierung von Unternehmensentscheidungen unter Berücksichtigung regulatorischer, ökonomischer, technischer und praktischer Rahmenbedingungen	31
1.4 Charakteristische energiewirtschaftliche Situationen für die Bereitstellung von Flexibilität	33
1.5 Literaturverzeichnis	42

<b>2. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven des Elektrolichtbogenofens</b>	<b>47</b>
2.1 Bedeutung des Elektrolichtbogenofens in der Stahlindustrie	48
2.2 Methodik der Datenerhebung	50
2.3 Wesentliche Charakteristika der Stahlbranche	51
2.4 Technische Beschreibung des Prozesses	52
2.5 Innerbetriebliche Organisation	58
2.6 Technisches Flexibilitätspotenzial des Elektrolichtbogenofens	60
2.6.1 Technische Flexibilität des Elektrolichtbogenofens	60
2.6.2 Technische Flexibilität der Prozessroute – Strangguss	61
2.6.3 Technische Flexibilität der Prozessroute – Strangguss und Blockguss	62
2.6.4 Prozessroute – Timeshift-Modell	62
2.6.5 Quantitative Bestimmung des theoretischen und technischen Flexibilitätspotentials	63
2.7 Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile	66
2.7.1 Anforderungsprofil 1 – Potenziale und Hemmnisse	66
2.7.2 Anforderungsprofil 2 – Potenziale und Hemmnisse	67
2.7.3 Anforderungsprofil 3 – Potenziale und Hemmnisse	68
2.8 Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	68
2.9 Flexibilitätsperspektiven des Elektrolichtbogenofens	70
2.10 Literaturverzeichnis	71
<b>3. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Behälterglasherstellung</b>	<b>73</b>
3.1 Einleitung	74
3.2 Grundsätzliche Prozessschritte	75
3.3 Glasarten und Produktgruppen, Glasanwendungen	76
3.4 Bedeutung der Behälterglasherstellung in der Glasindustrie	76
3.5 Prozesscharakterisierung	78
3.5.1 Schmelzaggreat	79
3.5.2 Temperatur und Viskosität	80
3.5.3 Schmelzprozess	81
3.5.4 Wannenauslaufzeit – kontinuierlicher Produktionsprozess	81
3.5.5 Energieflussbild einer typischen Glasschmelzwanne zur Behälterglaserzeugung	82
3.6 Methodik der Datenerhebung	82
3.7 Flexibilisierung des Anteils an elektrischer Energie bei der Behälterglasherstellung	83
3.7.1 Identifikation wesentlicher Hemmnisse – Methodik und Datengrundlage	83
3.7.2 Marktumfeld und Kundenbeziehungen	84
3.7.3 Organisatorische Hemmnisse	85
3.7.4 Technisches Flexibilitätspotenzial und Hemmnisse der Behälterglasherstellung	86

3.7.5	Anwendungsfall 1 - Potenziale und Hemmnisse	90
3.7.6	Anwendungsfall 2 und 3 – Potenziale und Hemmnisse	92
3.7.7	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	92
3.7.8	Flexibilitätsperspektiven der Behälterglasherstellung	93
3.8	Literaturverzeichnis	95
<b>4.</b>	<b>Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Roh- und Zementmahlung</b>	<b>97</b>
<hr/>		
4.1	Bedeutung der Roh- und Zementmahlung	101
4.1.1	Flexibilitätspotenziale für kurz-, mittel- und langfristige Anforderungen	103
4.2	Technische Beschreibung der Referenzprozesse	104
4.2.1	Rohmahlung	104
4.2.2	Zementmahlung	105
4.3	Methodik der Datenerhebung	107
4.4	VDZ Modell zur Einschätzung der technischen Flexibilitätspotentiale	109
4.4.1	Produktionskapazität	110
4.4.2	Saisonale Nutzung der Produktionskapazität	112
4.4.3	Produktspeicherkapazität in Silos	113
4.5	Technisches Flexibilitätspotenzial der Roh- und Zementmahlung	114
4.5.1	Kurzfristige Flexibilität nach Anforderungsprofil 1	114
4.5.2	Mittelfristigen Flexibilität nach Anforderungsprofil 2	115
4.5.3	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für langfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 3	119
4.5.4	Einschätzung maximaler technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland	120
4.5.5	Ergebnisübersicht	121
4.6	Hemmnisse und Einschränkungen des technischen Potentials	124
4.6.1	Technische Hemmnisse zur Flexibilisierung der Rohmühlen	124
4.6.2	Technische Hemmnisse zur Flexibilisierung der Zementmahlung	125
4.6.3	Einfluss der Silokapazität	125
4.6.4	Ökonomische Hemmnisse und Tarfsysteme	126
4.6.5	Personalplanung	128
4.6.6	Marktanforderungen und Saisonalität der Produktion	128
4.7	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	129
4.7.1	Erfahrungen aus einem Betriebsversuch im Zementwerk	130
4.8	Flexibilitätsperspektiven der Roh- und Zementmahlung	131
4.9	Literaturverzeichnis	132

<b>5. Flexibilitätspotenziale und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse</b>	<b>135</b>
5.1 Chlor-Alkali Elektrolyse-Verfahren	136
5.1.1 Membran-Verfahren	137
5.1.2 Diaphragma-Verfahren	138
5.1.3 Amalgam- Verfahren	138
5.2 Chlor-Alkali Betreiber in Deutschland	139
5.2.1 Wertschöpfungsketten für die Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse	141
5.3 Rolle und Einbindung der Chlor-Alkali Elektrolyse in Chemiestandorten	142
5.3.1 Verknüpfung zu Folgeprozessen und Chlorspeicher	142
5.3.2 Folgeprozess des Membran-Verfahrens: PVC-Produktion	143
5.3.3 Folgeprozess des Diaphragma-Verfahrens: Epichlorhydrin Herstellung	144
5.4 Absehbare Entwicklungen für die Chlor-Alkali Elektrolyse	144
5.4.1 Zero-Gap Technologie	145
5.4.2 Sauerstoffverzehrelektrode (SVK)	145
5.4.3 Schaltbare Sauerstoffverzehrelektrode	145
5.5 Betriebswirtschaftliche Hemmnisse und Prioritäten	146
5.5.1 Standorteinbindung	146
5.5.2 Versorgung mit elektrischer Energie	147
5.5.3 Nutzung von KWK-Eigenerzeugung	148
5.5.4 Technische Limitierungen für die Bereitstellung von Flexibilität	149
5.5.5 Auftrags- und Schichtplanung	149
5.5.6 Wartung und Reparaturen	150
5.5.7 Bisherige Erfahrungen mit Flexibilität	150
5.6 Wissenschaftlich-technische Rahmenbedingungen für eine Flexibilisierung	151
5.6.1 Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs von der Stromstärke	151
5.6.2 Randbedingungen für Lastverschiebungen	152
5.6.3 Flexibilität als Funktion der Anlagenauslastung	153
5.6.4 Wechselwirkung Energieeffizienz und Flexibilität	154
5.6.5 Effizienz der Chlor-Alkali Elektrolyse als Stromspeicher	154
5.6.6 Perfekte Voraussicht vs. Produktionsplanung	155
5.7 Abschätzung des Flexibilitätspotenzials und der -perspektiven für die Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland	155
5.7.1 Modellansatz	156
5.8 Flexibilitätsoptionen für die Chlor-Alkali Elektrolyse	157
5.8.1 Flexibilität im Teillastbetrieb	158
5.8.2 Flexible Nutzung des Chlor-Speichers	159
5.8.3 Nutzung von EDC-Speichern	160
5.8.4 Kapazitätserweiterung	161
5.8.5 Virtuelles Kraftwerk	163
5.8.6 Schaltbare Sauerstoffverzehrkatode	164
5.8.7 Ergebnisse	166

5.9	Darstellung des Effekts der Flexibilitätsoptionen und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland	170
5.10	Zusammenfassung	172
5.11	Ausblick	173
5.12	Anhang	174
5.12.1	Grundlagen der Berechnungen	174
5.12.2	Verwendete Parameter	175
5.12.3	Referenzanlage Chlor-Alkali Elektrolyse	176
5.12.4	Danksagung	177
5.13	Literaturverzeichnis	178
<b>6.</b>	<b>Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in einer Rohstoffschmelzanlage für Feuerfestmaterialien</b>	<b>181</b>
6.1	Bedeutung der Rohstoffschmelzanlage in der Feuerfestindustrie	182
6.2	Rohstoffschmelzprozess – Methodik der Datenerhebung	184
6.3	Technische Beschreibung des Schmelzprozesses und dessen Einbettung in den Gesamtprozess	185
6.4	Identifikation wesentlicher Hemmnisse – Methodik und Datengrundlage	187
6.5	Technisches Flexibilitätspotenzial und Hemmnisse der Rohstoffschmelzanlage	188
6.5.1	Technische Limitationen im Hinblick auf Lastflexibilisierung	188
6.5.2	Einbettung in die Prozesskette/ Vernetzte Produktionsprozesse	188
6.6	Anforderungsprofil 1 – Potenziale und Hemmnisse	189
6.6.1	Kurzfristige Lastverschiebung	189
6.6.2	Mittelfristige Lastverschiebung	190
6.6.3	Vollständiger Lastabwurf	190
6.7	Anforderungsprofile 2 und 3 – Potenziale und Hemmnisse	191
6.8	Marktumfeld und Kundenbeziehungen	192
6.8.1	Konjunktur und Auslastung der Branche	192
6.8.2	Zukaufmoglichkeiten und Lieferfristen	192
6.9	Innerbetriebliche Organisation	193
6.9.1	Auftrags- und Schichtplanung	193
6.9.2	Geplante Revisionen	193
6.9.3	Regulatorische Hemmnisse	193
6.10	Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität	194
6.11	Flexibilitätperspektiven der Rohstoffschmelzanlage	195
6.12	Literaturverzeichnis	196
<b>7.</b>	<b>Vergleich der wirtschaftlichen Potenziale ausgewählter Prozesse</b>	<b>199</b>
7.1	Wirtschaftlicher Referenzprozess für hohe Auslastungsgrade mit Speichern (Chlor-Alkali)	200
7.1.1	Modellbeschreibung	200
7.1.2	Analysen	203
7.1.3	Einfluss von Auslastungsgrad auf Flexibilitätsbereitstellung	203

7.1.4	Die Abwägung zwischen Reserveteilnahme und flexibler Beschaffung am Markt	205
7.2	Wirtschaftlicher Referenzprozess für saisonale Auslastungsgrade mit Speichern (Zement)	206
7.2.1	Modellbeschreibung	207
7.2.2	Analysen	210
7.3	Literaturverzeichnis	213
<b>8.</b>	<b>Branchenübergreifende Auswertung</b>	<b>215</b>
8.1	Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale der ausgewählten Prozesse	217
8.2	Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile	221
8.3	Hemmnisse zur Hebung der technischen Flexibilitätspotenziale	222
8.4	Wirtschaftlichkeit von Flexibilität	223
8.5	Vergleich der technischen Flexibilitätsperspektiven	224
8.6	Literaturverzeichnis	229
<b>9.</b>	<b>Regionale Verteilung der untersuchten Prozesse</b>	<b>231</b>
9.1	Literaturverzeichnis	235
<b>10.</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>237</b>
10.1	Zielsetzung der Arbeiten	238
10.2	Methodische Vorgehensweise	238
10.3	Branchenübergreifende Ergebnisse	239
10.4	Branchenspezifische Ergebnisse	240
10.4.1	Eisen- und Stahlherstellung (Elektrolichtbogenofen)	240
10.4.2	Glasherstellung (Elektrische Zusatzheizung in der Behälterglasproduktion)	241
10.4.3	Zementherstellung (Roh- und Zementmahlung)	242
10.4.4	Herstellung chemischer Grundstoffe (Chlor-Alkali Elektrolyse)	243
10.4.5	Herstellung von Feuerfest-Materialien (Rohstoffschmelzanlage)	243
10.5	Auswertung und Ergebnisse	244
10.6	Was heißt das aktuell für die Grundstoffindustrie	245
10.7	Hemmnisse für die Umsetzung von Flexibilität	246
10.7.1	Technisch	246
10.7.2	Regulatorisch	246
10.7.3	Wirtschaftlich	247
10.7.4	Kulturell	248
10.8	Zukünftige Perspektiven	249
<b>Impressum</b>		<b>250</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1	Energieeinsatz in der Grundstoffindustrie 2015 (AGEB, FhG ISI) [1]	IV
1.1	Flexibilitätpotenziale der analysierten Studien – dargestellt als Boxplot	3
1.2	Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe	10
1.3	Zuordnung der zu erhebenden Parameter je Potenzialbegriff	12
1.4	Vorlage für einen Branchensteckbrief	17
1.5	Vorlage für einen Referenzprozess-Steckbrief	18
1.6	Zeitlich-organisatorische Hemmnis-Ebenen	28
1.7	Methodisches Vorgehen der wirtschaftlichen Entscheidungsmodellerstellung und Analyse	32
1.8	Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren der übergeordneten SynErgie-Analyse	34
1.9	Mittlerer jährlicher Abrufgrad Minutenreserveleistung (eigene Darstellung, Daten von [34])	35
1.10	Häufigkeit von Day-Ahead Preisen größer als der Gebotspreis	36
1.11	Ereignisse zusammenhängender Stunden positiver Residuallast für drei illustrative Szenarien mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien.	37
1.12	Anzahl monatlicher Flauten unterschiedlicher Länge aggregiert über 10 Jahre (2003 bis 2012), definiert ent- sprechend der Unterschreitung der mittleren Leistung der Einspeisung aus Wind und Sonne während einer Dunkelflaute von a) 20 % (links), b) 30 % (Mitte) und c) 40 % (rechts) unter die mittlere 10-Jahresleistung	38
1.13	Steckbrief zu Profil 1: „Kurzfristige Anpassung der Last“	39
1.14	Auswertung zu Profil 1: Abruf von Minutenreserve am 15.04.2016	39
1.15	Steckbrief zu Profil 2: „Anpassung der Last über mehrere Stunden“	40
1.16	Auswertung zu Profil 2: Negative Strompreise während der Mittagsstunden aufgrund hoher EE-Einspeisung und vergleichsweise geringer Last	40
1.17	Steckbrief zu Profil 3: „Reduktion der Last über mehrere Tage“	41
1.18	Auswertung zu Profil 3: Hohe Strompreise im Januar 2017 aufgrund geringer EE-Erzeugung und hohem Verbrauch	41
1.19	Auswertung zu Profil 3: Die „Dunkelflaute“ als seltenes Phänomen	42
2.1	Erzeugungsrouten zur Stahlherstellung in Deutschland (2015) [1]	48
2.2	Standorte der Stahlerzeugung in Deutschland [1]	49

2.3	Stahlerzeugung der größten Stahlwerke in 2015.in Deutschland [1]	49
2.4	Branchensteckbrief Stahl	50
2.5	Prozessroute der Stahlherstellung im Elektrostahlwerk	52
2.6	Aufbau des Drehstrom- und Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens [7]	53
2.7	Elektrische Leistung von Elektrolichtbogenöfen in Deutschland mit Abstichgewicht $\geq 35$ t (AC=Wechselstrom, DC=Gleichstrom) [6]	53
2.8	Prinzipieller Ablauf der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen [7]	54
2.9	Zusatzbrenner und Injektoren am Elektrolichtbogenofen (RCB-Refining Combined Burner, C-Kohlestaubinjektion, PC-Nachverbrennungsinjektor, B-Brenner) [8]	54
2.10	Verlauf des Schmelzvorgangs und der jeweils in den Betriebsphasen vorliegenden Beheizung mittels Lichtbogen und Zusatzbrennern [8]	55
2.11	Lastgang der elektrischen Leistung eines Elektrolichtbogenofens [9]	55
2.12	Leistungsstufen im Chargenverlauf des Elektrolichtbogenofens [8]	56
2.13	Typische Massenbilanz des Elektrolichtbogenofens [7]	57
2.14	Typische Energiebilanz eines Elektrolichtbogenofens [7]	57
2.15	Schmelzleistung des EAF beim Timeshift-Konzept [11]	62
2.16	Zulässigkeit der Flexibilisierungsmaßnahme über die flexibilisierbare Vorlaufzeit	66
3.1	Branchensteckbrief Glasindustrie	74
3.2	Kunden des Grundstoffindustriezweiges der Glasindustrie [1]	74
3.3	Jahresproduktionsmenge der Glasindustrie in D an verkaufsfähigem Glas in den letzten 20 Jahren in kt [1]	75
3.4	Jahresproduktion der Glasbranchen an verkaufsfähigem Glas in D im Jahr 2016.[2]	75
3.5	Behälterglashersteller in Deutschland [4]	77
3.6	Regenerativ beheizte U-Flammenwanne zur Schmelze von Glas [5]	78
3.7	Viskositäts-Temperatur-Verlauf einer Glasschmelze mit Benennung typischer Viskositätsbereiche oder -punkte zur Herstellung von Glas, wobei die Temperaturabhän- gigkeit der Viskosität grob das Verhalten sogenannter Massengläser (Kalk-Natron-Silicatglas) wiedergibt. [6]	80
3.8	Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei unterschiedlicher Glaschemie. (1: Kieselglas; 2: Erdalkali-Alumino-Silicat- glas; 3: Borosilicatglas A; 4: Borosilicatglas B; 5: Kalk- Natron-Silicatglas; 6: Bleiglas; 7: Lotglas) [7]	80
3.9	Sankey-Diagramm des Energieflusses einer typischen Behälterglaswanne	82
3.10	Strömungsprofil in der Schmelzwanne mit Schmelzphasen	87

4.1	VDZ Schema zum Verfahrensablauf im Zementwerk [1]	98
4.2	Zementwerke in Deutschland 2014 [2]	99
4.3	VDZ Branchensteckbrief zur Zementindustrie	101
4.4	Spezifischer elektrischer Energiebedarf (Deutschland, 2014): 110 kWh/t Zement [1], [10]	102
4.5	Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs der Zementherstellung [1], [10]	102
4.6	Zementversand Inland (Monatsdaten) [14]	106
4.7	Schematische Darstellung Modell 1: Mahlwerk mit Zementmahlprozess	110
4.8	Schematische Darstellung Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Rohmahlprozess und Zementmahlprozess	111
4.9	Geschätzter Verlauf des Mühlenbetriebs für Modell 1. und 2. und des Zementversands von Zementwerken in Deutschland	112
5.1	Schematische Darstellung der verschiedenen Verfahren der Chlor-Alkali Elektrolyse [1]	136
5.2	Branchensteckbrief der Chemische Industrie für die Chlor-Alkali Elektrolyse	137
5.3	Benchmarking des elektrischen Energiebedarfs der Chlor-Alkali Elektrolyse ohne Nebenaggregate und Hilfsenergie in Deutschland	141
5.4	Übersicht über die Verknüpfungen und Produkte, bei denen Chlor in der Umsetzung beteiligt ist [10]	141
5.5	Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses [11]	144
5.6	Energieversorgung durch interne KWK Strom- und Wärmeerzeugung	148
5.7	Beispielhafter Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs als Funktion der Stromdichte für das Membran-Verfahren [4]	151
5.8	Flexibilität bei gegebener durchschnittlicher Produktion	152
5.9	Zusammenhang von Auslastung und Flexibilität	153
5.10	Produktionsausgleich für eine initiierte Laständerung	158
5.11	Interaktion Chlorproduktion, -speicher und -verbraucher [17]	159
5.12	Effekt eines Kapazitätsausbaus auf die maximale Flexibilität und die durchschnittliche Auslastung	162
5.13	Standorte und technisches Teillastpotenzial für eine Auslastung von 95 % der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland hinterlegt mit den aktuellen Stromnetz- strukturen [20]	171
6.1	Anteile der Nutzer-Industrien an feuerfesten Erzeugnissen in %	182
6.2	Branchensteckbrief für die Feuerfest-Industrie	184

6.3	Steckbrief des Schmelzprozesses: Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung von Schmelzkorund (4 MW Lichtbogenofen)	185
6.4	Prozesskette der Schmelzkorund-Herstellung	186
7.1	Spezifische Strombeschaffungskosten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads	203
7.2	Preisdauerlinie mit Produktionsanpassung in Abhängigkeit des Auslastungsgrades	203
7.3	Flexibilitätsabruflänge in Abhängigkeit des Auslastungsgrades	204
7.4	Abwägung zwischen Reserveteilnahme und Flexibilitätsbereitstellung am DA-Markt	206
7.5	Stilisierte saisonale Zementnachfrage	208
7.6	Preisdauerlinien mit und ohne Nachtschichtbegrenzung unter verschiedenen Speicherszenarien	211
7.7	Kontinuierliche Stillstände in der Zementmahlung	211
7.8	Durchschnittliche tägliche Produktionszeitpunkte	212
7.9	Einfluss des Planungshorizontes auf Einsparungen in der Strombeschaffung, bei ausschließlich kurz- fristiger Optimierung innerhalb des Planungs- horizontes und Nichtberücksichtigung von mittel- fristigen Opportunitätskosten des Speicherinhaltes	213
9.1	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland	232
9.2	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland und Jahressumme der Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]	233
9.3	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland und maximale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]	234
9.4	Standorte der untersuchten Prozesse in Deutschland und minimale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]	234

## TABELLENVERZEICHNIS

Table 1	Comparison of technical flexibility potentials (positive: Load reduction, negative: load increase) of the investigated processes.	X
Table 2	Process compliance towards the defined flexibility profiles under consideration of the currently high degrees of capacity utilization, delivery commitments towards the customers and without additional investments.	XI
Tabelle 1	Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse	XVIII
Tabelle 2	Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen	XIX
Tabelle 1.1	Übersicht über identifizierte Problemfelder und deren Fragestellungen	4
Tabelle 1.2	Ausgewählte Prozesse der untersuchten Branchen	14
Tabelle 1.3	Übersicht über 28 analysierte Studien	19
Tabelle 1.4	Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder	20
Tabelle 1.5	In der Literatur benannte Hemmnisse	26
Tabelle 2.1	Beispiel der jährlichen Betriebszeit eines Elektrolichtbogenofens	58
Tabelle 3.1	Typische Glasarten bzw. Glaschemie für unterschiedliche Glasprodukte	76
Tabelle 4.1	Daten der Zementindustrie in Deutschland für die Bestimmung der Referenzprozesse	108
Tabelle 4.2	Beschreibung der Mühlen in den VDZ Modellen 1 und 2	111
Tabelle 4.3	Geschätzte Mühlennutzung in Deutschland, 2014	113
Tabelle 4.4	Geschätzte Silogrößen und -nutzung	113
Tabelle 4.5	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 1	114
Tabelle 4.6	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 1	115
Tabelle 4.7	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 2	117
Tabelle 4.8	Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 2	118

Tabelle 4.9	Einschätzung maximaler technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für alle Werke entsprechend Modell 1 für Mahlwerke und Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.	121
Tabelle 4.10	Einschätzung technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für Zementwerke in Deutschland entsprechend Modell 1 für Mahlwerke und Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.	122
Tabelle 5.1	Übersicht der Chlor Elektrolysen in Deutschland. Grün eingefärbt sind die Standorte, die Chlor für die PVC Produktion produzieren [8]	140
Tabelle 5.2	Freie Leistung für den Speicher in Abhängigkeit der Auslastung	160
Tabelle 5.3	Übersicht der Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (grau hinterlegt) der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland	168
Tabelle 5.4	Abgeschätzte Kosten für die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (grau hinterlegt) in den verschiedenen Anforderungsprofilen. In Klammern die Kostenabschätzung für die Referenzanlage	168
Tabelle 5.5	Übersicht über die verwendeten Parameter	175
Tabelle 5.6	Parameter der Referenzanlage	176
Tabelle 7.1	Beschreibung der Variablen	201
Tabelle 7.2	Beschreibung der Parameter	201
Tabelle 7.3	Beschreibung der Zielfunktion und Nebenbedingungen	202
Tabelle 7.4	Beschreibung der Modellvariablen	208
Tabelle 7.5	Beschreibung der Modellparameter	209
Tabelle 7.6	Mathematische Ausformulierung der Zielfunktion und Nebenbedingungen und deren Beschreibung	209
Tabelle 8.1	Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse	220
Tabelle 8.2	Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen	221
Tabelle 8.3	Hemmnisse zur Hebung grundlegend verfügbarer technischer Flexibilitätspotenziale	222
Tabelle 8.4	Für die Stromlastflexibilität relevante Innovationen der ausgewählten Prozesse	226

## VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

### SPRACHLICHE ABKÜRZUNGEN

#	Anzahl
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d.h.	das heißt
etc.	et cetera (Latein), und so weiter
Ggf., Ggfs.	gegebenenfalls
Ggü.	Gegenüber
i. d. R.	in der Regel
i.e.	id est (Latein), im Englischen that is, das heißt
n	Anzahl
o.ä.	oder ähnliche
rd.	rund
s.	siehe
s. a.	siehe auch
s. h.	siehe hierzu
sog.	sogenannte
s. u.	siehe unten
u.a.	unter anderem
u.a.m.	und anderes mehr
u. U.	unter Umständen
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
z. Zt.	zur Zeit

### ABKÜRZUNGEN FÜR GESETZE UND REGULARIEN

AbLaV	Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten
BImSchG	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
EEG	Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien
StromNEV	Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

### TECHNISCHE ABKÜRZUNGEN

AC	alternating current, Wechselstrom
BAT	best available technology, beste verfügbare Technologie
CAE	Chlor-Alkali Elektrolyse
DA	Day-ahead
DC	direct current, Gleichstrom
DRI/HBI	Direct reduction iron/hot bricketed iron
DSM	Demand Side Management, Lastmanagement
EAF	Electric Arc Furnace, Lichtbogenofen
ECU	Electrochemical Unit, Elektrochemische Einheit
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union

EZH	Elektrische Zusatzheizung
€	Euro
€ct	Cent (Euro)
GWI	Gas- und Wärme-Institut Essen e.V.
HT	Hochtarif
IHK	Industrie- und Handelskammer
IS	Individual Section
KWK	Kraft-Wärme Kopplung
Mrd.	Milliarden
MRL	Minutenregelleistung
NT	Niedertarif
PV	Fotovoltaik
Std.	Stunden
SVK	Sauerstoffverzehr Kathode
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute
VES	Vollelektrische Schmelzwanne
VPSA	Vapor Pressure Swing Adsorption

## PHYSIKALISCHE EINHEITEN UND GRÖSSEN

a	Jahr, Zeiteinheit
A	Ampere, Einheit der elektrischen Stromstärke
°C	Grad Celsius, Einheit der Temperatur
d	Tag
g	Gramm, Masseinheit
Gew.-%	Gewichtsprozent, Konzentrationseinheit
h	Stunde, Zeiteinheit
$\eta$	Viskosität
J	Joule, Energieeinheit
K	Kelvin, Temperatureinheit
M	Meter, Längeneinheit
m <sup>2</sup>	Quadratmeter, Flächeneinheit
min	Minute, Zeiteinheit
Pa	Pascal, Druckeinheit
t	metrische Tonne, Gewichtseinheit, entspricht 1000 kg
V	Volt, Einheit der elektrischen Spannung
Vol.-%	Volumenprozent, Konzentrationseinheit
W	Watt, Einheit der Leistung
W <sub>el</sub>	Watt, elektrisch

## PRÄFIXE

$\mu$	Mikro (10 <sup>-6</sup> )
m	Milli (10 <sup>-3</sup> )
c	Zenti (10 <sup>-2</sup> )
d	Dezi (10 <sup>-1</sup> )
k	Kilo (10 <sup>3</sup> )
M	Mega (10 <sup>6</sup> )
G	Giga (10 <sup>9</sup> )
T	Tera (10 <sup>12</sup> )
P	Peta (10 <sup>15</sup> )

## CHEMISCHE VERBINDUNGEN UND MINERALIEN

$\text{Al}_2\text{O}_3$	hier Edelkorund oder Normalkorund
$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	hier Schmelzmullit
$\text{Cl}^-$	Chlorid-Ionen
$\text{Cl}_2$	Chlor
$\text{CO}_2$	Kohlendioxid
$e^-$	Elektron
EDC	Ethylendichlorid ( $\text{ClH}_2\text{CCH}_2\text{Cl}$ )
$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$	Ethylen
$\text{H}_2$	Wasserstoff
HCl	Wasserstoffchlorid, Salzsäure
$\text{H}_2\text{O}$	Wasser
Hg	Quecksilber
$\text{MgAl}_2\text{O}_4$	hier Schmelzspinell
$\text{MgCr}_2\text{O}_4$	hier Schmelzpikrochromit
MgO	hier Schmelzmagnesia
n	generischer stöchiometrischer Faktor
$\text{Na}^+$	Natrium-Ionen
NaCl	Natriumchlorid (Kochsalz)
NaHg	Natrium-Quecksilber Amalgam
NaOH	Natronlauge
$\text{O}_2$	Sauerstoff
$\text{OH}^-$	Hydroxonium-Ionen
$\text{SiO}_2$	hier Quarzglas
$\text{SO}_3$	Schwefeltrioxid
PVC	Polyvinylchlorid
VCM	Vinylchlorid Monomer ( $\text{ClHC}=\text{CH}_2$ )
$\text{ZrSiO}_4\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	hier Schmelzzirkonmullit
$\text{ZrSiO}_4\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	hier Schmelzzirkonkorund





## KAPITEL 1

# METHODISCHES VORGEHEN UND VORUNTERSUCHUNGEN ZU FLEXIBILITÄTSPOTENZIALEN

Verantwortliche Autoren:

### ABSCHNITT 1.1

Christa Dufter, Anna Gruber, Andrej Guminski, Serafin von Roon,  
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

Clara Orthofer,  
Technische Universität München,  
Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

### ABSCHNITT 1.2

Karin Arnold, Georg Holtz,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

### ABSCHNITT 1.3

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin

### ABSCHNITT 1.4

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin

Christa Dufter, Anna Gruber, Andrej Guminski, Serafin von Roon,  
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

Karin Arnold, Tomke Janßen, Georg Holtz,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen der wissenschaftlichen Institutionen beschrieben. Eine Metastudienanalyse in Kapitel 1.1 zeigt zunächst den wissenschaftlichen Kenntnisstand auf, und analysiert Stärken und Schwächen der insgesamt 28 betrachteten Studien. Darauf aufbauend wird ein zielführender methodischer Ansatz zur Ermittlung von Flexibilitätspotenzialen und -perspektiven entwickelt. Darüber hinaus wird auf die Problematik einer Hochrechnung der erhobenen Flexibilitätspotenziale in der Grundstoffindustrie eingegangen.

In Kapitel 1.2 wird ergänzend dazu eine Methodik entwickelt, anhand derer technische, organisatorische und regulatorische Hemmnisse identifiziert werden können, die der Hebung der Flexibilitätspotenziale entgegenstehen. Ausgehend von grundlegenden Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität bezieht diese Hemmnisanalyse drei zeitlich-organisatorische Ebenen (Markumfeld, innerbetriebliche Organisation, technische Anlage) und deren regulatorische Rahmenbedingungen mit ein.

Der Ansatz zur Hemmnisanalyse wird in Kapitel 1.3 durch eine Methode zur wirtschaftlichen Analyse komplementiert, durch welche ökonomische Potenziale für ausgewählte Prozesse ausgewiesen werden. In diesem Zusammenhang werden numerische Entscheidungsmodelle erstellt, um beispielsweise den Einfluss der Auslastung auf die Flexibilitätserstellung und die Strombeschaffungskosten zu ermitteln.

In Abschnitt 1.4 dieses Methodik-Kapitels wird das Energiesystem und dessen Bedarf an Flexibilitätsdienstleistungen genauer beschrieben. Da der Strommarkt in stetigem Wandel und eine detaillierte Prognose des zukünftigen Flexibilitätsbedarfs sowie des Designs zugehöriger Marktinstrumente nicht möglich ist, wird auf grundlegende strukturelle Eigenschaften des Stromsystems zurückgegriffen, um den Flexibilitätsbedarf darzustellen. Es lassen sich drei Nachfragetypen charakterisieren, welche sich in Abrufdauer und Vorankündigungszeit deutlich unterscheiden, und im Folgenden als „Anforderungsprofile“ bezeichnet werden. Die Anforderungsprofile werden detailliert beschrieben und mit realen Beispielen hinterlegt. Sie bieten einen Orientierungsrahmen für die gesamte Analyse.

## **1.1 BRANCHENÜBERGREIFENDE METHODIK ZUR ERHEBUNG VON FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE**

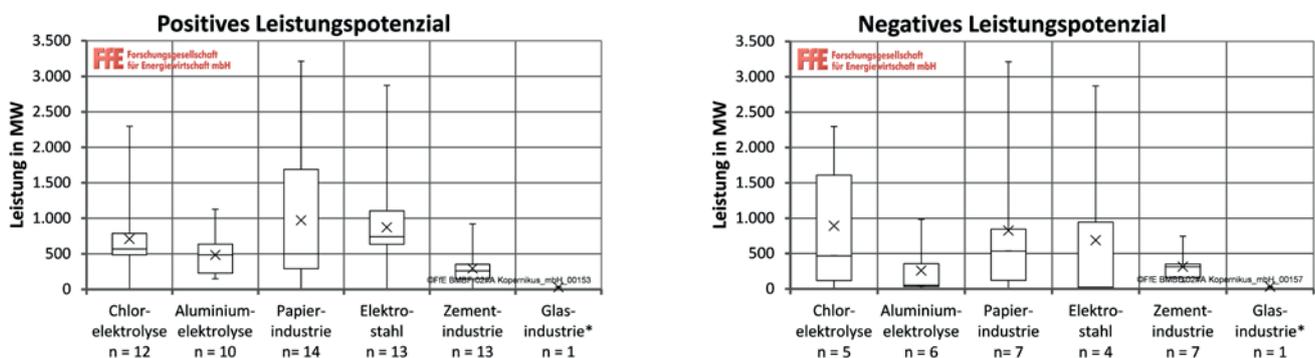
### **1.1.1 EINHEITLICHE DEFINITIONEN UND BRANCHENÜBERGREIFENDE METHODIK**

Die folgenden Kapitel basieren im Wesentlichen auf [1].

Es existiert bereits eine Vielzahl an Studien, die entsprechende Potenziale verschiedener Branchen untersuchen. Allerdings werden hier teilweise deutliche Streuungen bei den ausgewiesenen Potenzialen ersichtlich. Gründe hierfür sind die Anwendung unterschiedlicher Methoden sowie

ein fehlendes übereinstimmendes Verständnis zentraler Potenzialbegriffe. Aufbauend auf einer Metastudienanalyse werden daher einheitliche Definitionen relevanter Begrifflichkeiten sowie eine transparente Methode zur Potenzialerhebung ausgearbeitet.

Zu Beginn werden wesentliche Kriterien festgelegt, die es bei der Entwicklung einer Methode zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen zu beachten gilt. Im Rahmen der Metastudienanalyse werden die verwendeten Methoden von 28 Studien analysiert (siehe Tabelle 1.3). In einem ersten Schritt werden die ausgewiesenen Flexibilitätspotenziale der verschiedenen Branchen bzw. Prozesse verglichen. Die Darstellung als Boxplot in Abbildung 1.1 zeigt die deutliche Streuung der angegebenen Potenziale. Gründe hierfür sind unterschiedliche Annahmen und methodische Herangehensweisen sowie ein fehlendes einheitliches Verständnis relevanter Begrifflichkeiten.



\* Potenzial der Glasindustrie bezieht sich nur auf Potenziale für Behälterglas

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

Abbildung 1.1: Flexibilitätspotenziale der analysierten Studien dargestellt als Boxplot<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> n entspricht der Anzahl an berücksichtigten Studien je Branche / Prozess.

<sup>2</sup> eigene Darstellung auf Basis von [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]

### 1.1.1.1 KRITERIEN FÜR DIE METHODIK ZUR POTENZIALERHEBUNG

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

- Vorrangiges Ziel ist die branchenübergreifende Anwendbarkeit. Der Fokus der Metastudienanalyse liegt zwar auf Studien zur Erhebung von Flexibilitätspotenzialen in der Grundstoffindustrie, die entwickelte Methodik ist jedoch auch für andere Branchen sowie für Querschnittstechnologien anwendbar.

- Ein hohes Maß an Transparenz wird durch die eindeutige Definition und Abgrenzung relevanter Begrifflichkeiten sowie die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise garantiert.
- In allen Schritten der Methodenentwicklung wird auf die Ausrichtung der Ergebnisse auf die Zielgruppe geachtet. Hier stehen besonders die Politik sowie Entwickler von Simulationsmodellen im Vordergrund. Aber auch einzelne Betriebe der analysierten Branchen, welche ihre Flexibilität vermarkten wollen, sollen bei der Bestimmung ihrer Potenziale unterstützt werden.

### 1.1.1.2 METASTUDIENANALYSE

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

Tabelle 1.1: Übersicht über identifizierte Problemfelder und deren Fragestellungen

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

Für den detaillierten Vergleich der Methoden zur Potenzialerhebung werden 14 Studien ausgewählt. Für die Auswahl sind zwei Kriterien entscheidend. Zum einen werden nur Studien aufgenommen, deren Fokus explizit auf der Erhebung von Potenzialen und nicht auf Marktsimulationen, bei denen Flexibilitätspotenziale nur einen kleinen Teil ausmachen, liegt. Zum anderen muss ein ausreichender Informationsgehalt gegeben sein, der eine detaillierte Analyse erlaubt. Hieraus ergibt sich, dass nicht alle Studien, deren Potenziale in Abbildung 1.1 enthalten sind, in die umfassenden Metastudienanalyse aufgenommen werden. Der Vergleich der Studien anhand der identifizierten Problemfelder ist in Tabelle 1.4 zusammengefasst.

### **VIELZAHL VERSCHIEDENER POTENZIALBEGRIFFE**

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

Erstens werden für gleiche Potenziale unterschiedliche Bezeichnungen verwendet. Dies wird besonders deutlich bei Potenzialen, welche wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Hier existieren die Begriffe wirtschaftlich, wirtschaftlich realisierbar, ökonomisch und ökonomisch nutzbar, welche synonym verwendet werden [2, 3, 5, 8, 9, 13, 15, 16, 17, 18]. Zweitens definieren einzelne Studien eigene Potenziale, die in dieser Form in anderen Studien nicht erfasst werden. So lässt sich aufgrund der erhobenen Parameter darauf schließen, dass das in [13] erhobene soziotechnische Potenzial zwischen dem technischen und realisierbaren Potenzial aus [5, 8, 17] einzuordnen ist. Diese spezifischen Potenzialbegriffe sind allerdings nur begrenzt vergleichbar.

Drittens werden identische Bezeichnungen verwendet, aber bei der Potenzialerhebung unterschiedliche Aspekte berücksichtigt bzw. Annahmen zugrunde gelegt. [16] versteht unter technischem Potenzial, dasjenige welches unter Berücksichtigung der Anlagencharakteristik realisiert werden kann. In [13] wird es hingegen weiter eingeschränkt, da die Laständerung für eine Abruflaufzeit von mindestens einer Stunde möglich sein muss. In [14] werden hingegen technisches und theoretisches Potenzial gleichgesetzt. Das fehlende einheitliche Verständnis bezüglich der Begrifflichkeiten erschwert die Vergleichbarkeit der ausgewiesenen Potenziale zwischen den Studien.

Viertens enthalten nicht alle Studien vollständige Definitionen der erhobenen Potenziale bzw. Informationen über berücksichtigte Aspekte. So wird beispielsweise in [12, 14] festgehalten, dass das technische Potenzial untersucht wird, eine genaue Definition oder Angaben zu berücksichtigten Aspekten fehlen hingegen.

Fünftens existiert kein einheitliches Verständnis bezüglich der Beziehungen der einzelnen Potenzialbegriffe untereinander. In [13, 15, 16] ergeben sich die einzelnen Potenziale jeweils als Teilmengen übergeordneter Potenziale. [17] definiert sowohl das wirtschaftliche als auch das akzeptierte Potenzial als Teilmenge des technischen Potenzials. Das realisierbare Potenzial ergibt sich dann wiederum aus der Schnittmenge dieser beiden. Werden Potenziale nur aus Teilmengen übergeordneter Poten-

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

### **KEIN EINHEITLICHES VERSTÄNDNIS UND INTRANSPARENZ BEZÜGLICH ZU ERHEBENDER PARAMETER**

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

Maßgeblich ist darüber hinaus auch, inwiefern die betreffenden Studien genaue Informationen zu den einzelnen erhobenen Parametern oder lediglich ungefähre Angaben zu Parametergruppen enthalten. In [13, 19] ist der jeweils verwendete Fragebogen im Anhang verfügbar. [2, 5, 7, 8, 17] stellen zwar keinen Fragebogen zur Verfügung, es sind jedoch Informationen zu den erhobenen Parametern in Form von Auflistungen oder Erläuterungen enthalten. Die Notwendigkeit zur Angabe erhobener Parameter ist auch durch die Methode der Potenzialerhebung bedingt. Werden beispielsweise eine Metaanalyse oder Hochrechnung vorheriger Studienergebnisse durchgeführt, sind genaue Angaben zu erhobenen Parametern nicht notwendig bzw. möglich [3, 16]. Die übrigen fünf analysierten Studien enthalten indessen keine oder nur begrenzte Informationen [9, 12, 14, 15, 18]. Dies schränkt die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der angewandten Methoden ein.

### **ART DER LASTÄNDERUNG**

Bei den Arten der Laständerung, welche in den analysierten Studien untersucht werden, sind zwei kritische Aspekte erkennbar. Zum einen wird nicht immer klar zwischen Potenzialen der Lastreduktion und Lasterhöhung unterschieden. [3, 7] fassen diese unter Potenzialen für Lastverschiebung, Lastmanagement oder ähnlichen Begriffen zusammen. Aus dem Kontext wird klar, dass es sich hier um Potenziale zur Lastverschiebung handelt, bei der die Last zunächst reduziert wird und dann eine Phase des Ausgleichs durch entsprechende Lasterhöhung erfolgt. Potenziale für Lasterhöhung werden somit nicht angegeben. [19] weisen Verschiebepotenziale aus, wobei es sich letztendlich um Potenziale zur Lastreduktion handelt. [5, 8, 18] begrenzen ihre Analyse auf Potenziale zur Lastreduktion. Die übrigen Studien differenzieren zwischen Lastreduktion und Erhöhung.

Zum anderen unterscheiden sich die analysierten Studien inwiefern mögliche Produktionsausfälle aufgrund von Lastreduktion berücksichtigt werden. [2, 17, 19] weisen ein technisches Potenzial aus, welches den Produktionsausfall explizit zulässt. Die in [12, 14] ausgewiesenen Potenziale beinhalten ebenfalls den Produktionsausfall, was sich in diesen beiden

Fällen jedoch nur aus dem Kontext ergibt. [1, 5, 8, 18] setzen die weitgehend uneingeschränkte Wertschöpfung als Randbedingung und schließen somit den Produktionsausfall bei der Potenzialerhebung eindeutig aus. In [7, 13, 16] werden die Fälle mit und ohne Produktionsausfall untersucht und die entsprechenden Potenziale separat ausgewiesen. [9, 15] gehen hingegen nicht darauf ein wie bei der Potenzialerhebung mit möglichen Produktionsausfällen durch Lastreduktion umgegangen wird. Die analysierten Studien wählen folglich unterschiedliche Ansätze inwiefern ein möglicher Produktionsausfall berücksichtigt wird.

### **BETRACHTUNGSZEITRAUM**

Die Frage, ob die Erhebung auf Basis heute installierter Anlagen erfolgt oder ob zukünftige technische Entwicklungen mit berücksichtigt werden, hat erheblichen Einfluss auf die ausgewiesenen Potenziale. [2, 12, 13, 16, 17] geben explizit an, dass die ausgewiesenen Potenziale eine Momentaufnahme auf Basis aktuell installierter Anlagen darstellen. Zukünftige Flexibilitätspotenziale, welche erst durch technische Weiterentwicklungen oder Veränderungen an Prozessen und Anlagen möglich werden, sind somit nicht Gegenstand der Untersuchung. [19] unterscheiden drei Fälle: Potenziale, die bereits heute genutzt werden können, solche, welche nur durch Neuerrichtungen von Anlagen oder Erneuerung wesentlicher Anlagenteile gehoben werden können und solche, die erst mittel- bis langfristig zur Verfügung stehen, da weiterer Forschungsbedarf oder die Errichtung von Demonstrationsanlagen notwendig sind. In [7] werden über die Entwicklung der spezifischen Verbräuche und Produktionsmengen zukünftige Potenziale für 2020, 2025 und 2030 berechnet. In den übrigen Studien werden keine direkten Angaben diesbezüglich gemacht. Allerdings lässt sich meist aus dem Kontext ableiten, dass sich die Erhebungen ebenfalls auf aktuelle Potenziale beziehen. In einigen Fällen werden Potenziale aus Stromverbräuchen und installierten Leistungen bestimmter Jahre abgeleitet. In anderen Fällen lässt die Durchführung von Befragungen darauf schließen, dass der Erhebung Anlagen, welche dem aktuellen Stand der Technik entsprechen, zugrunde gelegt werden. Wird bei Befragungen nicht explizit erwähnt, dass auch technische Weiterentwicklungen mit einbezogen werden, kann davon ausgegangen werden, dass dies nicht der Fall ist. Nichtsdestotrotz werden diese Rückschlüsse nur auf Basis der veröffentlichten Dokumente getroffen und es bleibt offen, ob die analysierten Studien tatsächlich identische Annahmen über den technischen Ausstattungsgrad der installierten Anlagen treffen.

### **ART UND BILANZRAUM DER DATENERHEBUNG**

Die Datenerhebung erfolgt in den analysierten Studien auf drei Arten: bottom-up, in einer Kombination aus top-down und bottom-up oder auf Basis einer Metaanalyse. Die gewählte Art der Datenerhebung beeinflusst die Höhe der ausgewiesenen Potenziale, da unterschiedliche Aspekte Eingang in die Erhebung finden. [7, 9, 13, 17, 19] wählen einen bottom-up Ansatz. Hierzu werden telefonische oder Vor-Ort-Befragungen von Experten und Unternehmen durchgeführt. In den beiden Studien der FfE [7, 17] fließen zudem Datenauswertungen aus Begehungen ein. Die ausgewiesenen Potenziale werden dann durch entsprechende Aggregation der Daten bestimmt. In [2, 3, 5, 8, 12, 14] werden die Flexibilitätspotenziale in einer Kombination aus top-down und bottom-up Ansatz erhoben. In einem ersten Schritt wird hierbei top-down der mittlere Leistungsbedarf ermittelt. Hierzu wird über Tonnage und spezifischen Verbrauch

der Jahresstromverbrauch berechnet. Unter Berücksichtigung der Volllaststunden ergibt sich hieraus der mittlere Leistungsbedarf. In einem zweiten Schritt wird dann durch Multiplikation mit dem flexibilisierbaren Anteil das Flexibilitätspotenzial bestimmt. Dieser flexibilisierbare Anteil stammt aus Befragungen und wird somit bottom-up bestimmt. Eine Metaanalyse zur Potenzialerhebung wird in [16] angewendet. Zu diesem Zweck werden Potenziale aus drei Studien nach ihrer Umsetzbarkeit kategorisiert und um Expertenschätzungen ergänzt. Eine genaue Beschreibung wie die Daten bzw. Potenziale aus den drei entsprechenden Studien in die Berechnung der ausgewiesenen Potenziale einfließen ist in dieser Studie nicht enthalten. In [15] ist die Art der Datenerhebung nicht eindeutig bestimmbar. Vermutlich ergeben sich die Potenziale ebenfalls aus der Aggregation von Daten vorrangigere Studien, da nicht auf Ergebnisse der selbst durchgeführten Befragung verwiesen wird.

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

### **BILANZRAUM AUSGEWIESENER POTENZIALE**

Zusätzlich zum Bilanzraum der Datenerhebung sind auch beim Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale Diskrepanzen erkennbar. Mögliche Ausprägungen sind hier einzelne Prozesse, Branchen sowie die energieintensive Industrie als Ganzes. [2, 3, 7, 8, 17] wählen den engsten Bilanzraum und geben die erhobenen Potenziale auf Prozessebene – beispielsweise für die Aluminiumelektrolyse – an. Letztere Studie bildet hier noch einmal eine Ausnahme, da nicht das deutschlandweit hochgerechnete Potenzial des Prozesses, sondern das Potenzial eines einzelnen typischen Prozesses bzw. einer typischen Anlage ausgewiesen wird. Auch in [13] ist der Bilanzraum der ausgewiesene Prozess. Allerdings werden hier aus Datenschutzgründen die Potenziale einzelner Prozesse (z. B. Aluminiumelektrolyse und Luftzerlegung) zusammengefasst. Den weitesten Bilanzraum setzt [16]. Hier werden die erhobenen Potenziale aus der Metaanalyse auf Sektoren aggregiert und so lediglich ein Potenzial für die gesamte energieintensive Industrie angegeben. In den übrigen Studien ist der Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale die jeweilige Branche – beispielsweise die Chemieindustrie.

Auch in diesem Fall erschwert die Wahl unterschiedlicher Bilanzräume die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Darüber hinaus zeigt der Vergleich, dass der Bilanzraum der Datenerhebung und der Bilanzraum der ausgewiesenen Potenziale in einigen Fällen nicht übereinstimmen. Es ist fraglich, inwiefern eine Datenerhebung auf Prozessebene eine Hochrechnung der entsprechenden Potenziale auf eine gesamte Branche überhaupt zulässt. Wird beispielsweise das Potenzial des Holzschleifers untersucht und dieses dann auf die gesamte Papierindustrie übertragen, so ist dies als obere Grenze zu verstehen.

## **BERECHNUNGSMETHODE**

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

[5, 8] wählen einen top-down Ansatz, wodurch eine Hochrechnung der erhobenen Potenziale nicht notwendig ist. Die Berechnungen in [15] basieren auf den deutschlandweiten Potenzialen vorangegangener Studien. Auch hier bedarf es folglich keiner Hochrechnung der Potenziale. In [16] wird die Vorgehensweise umgekehrt. Das deutschlandweite Potenzial wird auf Basis dreier Studien ermittelt und dann über Produktionskapazitäten auf Nordrhein-Westfalen skaliert. Schließlich wird in [17] ganz auf eine Hochrechnung verzichtet und das Flexibilitätspotenzial für einen typischen Prozess bzw. eine typische Anlage ausgewiesen. In jener Studie wird insbesondere auf die Schwierigkeiten bei der Hochrechnung aus Erhebungen einer ausgewählten Stichprobe eingegangen. Enthält die Stichprobe hauptsächlich Unternehmen, die sich bereits in der Vermarktung befinden, so besteht die Gefahr einer Überschätzung der Flexibilitätspotenziale. Es ist anzunehmen, dass sich zunächst Unternehmen mit vergleichsweise niedrigen Implementierungs- und Betriebskosten bzw. hohen Erlösen zur Vermarktung entschließen. Diese Unternehmen sind jedoch höchstwahrscheinlich nicht repräsentativ für die Gesamtheit der Industriebetriebe. Wird die Stichprobe jedoch von Unternehmen dominiert, die noch nicht an einer Vermarktung teilnehmen, so ist eine Unterschätzung der Potenziale zu erwarten. Es wird angenommen, dass im Verlauf der Implementierung von Flexibilisierungsmaßnahmen weitere Potenziale aufgedeckt werden, welche die erste Einschätzung der Unternehmen übersteigen. Letztendlich können insbesondere Hochrechnungen aus kleinen Stichproben zu verfälschten Ergebnissen führen. Eine detaillierte Diskussion zur möglichen Problematik der Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen findet sich in Kapitel 1.1.2)

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

## **TECHNO-ÖKONOMISCHE, ZEITLICHE UND ÖRTLICHE DIFFERENZIERUNG**

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

Die größte Vielfalt zeigt sich hier bei der Differenzierung nach techno-ökonomischen Aspekten. [18, 19] weisen die erhobenen Potenziale separat für verschiedene Abrufdauern aus. [13] differenzieren die Potenziale zudem nach zehn Nutzungsformen, welche in Anlehnung an verschiedene Vermarktungsoptionen definiert werden. [5, 7] entwickeln Kosten-Potenzial-Kurven, in denen die Potenziale aufsteigend nach ihren Kosten sortiert werden. [2, 3, 8, 17] berücksichtigen verschiedene Aspekte bei der Erhebung, weisen die Potenziale jedoch nicht explizit differenziert aus.

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

Eine örtliche Differenzierung der ausgewiesenen Potenziale wird in [7] realisiert. Nichtsdestotrotz wird die örtliche Verfügbarkeit auch in anderen Studien beachtet. Insbesondere wenn Unternehmensbefragungen Teil der Erhebung sind, ist davon auszugehen, dass die Potenziale zumindest teilweise standortscharf vorliegen.

### 1.1.1.3 LÖSUNGSVORSCHLÄGE FÜR DIE IDENTIFIZIERTEN PROBLEMFELDER ZUR ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR POTENZIALERHEBUNG

#### **EINHEITLICHE DEFINITION UND KLARE ABGRENZUNG DER POTENZIALBEGRIFFE**

In einem ersten Schritt erfolgt die Auswahl von fünf relevanten Potenzialbegriffen, für die einheitliche Definitionen festgelegt werden. Abbildung 1.2 stellt dar wie sich die einzelnen Potenziale aus Schnittmengen bzw. Teilmengen übergeordneter Potenziale ergeben.

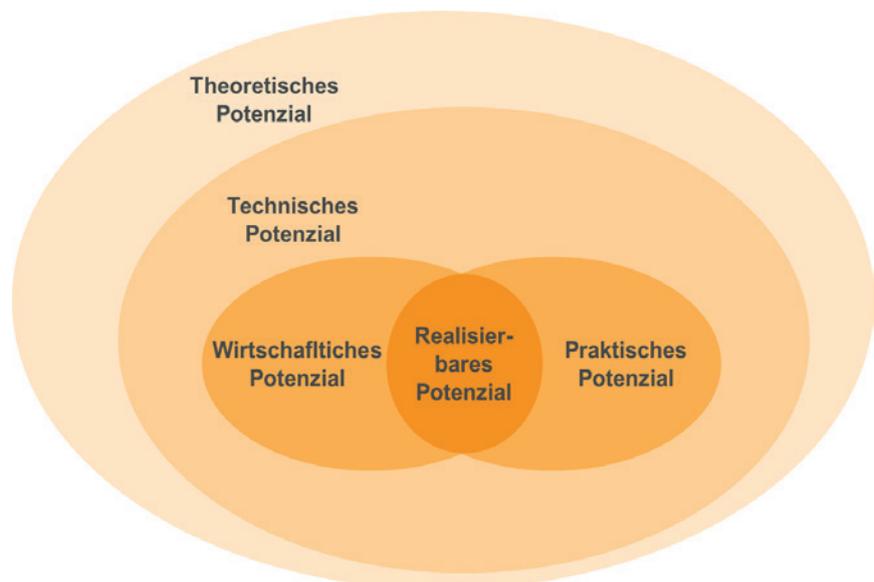


Abbildung 1.2: Abgrenzung der verschiedenen Potenzialbegriffe

Das theoretische Potenzial ist eine rein rechnerische Größe. Es wird zu jedem Zeitpunkt durch die installierte Leistung der Anlage und die Ist-Last bestimmt. Im Rahmen der vorliegenden Studie wird dieses Potenzial nicht ausgewiesen, da es zu Fehlinterpretationen und Überschätzung der verfügbaren Flexibilität führen kann.

Beim technischen Potenzial werden hingegen zusätzlich sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen berücksichtigt. Es stellt somit die Last dar, welche aus technischer Sicht zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Im Rahmen dieser Studie wird das technische Potenzial unter der Nebenbedingung erhoben, dass keine Lieferverpflichtungen verletzt werden (bzw. Ausbringungsmenge und Qualität konstant gehalten werden).

Das wirtschaftliche Potenzial ist eine Teilmenge des technischen Potenzials. Es entspricht dem Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich genutzt werden kann. Dies ist der Fall, wenn unter Berücksichtigung des Zeitwerts des Geldes die durch die Flexibilisierung generierten Erlöse die entsprechenden Kosten übersteigen. Das wirtschaftliche Potenzial wird in dieser Studie nicht ausgewiesen. Soweit wie möglich werden Kosten erhoben.

Das praktische Potenzial ist ebenfalls eine Teilmenge des technischen Potenzials. Bei der Erhebung des praktischen Potenzials werden zusätzlich unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mit einbezogen. Im Rahmen dieser Studie werden relevante Hemmnisse qualitativ untersucht. Das praktische Potenzial wird jedoch nicht ausgewiesen.

Das realisierbare Potenzial ergibt sich schließlich als Schnittmenge des wirtschaftlichen und des praktischen Potenzials. Es ist damit das Potenzial, das betriebswirtschaftlich sinnvoll von Unternehmen genutzt und gleichzeitig auch von den Unternehmen selbst für Flexibilisierungen freigegeben werden kann. Das realisierbare Potenzial wird in dieser Studie nicht ausgewiesen.

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

#### **EINDEUTIGE ZUORDNUNG DER ZU ERHEBENDEN PARAMETER JE POTENZIALBEGRIFF**

Um die Transparenz der Potenzialerhebung zu gewährleisten, werden den Potenzialbegriffen jeweils Parameter zugeordnet, die für deren Erhebung abgefragt werden müssen. Abbildung 1.3 stellt diese Zuordnung graphisch dar.

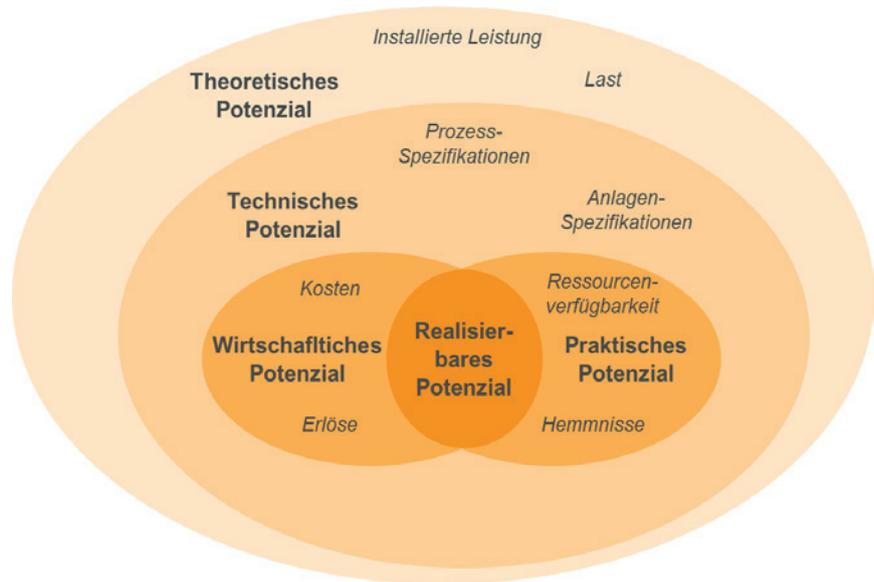


Abbildung 1.3: Zuordnung der zu erhebenden Parameter je Potenzialbegriff

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

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

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

Da die Erhebung des technischen Potenzials sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen einschließt, müssen hierfür Prozess- und Anlagenspezifikationen abgefragt werden. Hierzu zählen beispielsweise Vorankündigungszeiten und Sperrzeiten bis zur nächsten Laständerung sowie die maximale Abrufdauer. Darüber hinaus sind bei Bedarf Daten zu Materialspeichern für Vorprodukte und Produkte zu erfassen.

Zur Ermittlung des wirtschaftlichen Potenzials müssen zusätzlich mit der Flexibilisierung verbundene Kosten und Erlöse erhoben werden. Die Erlöse setzen sich aus möglichen Einsparungen bei den Stromkosten und Erlösen, welche durch die Vermarktung der Flexibilität generiert werden, zusammen. Zu den Kosten zählen Investitionen, fixe und variable Betriebskosten sowie Opportunitätskosten für den Fall verminderter Produktion. Diese entsprechen hierbei den „Entgangene[n] Erträge[n] oder Nutzen im Vergleich zur besten, nicht realisierten Handlungsalternative“ [20]. Im Kontext der Lastflexibilisierung entstehen diese im Falle einer Lastreduktion, die nicht ausgeglichen werden kann. Sie entsprechen dem entgangenen Deckungsbeitrag durch die verminderte Produktion [7]. Die notwendigen Investitionen müssen sich hierbei innerhalb einer definierten Dauer amortisieren. Diese Amortisationsdauer kann zwischen Betrieben bzw. Analagentypen variieren.

Beim praktischen Potenzial werden unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse mitbetrachtet. Hierzu zählen beispielsweise tarifrechtliche Bestimmungen, welche einer Anpassung der Produktion entgegenstehen können. Des Weiteren werden Ressourcenverfügbarkeit sowie Planbarkeit bzw. Prognosesicherheit der Laständerung berücksichtigt. Unter Ressourcen sind hierbei die Verfügbarkeit von Mitarbeitern und das Vorhandensein von Rohstoffen im Prozess vorge-

lagerten Speicher zu verstehen. Ein ausreichend großer nachgelagerter Produktspeicher findet hingegen Eingang in die Ermittlung des technischen Potenzials, da sich hieraus unter Umständen sicherheitsrelevante Probleme ergeben können. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Lasterhöhung bei der Chlorelektrolyse zu einer Mehrproduktion von Chlor führt, die vom nachgelagerten Speicher nicht mehr aufgenommen werden kann.

Das realisierbare Potenzial ergibt sich aus der Schnittmenge des wirtschaftlichen und des praktischen Potenzials. Daher müssen für dessen Bestimmung alle Parameter dieser beiden Potenziale erhoben werden.

### **ANALYSE VERSCHIEDENER ARTEN DER LASTÄNDERUNG**

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

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die klare Unterscheidung zwischen Lastreduktion und -erhöhung. Ersteres wird in Anlehnung an die Definition des Regelleistungsmarkts auch als positives Leistungspotenzial bezeichnet und bedeutet Reduktion der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb. Zweiteres, auch negatives Leistungspotenzial genannt, entspricht der Erhöhung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Referenzbetrieb. Die alleinige Ausweisung eines dieser beiden Potenziale zur Lastflexibilisierung ist nicht ausreichend, da Reduktion und Erhöhung der Last in der Regel nicht in gleichem Maße möglich sind.

Bei der Lastreduktion muss zusätzlich ein möglicher Ausgleichsbedarf berücksichtigt werden. Bei Querschnittstechnologien (z. B. Beleuchtung) ist eine Lastreduktion teilweise auch ohne späteren Ausgleich möglich. Bei stromintensiven Prozessen führt die Lastreduktion ohne folgenden Ausgleich jedoch häufig zu Produktionsausfall. Eine Ausnahme bilden hier Hybridlösungen. In diesem Fall kann eine Reduktion der elektrischen Last direkt durch eine Erhöhung des Erdgasbedarfs ausgeglichen werden und es ergibt sich kein nachträglicher Ausgleichsbedarf. Demzufolge sind im Wesentlichen zwei Aspekte von Bedeutung. Im ersten Schritt ist zu klären, ob durch die Lastreduktion ein Ausgleichsbedarf entsteht. Ist dies der Fall, ist weiterhin ausschlaggebend, ob dieser Bedarf bedient wird, um zu beurteilen, ob es zu einem Produktionsausfall kommt. Entscheidend ist in diesem Kontext immer auch innerhalb welches Zeitrahmens die Lastreduktion ausgeglichen werden muss, um einen Produktionsausfall zu vermeiden. Wie oben erwähnt gilt in dieser Studie die Nebenbedingung, dass durch eine Lastreduktion keine Lieferverpflichtungen verletzt werden.

### **KLARE ABGRENZUNG DER BETRACHTUNGSZEITRÄUME**

Um eindeutig zwischen Flexibilität, die bereits heute zur Verfügung stehen, und solchen, welche erst zukünftig realisiert werden können, abzugrenzen, werden die Begriffe Flexibilitätspotenziale und Flexibilitätsperspektiven eingeführt.

Flexibilitätspotenziale bezeichnen die flexibilisierbare Last der aktuell installierten Anlagen unter heutigen Rahmenbedingungen. D.h. es ist lediglich die Nachrüstung von entsprechender Hard- und Software not-

wendig, um eine flexible Fahrweise der Anlage zu ermöglichen. Flexibilitätspotenziale stellen den Schwerpunkt der Studie dar und werden durch eine quantitative Analyse ermittelt.

Flexibilitätsperspektiven hingegen bezeichnen zukünftige Potenziale, welche durch Weiter- und Neuentwicklungen der technischen, wirtschaftlichen und praktischen Rahmenbedingungen nutzbar werden. In dieser Studie liegt der Fokus auf technischen Flexibilitätsperspektiven, welche nur durch technische Eingriffe bzw. Veränderungen an Prozessen umgesetzt werden können. Diese werden dabei in die folgenden drei Kategorien unterteilt. Erstens kann durch einen Energieträgerwechsel – d.h. durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung – zusätzliche Flexibilität geschaffen werden. Zweitens fallen die Erweiterung von Stoff- und Energiespeichern unter Flexibilitätsperspektiven. Durch die Vergrößerung eines Produktspeichers kann beispielsweise die Abrufdauer einer Lasterhöhung verlängert werden, da ausreichende Lagerkapazitäten für die Mehrproduktion zur Verfügung stehen. Somit steigt das technische Potenzial der Lasterhöhung. Drittens zählen der Umbau bzw. die Weiterentwicklung von Anlagen bzw. des gesamten Prozesses, welche die Flexibilität erhöhen, zu möglichen Flexibilitätsperspektiven. Die Analyse der Flexibilitätsperspektiven erfolgt zunächst im Rahmen einer qualitativen Beschreibung. Eine genauere Analyse erfolgt ggf. in Folgeprojekten.

#### **IDENTISCHER BILANZRAUM DER DATENERHEBUNG UND DER AUSGEWIESENEN POTENZIALE**

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

Im ersten Schritt werden in dieser Studie durch die Branchenvertreter für die einzelnen Branchen relevante Prozesse bestimmt. Diese sind für die jeweilige Branche typische Prozesse. Sie werden jedoch hinsichtlich technischer Kennzahlen im Gegensatz zu Referenzprozessen nicht einheitlich und anlagenübergreifend parametrisiert, da sich dies im Projektverlauf als nicht möglich erweist. Die gewählten relevanten Prozesse sind Tabelle 1.2 zu entnehmen.

Tabelle 1.2: Ausgewählte Prozesse der untersuchten Branchen

<b>Branche</b>	<b>Ausgewählte Prozesse</b>
<b>Chemieindustrie (DEC)</b>	Chlor-Alkali-Elektrolyse
<b>Feuerfestindustrie (FGF)</b>	Rohstoffschmelzanlage
<b>Glasindustrie (HVG)</b>	Behälterglasherstellung
<b>Stahlindustrie (BFI)</b>	Elektrostahlöfen
<b>Zementindustrie (VDZ)</b>	Roh- und Zementmahlung

In dieser Studie liegt der Fokus zunächst auf der Erhebung der Flexibilitätspotenziale einzelner relevanter Prozesse. Soweit möglich wird anschließend eine Hochrechnung auf Deutschland vorgenommen. Aufgrund des Ansatzes über relevante Prozesse ist die Hochrechnung der ermittelten Flexibilitätspotenziale nur in einzelnen Branchen möglich.

### **TECHNO-ÖKONOMISCHE, ZEITLICHE UND ÖRTLICHE DIFFERENZIERUNG**

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

In dieser Studie werden im Rahmen einer techno-ökonomischen Differenzierung die folgenden drei Anforderungsprofile aus Sicht des Energiesystems entwickelt:

- Kurzfristige Anpassung der Last
- Anpassung der Last über mehrere Stunden
- Reduktion der Last über mehrere Tage

Eine detaillierte Beschreibung dieser Profile findet sich in Kapitel 1.4.

## **1.1.2 PROBLEMATIK DER HOCHRECHNUNG VON FLEXIBILITÄTSPOTENZIALEN**

Bei der Hochrechnung von Flexibilitätspotenzialen aus Erhebungen kann es vorrangig zu den folgenden drei Problemen kommen:

- Einzelne Werke sind sehr heterogen
- Anlagen einzelner Standorte sind nicht alle zu jedem Zeitpunkt in Betrieb
- Über- oder Unterschätzung der Flexibilitätspotenziale in Abhängigkeit der Stichprobe

Erstens sind die Voraussetzungen für Flexibilität in den einzelnen Betrieben sehr unterschiedlich. Das Flexibilitätspotenzial hängt sehr stark von der Auslastung der einzelnen Betriebe ab. Diese kann jedoch stark zwischen einzelnen Betrieben einer Branche variieren und ist nicht für alle Betriebe bekannt. Darüber hinaus sind die internen Betriebsabläufe der einzelnen Betriebe sehr heterogen. Daher ist die Hochrechnung anhand der Ergebnisse aus einzelnen Unternehmensbefragungen mit Unsicherheiten verbunden.

Zweitens befinden sich nicht alle Anlagen eines Referenzprozesses an allen Standorten zu jedem Zeitpunkt im gleichen Betriebspunkt. Zum einen wird die Fahrweise und damit Leistungsaufnahme einzelner Anlagen durch die spezifische Werksauslastung bestimmt. Zum anderen wird die Last bei Prozessen mit variierender Leistungsaufnahme wie beispielsweise der Elektrostahlerzeugung durch den jeweiligen Zeitpunkt im Prozessablauf bestimmt. Es ist anzunehmen, dass sich zu einem beliebigen Zeitpunkt nicht alle Anlagen im gleichen Prozessschritt befinden und daher eine unterschiedlich hohe Leistungsaufnahme aufweisen. Ferner werden Wartungsintervalle werkspezifisch geplant. D.h. es kann nicht davon ausgegangen werden, dass zu einem beliebigen Zeitpunkt alle Anlagen eines Referenzprozesses in Betrieb sind. Wird also das in Befragungen ermittelte Flexibilitätspotenzial beispielsweise durch Multiplikation mit der Anzahl der Werke hochgerechnet, so führt dies zu einer Überschätzung des verfügbaren Flexibilitätspotenzials. Um diesen Fehler zu korrigieren, müsste bei der Hochrechnung ein entsprechender Gleichzeitigkeitsfaktor berücksichtigt werden. Dieser ist jedoch nicht bekannt.

Drittens kann es durch die Zusammensetzung der Stichprobe zu einer Über- oder Unterschätzung der Flexibilitätspotenziale kommen. Im Rahmen des Projektes werden die Flexibilitätspotenziale mittels Unternehmensbefragungen durch die Branchenvertreter erhoben, woraus sich folgende Probleme ergeben können<sup>3</sup>. Werden vorrangig Unternehmen befragt, welche sich bereits in der Vermarktung von Flexibilität befinden, kann es zu einer Überschätzung der Potenziale kommen. Die Vermarktung von industrieller Flexibilität befindet sich noch im Aufbau. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich zunächst Unternehmen mit besonders niedrigen spezifischen Implementierungs- und Betriebskosten und/oder hohen Erlösen für die Vermarktung entscheiden. Diese sind voraussichtlich nicht repräsentativ für die Grundstoffindustrie als Ganzes. Werden jedoch hauptsächlich Unternehmen befragt, die sich noch nicht in der Vermarktung befinden, so werden die vorhandenen Flexibilitätspotenziale unterschätzt. Gespräche mit Vermarktern im Rahmen des DSM-Bayern Projektes der FfE GmbH [17] und des IHK-Projektes [21] zeigten, dass im Laufe Implementierung von industrieller Flexibilität weitere Potenziale identifiziert werden, die über die erste Einschätzung der DSM-Potenziale durch die Unternehmen hinausgehen. Gründe hierfür sind einerseits mangelnde Kenntnisse seitens der Unternehmen über die Möglichkeiten der Vermarktung und andererseits ein grundsätzlich eher vorsichtiges Vorgehen aufgrund von Befürchtungen, vermehrte Flexibilität könnte die Produktion negativ beeinflussen. Für Unternehmen ohne eigene Vermarktungserfahrung ist es oft schwer, Parameter wie Vorankündigungsdauern, Abrufdauern, Abrufhäufigkeiten und mögliche Kosten abzuschätzen.

<sup>3</sup> Eine detaillierte Diskussion dieser Probleme findet sich in [17]

### 1.1.3 ERSTELLUNG EINES FRAGEBOGENS ZUR ERHEBUNG DES TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALS

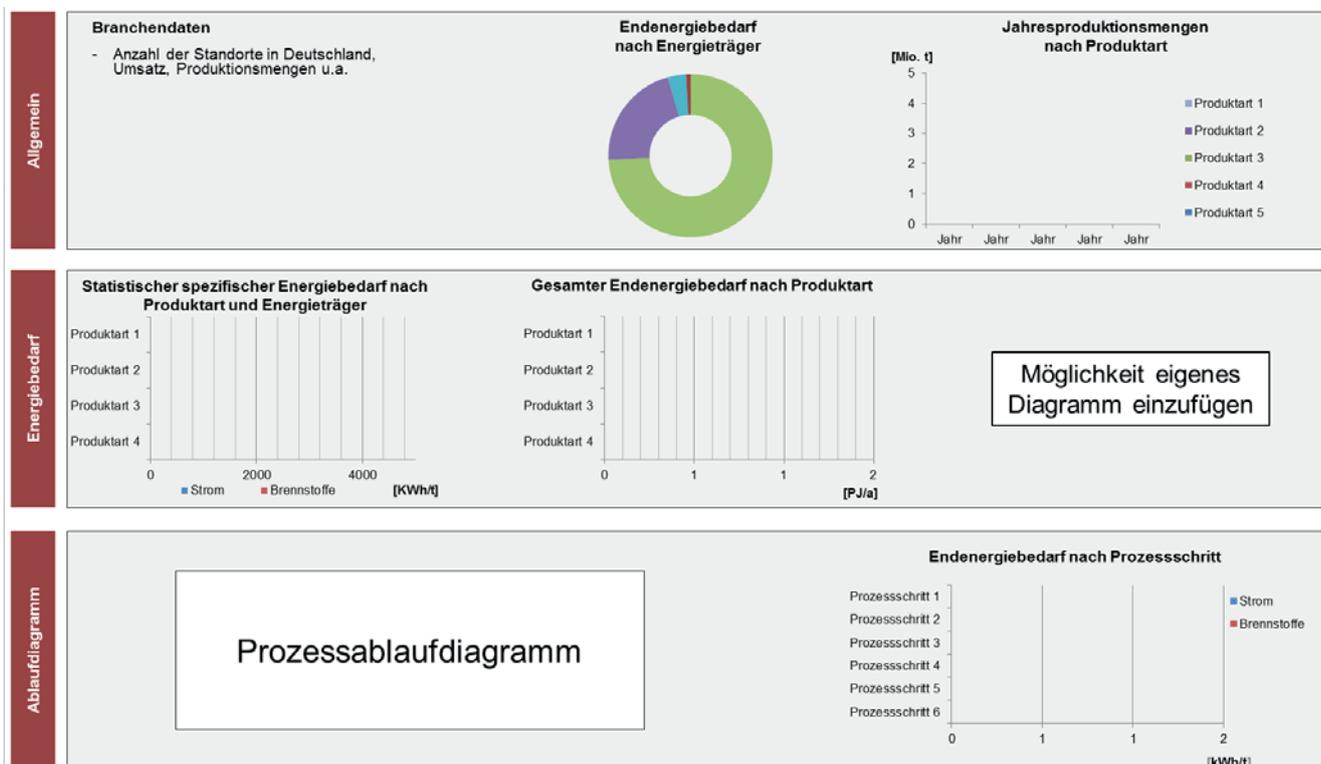
Auf Basis der Parameterzuordnung je Potenzialbegriff (siehe Abbildung 1.3) wird eine Liste zu erhebender Daten erstellt. In Zusammenarbeit mit den Branchenexperten wird geklärt, inwiefern die entsprechenden Daten bereits vorliegen bzw. erhoben werden können. Aufbauend auf diesen Informationen wird ein Fragebogen erstellt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wird dieser anschließend mit der Befragung in Cluster I und V des Projektes SynErgie abgestimmt. Dieser Fragebogen bildet dann die Grundlage für die Unternehmensbefragung der Branchenexperten.

### 1.1.4 STECKBRIEFE ZUR AGGREGATION DER ERGEBNISSE

#### BRANCHENSTECKBRIEF

Um einen ersten Überblick über die ausgewählten Referenzprozesse und deren Bedeutung in der jeweiligen Branche zu liefern, werden entsprechende Vorlagen entwickelt (siehe Abbildung 1.4). Die ausgefüllten Branchensteckbriefe finden sich in den Kapiteln der Branchen.

Abbildung 1.4: Vorlage für einen Branchensteckbrief



### STECKBRIEF FÜR REFERENZPROZESS

Zur Aggregation der Ergebnisse werden ferner Steckbriefe für die einzelnen Referenzprozesse entwickelt. Diese erleichtern die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Referenzprozessen.

Abbildung 1.5: Vorlage für einen Referenzprozess-Steckbrief

Referenzprozess	<b>Referenzprozess</b>		
	Typische Anlagengröße in MW	XX – YY	
	<b>Technisches Potenzial</b>	<b>Negativ</b>	<b>Positiv</b>
	Potenzial in MW oder %		
	Abrufdauer in Min.		
	Abrufhäufigkeit		
			Exemplarischer Lastgang und Darstellung der Verfügbarkeit für Flexibilität
Perspektiven und Effizienz	<b>Flexibilitätsperspektiven</b>		<b>Das Wichtigste in Kürze</b>
	Beschreibung verschiedener FlexPerspektiven, deren Auswirkungen auf die Flexibilität des Referenzprozesses, Hemmnisse bei der Umsetzung u.a.		• ...
		<b>Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität</b>	
Energiewirtschaftliche Bedeutung	<b>Anforderungsprofile</b>		
	1	Welche Anforderungsprofile können erfüllt werden, warum nicht u.a.	
	2		
	3		
			Feld für weitere wichtige Informationen

## 1.1.5 ANHANG

Tabelle 1.3: Übersicht über 28 analysierte Studien

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

		<b>BMVIT 2011 [19]</b>	<b>DENA 2010 [2]</b>	<b>DIW 2013 [3]</b>
<b>Potenzialbegriffe</b>		Technisch, wirtschaftlich	Technisch, ökonomisch nutzbar	Ökonomisch
<b>Erhobene Parameter</b>		Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Technische Kennzahlen, Kosten, Speicherdaten	Technische Kennzahlen, weiche Faktoren
<b>Art der Laständerung</b>		Lastreduktion Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Keine Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung, Exklusive Produktionsausfall
<b>Betrachtungszeitraum</b>		Aktuell installierte Anlagen und zukünftige Potenziale	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
<b>Art und Bilanzraum der Datenerhebung</b>		Top-down je Branche Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess
<b>Bilanzraum ausgewiesener Potenziale</b>		Branche	Prozess	Prozess
<b>Berechnungsmethode</b>		Basis: Potenzial der befragten Betriebe, Hochrechnung über Stromverbrauch	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung je nach Branche über Produktionsmengen	Basis: Potenzial Süddeutschland Hochrechnung über Produktionsmengen auf Gesamtdeutschland
<b>Differenzierung</b>	<b>Techno-ökonomisch</b>	Abrufdauer, Kosten-Potenzial-Kurven für verschiedene Abrufdauern	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen
	<b>Zeitlich</b>	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeit, Werktag und Sonntag, Jahreszeit
	<b>Örtlich</b>	Österreich	Deutschland	Deutschland

Tabelle 1.4: Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder

	EANRW 2016 [16]	ETH 2007 [5]	FFE 2016 [7]	FFE 2013 [8]
	Technisch, wirtschaftlich, erschlossen	Technisch, ökonomisch, technisch-ökonomisch, realisierbar	Technisch	Technisch, wirtschaftlich/ökonomisch, realisierbar oder praktisch
	keine, da Potenzial-erhebung aus Metastudienanalyse	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten	Technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Mindestersparnis/-erlös
	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusiv und exklusiv Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusiv Produktionsausfall	Keine Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusiv und exklusiv Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusiv Produktionsausfall
	Aktuell installierte Anlagen	Aktuelle installierte Anlagen (Berechnung für spezifisches Jahr)	Aktuell installierte Anlagen, zusätzliche Ausweisung der Potenziale für 2020, 2025, 2030	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
	Metaanalyse auf Prozessebene	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess (für Bestimmung des flex. Anteils)	Bottom-up über Prozess	Top-down über Prozess und bottom-up Validierung
	Energieintensive Industrie	Branche	Prozess	Prozess
	Basis: deutschlandweites Potenzial der energieintensiven Industrie aus Metaanalyse Skalierung auf NRW über Produktionskapazitäten zzgl. Aufschlag gemäß Expertenschätzung	Durchschnittlicher Leistungsbedarf (aus Produktionsmenge, spez. Stromverbrauch und Betriebsstunden) multipliziert mit flexiblem Anteil in %	Basis: Potenzial je Standort Hochrechnung über Produktionsmengen je Standort	Basis: Anzahl der Standorte, Produktion und Stromverbrauch zur Ermittlung des maximalen Leistungsbedarfs, dann Anwendung flexibilisierbarer Anteil
	Kosten-Potenzial Kurven (für Betriebskosten)	Kosten-Potenzial Kurven (für Betriebskosten)	Kosten-Potenzial Kurven (variable Kosten, spezifische Gesamtkosten) für 1 h, 10 h, 1.000 h Abruf pro Jahr	- Abrufdauer, Betriebszustand, Vorankündigungszeiten - Abrufhäufigkeit - Eignung der Potenziale für einen Abruf im Rahmen von Redispatch, SRL
	Tageszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tages- und jahreszeitliche Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Tageszeit (Schichten), Werktag und Sonntag
	Deutschland	Deutschland	Landkreise Deutschland und Bezirke Österreich	Süddeutschland

		FFE 2016 [17]	FFE 2010 [18]	IER 2015 [9]
<b>Potenzialbegriffe</b>		Theoretisch, technisch, wirtschaftlich, akzeptiert, realisierbar	Theoretisch, technisch, wirtschaftlich, praktisch	Wirtschaftlich realisierbar, realisiert
<b>Erhobene Parameter</b>		Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, Kosten	Keine Angabe	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten
<b>Art der Laständerung</b>		Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive und exklusive Produktionsausfall	Lastreduktion Exklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Keine Angabe zum Produktionsausfall
<b>Betrachtungszeitraum</b>		Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Keine Angabe	Aktuell installierte Anlagen (Befragung)
<b>Art und Bilanzraum der Datenerhebung</b>		Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up über Prozess	Bottom-up über Prozess, top-down Validierung
<b>Bilanzraum ausgewiesener Potenziale</b>		Branche	Branche	Branche
<b>Berechnungsmethode</b>		Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung über Leistung, Speicherkapazität oder Strombedarf	Basis: Stromverbrauch je Branche, Literaturangaben und Expertenschätzung zu flexibilisierbaren Anteilen	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung mittels statistischer Verfahren (keine Angabe zu verwendeten Kennzahlen)
<b>Differenzierung</b>	<b>Techno-ökonomisch</b>	Verschiedene Aspekte werden berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Abrufdauer	Keine Angabe
	<b>Zeitlich</b>	Nein	Nein	Nein
	<b>Örtlich</b>	n.z.	Deutschland	Deutschland

Tabelle 1.4.2: Vergleich der analysierten Studien anhand der identifizierten Problemfelder

	TUD 2012 [12]	UBA 2015 [13]	VDE 2012 [14]	WI 2016 [15]
	Technisch	Technisch, soziotechnisch, wirtschaftlich, genutzt	Theoretisch, technisch, praktisch (theoretisches und technisches Potenzial sind identisch)	Theoretisch, technisch, technisch-ökonomisch, ökonomisch, sozio-ökonomisch, praktisch (Begriffe aus dem Englischen übersetzt)
	Technische Kennzahlen	Stromverbrauchsdaten, technische Kennzahlen, weiche Faktoren, Kosten	Keine Angabe	Unklar
	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung, Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall für technisches Potenzial, exklusive für soziotechnisches Potenzial	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung Inklusive Produktionsausfall	Unterscheidung Lastreduktion und -erhöhung, Keine Angabe zum Produktionsausfall
	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuell installierte Anlagen (explizit)	Aktuelle installierte Anlagen (Berechnung für spezifisches Jahr)	Keine Angabe
	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Bottom-up über Prozess	Kombination aus top-down und bottom-up für Prozess	Unklar
	Branche	Prozess	Branche	Branche
	Basis: Potenzial der befragten Betriebe Hochrechnung über Leistung, Speicherkapazität oder Strombedarf	Basis: Potenzial der befragten Betriebe, Hochrechnung je Branche über Produktionsmengen, Produktionskapazität oder Stromverbrauch	Basis: Potenzial der befragten Betriebe, Hochrechnung (keine Angabe zu verwendeten Kennzahlen)	Metaanalyse
	Keine Angabe	Vermarktungsoptionen	Keine Angabe	Keine Angabe
	Nein	Saisonale Verfügbarkeit wird berücksichtigt, aber Potenziale werden nicht differenziert ausgewiesen	Nein	Nein
	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland

## 1.2 METHODE ZUR ERMITTLUNG TECHNISCHER, ORGANISATORISCHER UND REGULATORISCHER HEMMNISSE

### 1.2.1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIEL DER METHODE

Das Projekt SynErgie hat zum Ziel, im Einklang mit rechtlichen und sozialen Aspekten, alle technischen und marktseitigen Voraussetzungen zu schaffen, um den Energiebedarf der deutschen Industrie maßgeblich mit dem volatilen Energieangebot zu synchronisieren. Das Cluster V.6 widmet sich in diesem Zusammenhang der Frage, welches Potenzial in der Nachfrageflexibilisierung von ausgewählten stromintensiven Produktionsprozessen der Grundstoffindustrie auszuweisen ist. Die Erhebung der flexiblen Last, die unter den heute gegebenen Rahmenbedingungen mit den derzeit existierenden technischen Anlagen nutzbar wäre erfordert dabei eine Berücksichtigung der Auswirkungen einer Flexibilisierung der Produktionsprozesse auf die betrieblichen Abläufe. Aus einem vertieften Verständnis dieser Einbettung der Produktionsprozesse in den betrieblichen Ablauf können dann für die Erschließung von nutzbaren Flexibilitätspotenzialen nötige Maßnahmen identifiziert werden.

Ziel der in diesem Kapitel entwickelten Methode ist es daher, Hemmnisse zu identifizieren, die einer Flexibilisierung von stromintensiven Produktionsprozessen aus organisatorischer und technischer Sicht entgegenstehen. Da diese Hemmnisse spezifisch für die Branche und den entsprechenden Produktionsprozess sind und ebenso von der Charakteristika (z.B. Abrufdauer) der Flexibilitätsmaßnahme abhängen, sollen die Hemmnisse nach Prozess und Anforderungsprofil differenziert untersucht werden. Damit einher geht eine erste Sondierung möglicher Maßnahmen zur Beseitigung einiger dieser Hemmnisse.

Die Erkenntnisse aus der durchgeführten Hemmnisanalyse sollen an Politik und Entscheidungsträger ein realistisches Bild der Möglichkeiten und Grenzen der Grundstoffindustrie vermitteln, und ein Verständnis der jeweiligen branchen- und prozessspezifischen Gegebenheiten und daraus resultierender Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Bereitstellung von Flexibilität schaffen.

### 1.2.2 VORGEHEN UND DATENQUELLEN

Eine tiefgehende Analyse branchen- und prozessspezifischer Gegebenheiten, und daraus resultierender Möglichkeiten und Einschränkungen bei der Bereitstellung von Flexibilität, existiert (entsprechend unserer Recherche) bisher in der Literatur nicht. Insbesondere ist derzeit keine systematische Herangehensweise verfügbar, welche die Vielzahl der möglichen Hemmnisse methodisch einordnet und dadurch allgemein bearbeitbar macht. Einige Hemmnisse werden in existierenden Studien berücksichtigt (vgl. Tabelle 1.5). Die Hemmnisse werden jedoch entweder nur benannt und nicht weiter erläutert und eingeordnet, was die Nachvollzieh-

barkeit und Vergleichbarkeit vermindert. Oder die Hemmnisse werden nicht branchen- bzw. prozessscharf diskutiert. Die Studie von Holtrup [32] bildet aufgrund ihrer umfassenden Darstellung von betrieblichen Hemmnissen für das Beispiel der Chloralkali-Elektrolyse eine Ausnahme.

Aufgrund der begrenzten Aussagekraft der Literatur waren die wesentlichen Datenquellen für die Hemmnisanalyse daher Gespräche mit Branchenvertretern, ergänzt und unterstützt durch eigene Recherchen in branchenspezifischen Medien (z.B. Webseiten der Verbände, Branchenberichte, Analysen der Wettbewerbssituation). Um einerseits einen Vergleich der Ergebnisse der Analyse der unterschiedlichen Branchen zu ermöglichen, und andererseits die Analyse offen für vorab unbekanntes spezifische Hemmnisse jeder Branche zu halten, wurde ein hypothesengeleitetes, datengetriebenes, iteratives Vorgehen gewählt. Damit wird zugleich eine systematische Methodik zur Bearbeitung der vielfältigen Hemmnisse vorgelegt. Diese ist im Projektverlauf erarbeitet und angewandt worden.

Die Hemmnisanalyse erfolgte in vier aufeinander aufbauenden Schritten:

1. Basierend auf grundlegenden Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Grundstoffindustrie sowie einer ersten Sichtung wesentlicher technischer und organisatorischer Charakteristika der Produktionsprozesse wurde ein Analyserahmen erstellt (s. unten, Kapitel 1.2.3).
2. Entsprechend des Analyserahmens wurde das anhand von Literatur und branchenspezifischen Medien erlangte (Vor-)Wissen aufbereitet und entsprechende weiterführende Fragen identifiziert und ein branchenspezifischer Fragenkatalog erstellt.
3. Im nächsten Schritt wurden semi-strukturierte Interviews mit Verbänden und Unternehmensvertretern durchgeführt. Die Leitfragen für die Interviews wurden dabei entlang des Analyserahmens formuliert und basierend auf den im vorherigen Arbeitsschritt gewonnenen Erkenntnissen auf die jeweilige Branche und den jeweiligen Prozess angepasst. Für jede Branche wurden separat einzeln oder mehrere Gespräche geführt. Die Interviews wurden entlang der Leitfragen in Interviewprotokollen zusammengefasst, und diese Protokolle im Nachgang mit den entsprechenden Interview-Teilnehmer/innen abgestimmt.
4. Darauf aufbauend wurde im letzten Schritt die Analyse und Synthese der Daten (Interviewprotokolle, Literatur) und Ausarbeitungen von Hemmnissen und Möglichkeiten – differenziert nach Prozess und Anforderungsprofil – vorgenommen.

Der Analyserahmen wurde dabei entsprechend der gewonnenen Erkenntnisse in einem iterativen Prozess erstellt und erweitert, und in die in Kapitel 1.2.3 dargestellte Form gebracht. Er ermöglichte, die Situation in den unterschiedlichen Branchen strukturiert abzubilden, so dass die in ihm identifizierten Hemmnisebenen und -dimensionen prinzipiell als relevant für die gesamte Grundstoffindustrie erachtet werden.

Studie	Branche	Identifizierte Hemmnisse
Klobasa 2007 [5]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Informationsdefizite und Unsicherheiten bzgl. Akzeptanz und zukünftigen Erlösmöglichkeiten; Zeitverfügbarkeit relevanter Akteure für Umsetzung eines Lastmanagements; Auslastung.
	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Hohe Auslastung; Qualitätseinbußen bei der Natronlauge.
Von Roon und Gobmaier 2010 [18]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Beeinflussung nachfolgender Prozesse; Schichtpläne und Besetzung von Produktionsstationen.
Apel et al. 2012 [14]	Elektrostahl (EAF)	Sobald Masse in flüssigem Zustand ist kann Herstellung nicht mehr unterbrochen werden.
	Zement	Speicherreichweiten der Zementsilos; Qualitätsverluste beim Hoch-/Runterfahren der Mühlen; Witterungsbedingter Produktionsrückgang im Winter ohne typischen Lastverlauf; Aufgrund von Produktionszeiten der Zementmühlen Beschränkung des Potenzials für positives Lastmanagement auf Werktage (tagsüber) und für negatives auf Werktage (nachts) sowie Wochenenden.
	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Notwendige Synchronisation mit anderen Stoffströmen und Prozessen beim (Wieder-)Hochfahren der CAE.
Klobasa et al. 2013 [8]	Grundstoffindustrie (allgemein)	Technisches Risiko einer Produktionsstörung; Mögliche Beeinträchtigung der Produktqualität; Störung der Arbeitsabläufe; Zusätzlicher Arbeitsaufwand; Mangelnde Qualifikation der Mitarbeiter; Technische Möglichkeiten nicht bekannt; Datensicherheit.
	Elektrostahl (EAF)	Wärmeverluste bei Abschalten des EAF während des Betriebs bzw. durch Auskühlen bei längerem Stillstand.
	Zement	Begrenzte Größe der Silos für Rohmehl; Auskühlen der Rohmühlen führt nach 1–2h zu Effizienzverlusten.

Tabelle 1.5: In der Literatur benannte Hemmnisse

Studie	Branche	Identifizierte Hemmnisse
<b>Langrock et al. 2015 [13]</b>	Grundstoffindustrie (allgemein)	Unkenntnis von Rückwirkungen einer Lasterhöhungen bzw. Lastreduktionen auf die Qualität der Produkte; Organisatorischer Aufwand im Vergleich zu Erlösmöglichkeiten zu hoch (Bspw. Verhandlung eines Service-Level-Agreements zur Abwicklung von Lasterhöhungen und Lastreduktionen zwischen der Abteilung Energiemanagement und der Produktionsabteilung); Verfügbarkeit von Personal sowie Arbeitszeitregelungen; Design der Regelleistungsmärkte (u.a. Voraussetzen der Fernsteuerbarkeit durch Dritte, zu lange Ausschreibungszeiträume und Vorhaltungsdauern); Durch Lasterhöhung höhere abrechnungsrelevante Bezugsspitze nach §19 NEV; Durch Lastreduktion Nicht-Erreichen der für eine Netzentgeltreduktion nach § 19 StromNEV nötigen Vollaststunden.
	Elektrostahl (EAF)	Kontinuierliche Beschickung der nachgeschalteten Stranggussanlage.
	Zement	Größe der Zementsilos; Kopplung der Rohmühlen mit Betrieb des Drehrohrofens über Abwärmenutzung zur Trocknung des Rohmaterials beim Mahlvorgang; Qualitätsschwankungen bei An-/Abfahren der Zementmühlen.
	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Größe des Chlorspeichers; Aktivierungsgeschwindigkeit der Lastveränderung hat Auswirkungen auf die Qualität des Chlors und insbesondere der Natronlauge; Hohe Auslastung der Anlagen und dadurch limitierte Möglichkeiten Produktion im Zuge einer Lastverschiebung nachzuholen.
	Behälterglas	Größe des Scherbenlagers; Zukauf von Zwischen- oder Endprodukt in gewünschter Qualität nicht möglich.
<b>Holtrup 2015[32]</b>	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Gleichzeitige Produktion verschiedener Produkte (Chlor, Wasserstoff, Natronlauge); Hohe Auslastung der Anlagen und dadurch limitierte Möglichkeiten Produktion im Zuge einer Lastverschiebung nachzuholen; Auswirkungen einer volatilen Fahrweise auf die Anlagenlebensdauer; Auswirkungen einer volatilen Fahrweise auf die Produktqualität der Natronlauge; Durch Lasterhöhung höhere abrechnungsrelevante Bezugsspitze nach §19 NEV; Strenge Auflagen für den Zubau von Chlorspeichern.
<b>Kollmann et al. 2015* [33]</b>	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Planmäßig hohe Auslastung – Minderproduktion führt zu Verletzung von Lieferverpflichtungen.
	Zement	Mahlkapazität und Speichervolumina; Füllstände der Silos; Verschiebung der Arbeitszeit zum Wochenende und damit verbundene höhere Personalkosten (Zuschläge); Abstimmung der Kapazitäten der Rohmühlen auf Drehrohrofen; Mehrstündiger Betrieb der Zementmühlen erforderlich für Produktqualität; Schwankungen in der Nachfrage und zeitweise hohe Auslastung; Insbesondere bei kleinen Betrieben kleine Lager und „just in time“-Produktion.

\* Bezieht sich auf Österreich

Die durchgeführten Interviews gaben Einblicke in unternehmensspezifische Prozesse und daraus resultierende Hemmnisse und Möglichkeiten. Im Zuge der Gespräche wurde jedoch immer wieder deutlich, dass diese nicht in jedem Fall auf die gesamte Branche verallgemeinert werden können – es mag andere Unternehmen geben, für die sich die spezielle Situation anders darstellt und für die andere Hemmnisse bestehen und sich andere Potenziale zeigen. Der Einbezug der Verbandsvertreter als aktive Projektpartner, welche die Interviews begleiteten, ermöglichte eine qualifizierte Einordnung der Verallgemeinerbarkeit der Interviewergebnisse.

### 1.2.3 ABLEITUNG DES ANALYSERAHMENS

Aus der oben aufgeführten Literatur sowie ersten Gesprächen mit Verbandsvertretern ließen sich zunächst einige grundlegende Vorbedingungen für die Bereitstellung von Flexibilität durch die Grundstoffindustrie ableiten (siehe auch Diskussion zur Definition der Potenziale in Kapitel 1.1.1.3):

- Die technische Anlage darf keinen Schaden nehmen.
- Die Kundenzufriedenheit muss gewährleistet bleiben. Entsprechend darf die Produktqualität nicht leiden, und Lieferfristen müssen eingehalten werden.
- Die Produktionsmenge wird (nur) durch die Nachfrage bestimmt. Demzufolge kommt als einzige Form der Laständerung eine Lastverschiebung in Betracht.<sup>4</sup>
- Die (regelmäßige) Durchführung von Flexibilitätsmaßnahmen muss in (angepasste) innerbetriebliche Abläufe integriert werden können.
- Bestehende regulatorische Rahmenbedingungen müssen berücksichtigt werden.
- Es muss für das Unternehmen wirtschaftlich sein.

<sup>4</sup> Eine Ausnahme existiert für den Fall der Möglichkeit eines Zukaufs oder Verkaufs von (Zwischen-) Produkten zur Kompensation eigener Lastreduktion oder -steigerung.

Aus diesen Vorbedingungen ergab sich über mehrere iterative Schritte eine Differenzierung möglicher Hemmnisse auf drei verschiedenen zeitlich-organisatorischen Ebenen und deren regulatorischen Rahmenbedingungen, die nachfolgend näher erläutert werden (vgl. Abbildung 1.6).



Abbildung 1.6: Zeitlich-organisatorische Hemmnis-Ebenen

## 1. MARKTUMFELD UND KUNDENBEZIEHUNGEN

Ob Lieferfristen eingehalten und damit die Kundenbeziehungen gepflegt werden können, hängt neben betriebsinternen Auswirkungen einer Flexibilisierung (s.u.) von den existierenden „Spielräumen“ des Unternehmens am Markt ab. Diese Spielräume werden von einer Vielzahl von Faktoren bestimmt: die Konjunktur bestimmt die Auslastung der technischen Anlage und damit (verbleibende) zeitliche Spielräume und Kapazitäten für eine Lastverschiebung. Die Produktvielfalt bzw. die Herstellung von spezifisch auf die jeweiligen Kundenwünsche zugeschnittenen Produkten beeinflusst die Möglichkeiten für Vorproduktion und Lagerung. Die Ausgestaltung von Lieferverträgen und die darin vereinbarten Lieferfristen definieren den Planungshorizont und zeitlichen Spielraum bei der Abarbeitung von Aufträgen. Die Möglichkeit, ein (Zwischen-)Produkt zuzukaufen, bestimmt, ob eigener Lastverzicht durch Zukauf bzw. Lasterhöhung durch Verkauf kompensiert werden könnte.

## 2. INNERBETRIEBLICHE ORGANISATION

Der zeitliche Versatz von Produktion im Zuge einer Lastverschiebung erfordert eine Anpassung innerbetrieblicher Abläufe, da ggf. Arbeitskräfte zu anderen Zeiten benötigt werden und Arbeitsabläufe zwischen vor-/nachgelagerten Produktionsschritten (um-)organisiert werden müssen. Um Flexibilität im Alltagsbetrieb regelmäßig anbieten zu können, darf der Ablauf zur Durchführung einer Flexibilitätsmaßnahme nicht durch Einzelfallbetrachtungen und Einzelentscheidungen organisiert werden. Stattdessen müssen innerbetriebliche Ablaufprotokolle und Entscheidungsbefugnisse definiert oder geändert und getestet werden. Dies betrifft die Auftragsplanung, die Schichtplanung sowie geplante Reparaturen. Um regelmäßig Flexibilitätsmaßnahmen zu ermöglichen, können Zukäufe sowie – bei hybride zu betreibenden Prozessen – die Verwendung alternativer Energieträger, wie z.B. Brenngas, mitgedacht und geplant werden. Allerdings liegt der Fokus im Rahmen des vorliegenden Projektberichts auf dem Bezug und der Verwendung von Strom; eine weitergehende Analyse zum Einsatz alternativer Energieträger erfolgt an dieser Stelle nicht. Die Auswirkungen eines flexibilisierten Betriebs auf Personalfragen (Schichtführungen, Betriebsvereinbarungen etc.) wird in einem angrenzenden Arbeitspaket innerhalb des Cluster V bearbeitet und daher an dieser Stelle nicht vertieft analysiert, aufgrund der Relevanz für das praktische Potenzial jedoch mit berücksichtigt.

## 3. TECHNISCHE ANLAGE

Die technischen Eigenschaften der relevanten Prozesse selbst können das Flexibilitätspotenzial reduzieren. So führt beispielsweise ein (längerer) Stillstand des Schmelzofens in der Behälterglasherstellung zu Schäden an der Anlage. Zudem kann eine flexible Fahrweise die Produktqualität beeinträchtigen. Auch beim Betrieb eines Elektrolichtbogenofens kann es durch zu langes Vorhalten der Schmelze zu Verunreinigung des geschmolzenen Stahls durch sich ablösendes feuerfestes Material kommen. Die anlagenrelevanten Restriktionen der relevanten Prozesse wurden nach Abschnitt 1.2.2, mittels der vier aufeinanderfolgenden Schritte ermittelt. Entsprechend wurde zu jedem betrachteten Prozess ein spezifischer Fragenkatalog erstellt und mit den Verbänden und Unternehmensexperten Punkt für Punkt abgearbeitet.

Dies ermöglichte eine detaillierte technische Hemmnisbeschreibung, in welcher die zentralen technischen Einschränkungen identifiziert und

beschrieben werden konnten. Zu diesen zählen in erster Linie chemische Umwandlungsprozesse (die Einstellung des Sulfatträgers in der Zementindustrie), sowie physikalische Eigenschaften und Prozessbedingungen (wie die Temperatur, der Aufbau stabiler Strömungsprofile oder das Erreichen der erforderlichen Verweilzeiten sowie des Energieeintrags), die in den relevanten Prozessen exakt vorliegen beziehungsweise eingehalten werden müssen, um die Produktionsqualität aufrecht zu erhalten.

Da es sich bei drei der fünf betrachteten Prozesse um Hochtemperaturanwendungen handelt, ist der Spielraum für eine Variation des Wärmeeintrages auf Grund der hohen thermischen Materialbelastungen, des einzuhaltenden Aggregatzustandes, oder auf Grund ungewollter chemischer Reaktionen stark beschränkt. In diesen Fällen wurden die chemischen, physikalischen und materialtechnischen Restriktionen beschrieben, welche bei Missachtung zur Reduktion der Lebensdauer oder Zerstörung des Aggregates führen.

Neben den technischen Eigenschaften der relevanten Prozesse selbst, ist außerdem die Einbettung in die Produktionskette zu berücksichtigen. Eine Flexibilisierung relevanter Prozesse kann durch Auswirkungen auf vor-/nachgelagerte Prozessschritte indirekt die Produktqualität beeinträchtigen, Verzögerungen im Betriebsablauf bedingen, eine mögliche Gefährdung anderer Anlagenteile, oder Betrachtungen der Wirtschaftlichkeit erfordern. Mögliche Faktoren, die die Wirtschaftlichkeit beeinflussen, sind beispielsweise die erforderlichen Kosten für zusätzliche Speicher oder erhöhte Energieverbräuche aufgrund von sinkenden (Teillast-) Wirkungsgraden oder aufgrund steigender Wärmeverluste. Des Weiteren sind mögliche Auswirkungen auf vernetzte bzw. gekoppelte Produktionsprozesse zu beachten. Dies umfasst mögliche Auswirkungen auf das Stoffstrom- und Wärmemanagement der teilweise hochintegrierten Produktionsprozesse.

#### 4. REGULATORISCHE RAHMENBEDINGUNGEN

Auf allen zeitlich-organisatorischen Ebenen sind spezifische regulatorische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Die spezifischen Regularien für Flexibilitätsangebote (z.B. Produkte am Strommarkt, Präqualifizierungsbedingungen für Regelenergie) sind in stetigem Wandel. Der Fokus der Analysen in Cluster V.6 liegt zudem auf den Potenzialen für die in Kapitel 1.4 definierten Anforderungsprofile. In diesen Anforderungsprofilen wird von den (aktuellen) regulatorischen Rahmenbedingungen für Flexibilität abstrahiert, um auch eine mittel- bis längerfristige Betrachtung zu ermöglichen. Daher werden die flexibilitätsspezifischen aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen auch in der Hemmnisanalyse zunächst nicht als Hemmnisse für die Erfüllung der Anforderungsprofile betrachtet.<sup>5</sup> Andere regulatorische Rahmenbedingungen (z.B. Effizienzrichtlinien, Arbeitszeitgesetze, Tarifverträge, Auflagen für Speicher usw.) spielen jedoch für das praktische Potenzial zum Teil eine erhebliche Rolle und werden daher auf allen betrachteten Ebenen berücksichtigt.

<sup>5</sup> Sie werden jedoch im Rahmen der Diskussion der Diskrepanz zwischen identifizierten praktischen Potenzialen und momentanem Stand der Umsetzung thematisiert (s. Kapitel 8.3)

Die Wirtschaftlichkeit unterliegt vielfältigen Einflussfaktoren, und kann insbesondere durch Änderungen der flexibilitätsspezifischen regulatorischen Rahmenbedingungen stark beeinflusst werden. Die Wirtschaftlichkeit wird daher in der Hemmnisanalyse nicht näher betrachtet. Eine wirtschaftliche Analyse wird stattdessen gesondert durchgeführt (vgl. Kapitel 1.3, Kapitel 7.4 und Kapitel 7.5).

## 1.3 METHODIK ZUR WIRTSCHAFTLICHEN ANALYSE

Die wirtschaftliche Analyse erörtert begleitend zu und aufbauend auf den Ergebnissen der technischen und praktischen Hemmnisanalyse das ökonomische Potential ausgewählter Prozesse zur Flexibilitätsbereitstellung. Die wesentliche verwendete Methodik in der wirtschaftlichen Analyse ist einerseits die Einbringung ökonomischer Parameter in die Durchführung der Interviews, sowie die Erstellung numerischer Entscheidungsmodelle zur Strombeschaffung und Bereitstellung von Flexibilität und die Nutzung der Modelle zur Analyse von Flexibilitätspotentialen.

### 1.3.1 INTERVIEWS

Es wurden ökonomische Fragestellungen in die Interview-Führung eingebracht, u.a. zu den Themengebieten Kosten (Anteil der Stromkosten, Anteil der fixen und variablen Kosten, Anteil an Arbeitskosten), Strommarktteilnahme (Day-Ahead-Markt, Intraday-Markt, Regelenergiemärkte, Markt für Abschaltbare Lasten), sowie Anreize, die sich durch die Netzentgeltstrukturierung ergeben.

### 1.3.2 METHODIK ZUR MODELLIERUNG VON UNTERNEHMENS- ENTSCHEIDUNGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG REGULATORISCHER, ÖKONOMISCHER, TECHNISCHER UND PRAKTISCHER RAHMENBEDINGUNGEN

Prinzipiell ist das bedeutendste Ziel unternehmerischer Tätigkeit die Gewinnmaximierung, welche sich aus der Differenz von Erlösen und Kosten ergibt. Auf der Erlösseite steht der Verkauf des Hauptproduktes der Firma, auf der Kostenseite fixe Kosten (für Anlagen, Maschinen etc.) und variable Kosten (z.B. Strombeschaffungskosten, Arbeitskosten etc.). Für die Diskussion wird hier Flexibilisierung als Minderung der variablen Strombeschaffungskosten durch flexiblere Nachfrage definiert<sup>6</sup>. Prinzipiell ist eine flexible Strombeschaffung für Prozesse nur dann möglich, wenn die Produktionsanlagen einen Auslastungsgrad von unter 100 % vorweisen (d.h., dass die Anlagen nicht 100 % der Zeit laufen) und wenn ein Speicher für das Produkt zur Verfügung steht. Dies kann einerseits der Fall sein, da 1) ohnehin leichte Überkapazitäten und Speicher vorhanden sind, sei es aus konjunkturellen Gründen, Erwartung auf steigende Nachfrage oder saisonalen Nachfrageunterschieden. Andererseits kann es für Unternehmen aber auch ökonomisch sinnvoll sein 2) in Überkapazitäten und Speicher zu investieren, und so die variablen Kosten zu senken, oder auch 3) die Verkaufsmenge zu reduzieren, um Stunden der Produktion zu vermeiden, in welchen der Deckungsbeitrag negativ ist.

<sup>6</sup> Eine Flexibilisierung der Stromnachfrage kann je nach Interpretation und Anwendungsprofil als eine Minderung der Strombeschaffungskosten oder als zusätzliche Erlösquelle durch Einnahmen auf Flexibilitätsmärkten (oder Wiederverkauf langfristig erworbener Grundlast) kategorisiert werden. Hier interpretieren wir Erlöse aus Flexibilitätsmärkten als Minderung der Gesamtstrombeschaffungskosten.

Allen 3 Formen der Flexibilisierung können technische, praktische und wirtschaftliche Faktoren entgegenstehen (z.B. existierende Lieferbedingungen), welche in den folgenden Kapiteln prozessabhängig erörtert werden.

Da die aktuelle Phase des Projektes auf Flexibilitätspotentiale (nicht Perspektiven mit Investitionen oder Anpassung langfristiger Lieferverpflichtungen) fokussiert war und die Verkaufsmenge und Produktionskapazitäten als gegeben angenommen werden, konzentriert sich die Analyse auf die Entwicklung eines Entscheidungsmodells aus Unternehmenssicht, welches die Minimierung der Strombeschaffungskosten unter Berücksichtigung technischer und praktischer Hemmnisse, sowie unter Einbeziehung regulatorischer Rahmenbedingungen zum Ziel hat.

Dies geschieht unter Einsatz von Optimierungsmodellen (lineare Optimierung, gemischt-ganzzahlige Optimierung), welche durch eine Zielfunktion (hier die Strombeschaffungskosten) und Nebenbedingungen (technische und praktische Hemmnisse, welche in der Lösung berücksichtigt sein müssen) charakterisiert sind. Dieses Modelle werden dann numerisch gelöst (GAMS 24.3.3 / CPLEX). Ähnliche Ansätze (ohne Modellierung verschiedener Elektrizitätsmärkte und regulatorischer Gegebenheiten) wurden in der Literatur bereits zur optimalen Planung verschiedener industrieller Prozesse anhand von Elektrizitätspreisen oder der Produktion von erneuerbaren Energien eingesetzt (z.B. in [39, 40]).

Das methodische Vorgehen zur Modellerstellung ist in Abbildung 1.7 abgebildet, und basiert auf einer Prototyperstellung auf Basis der Interviews, welches durch Industrie und Verbände anhand von Modellbeschreibung und ersten Ergebnissen kritisch geprüft und in dem darauffolgenden Schritt durch den Modellierer angepasst wird.



Abbildung 1.7 Methodisches Vorgehen der wirtschaftlichen Entscheidungsmodellerstellung und Analyse

Das entwickelte Modell wird dann eingesetzt um spezifische Aspekte, welche sich in Interviews und vorhergehenden Analysen als besonders relevant für die Flexibilitätserstellung erwiesen haben zu analysieren. Dazu gehören u.a.:

- Der Einfluss von Auslastungsgrad auf Flexibilitätserstellung und Strombeschaffungskosten
- Die Häufigkeit und Dauer von Flexibilitätserstellungen
- Der Trade-off zwischen der Teilnahme an Strommarktreserven oder am Energiehandel und der Einfluss von Netzengeltstrukturen auf die Flexibilitätserstellung
- Quantifizierung von technischen und praktischen Hemmnissen auf Flexibilitätserstellung, wie begrenzte Voraussicht und Schichtbegrenzungen

## 1.4 CHARAKTERISTISCHE ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE SITUATIONEN FÜR DIE BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Das Potenzial zur Bereitstellung von Flexibilität kann für Unternehmen je nach Vorankündigungszeit und Abrufdauer variieren. In ähnlicher Weise hat auch das Energiesystem unterschiedliche Nachfragetypen an Flexibilitätsdienstleistungen. Dazu werden drei typische Situationen charakterisiert, welche sich primär hinsichtlich Vorankündigungszeit und Abrufdauer unterscheiden. Darauf aufbauend wird untersucht welchen Beitrag die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie jeweils leisten können.

### 1. KURZFRISTIGE ANPASSUNG DER LAST

Im aktuellen Strommarktdesign kaufen die Netzbetreiber Systemdienstleistungen von Erzeugung und Nachfrage, um damit kurzfristige Schwankungen auszugleichen. Dabei wird zunächst ein fester Betrag (Leistungspreis) für die Bereitstellung (entsprechend dem Auktionsergebnis) gezahlt. Bei einem tatsächlichen Abruf der Flexibilität wird eine weitere Zahlung (Arbeitspreis) getätigt.

Für Anbieter von Flexibilität bedeutet das, dass sie

- (I) langfristig die Fähigkeiten für die Bereitstellung von Flexibilität entwickeln und präqualifizieren müssen. Bei einer Weiterentwicklung des Strommarktes sind dabei keine Einschränkungen durch Produktdesign zu erwarten (min MW, Rampe).
- (II) am Vortag entscheiden, ob diese Fähigkeit angeboten wird (Anpassungen unter Preisrisiken im Intraday-Bereich möglich) um
- (III) auf kurzfristige Signale des Netzbetreibers reagieren und innerhalb von Minuten bei Abruf der Flexibilität die Nachfrage für einen Zeitraum von 15 Minuten entsprechend anpassen.

### 2. ANPASSUNG DER LAST ÜBER MEHRERE STUNDEN

Vor der umfassenden Nutzung von PV standen hohe Preise im Tagesverlauf deutlich geringeren Preisen zur Nacht gegenüber und entsprechend wurden zum Beispiel elektrisch betriebene Wärmespeicher nachts aufgeheizt. Mit der Verbreitung von PV wird sich dieses Preisprofil häufig invertieren und zu deutlich geringeren Preisen während der Tages- und höheren Preisen während der Nachtstunden führen. Ein weiterer entscheidender Faktor für das Preisprofil ist die Windproduktion. Da sowohl Wind- als auch Solarproduktion am Vortag großräumig prognostiziert werden können, könnten die Reduktion von Nachfrage spätestens am Vortag, gegebenenfalls jedoch auch längerfristig, eingeplant werden. Hiermit könnten entweder Erzeugungsspitzen (deswegen drei Stunden als Ausgangspunkt) oder ein dunkler Tag/windstille Nacht/eine Produktionsschicht abgedeckt werden (entweder über mehrere Akteure sequentiell, oder einen Akteur der bis zu 12 Stunden abdecken kann).

### 3. REDUKTION DER LAST ÜBER MEHRERE TAGE

Der Energiebedarf in nördlichen Ländern ist heizungsbedingt im Winter am größten. Während die Solareinstrahlung im Winter fällt, steigt im Durchschnitt die Windproduktion. Eine Wetterlage, mit mehreren aufeinanderfolgenden windstillen und bewölkten Wintertagen könnte ein wichtiges Szenario für die Auslegung des Energiesystems darstellen. Diese Wetterlagen könnten entweder durch die sequentielle Reduktion mehrerer Flexibilitätsanbieter, die für jeweils einen Tag reduzieren, oder durch einzelne Akteure, die ihre Last für bis zu fünf Tagen reduzieren, abgedeckt werden. Da die Wetterlage sich nicht erst kurzfristig realisiert, wäre davon auszugehen, dass mit mindestens zwei bis fünf Tagen Vorlaufzeit über den Strommarkt Signale für die Nutzung der Flexibilitätsoption in den nächsten 1–5 Tagen gegeben werden (höhere Preise, die dann Anreize für die Reduktion der Nachfrage geben). Mit der Änderung der Witterungslage kann dann in den folgenden Wochen die reduzierte Produktion ausgeglichen werden und zum Beispiel die für die Flexibilisierung geschaffenen Zwischenlager wieder aufgefüllt werden.

Wie erwähnt, tritt das Phänomen dieses Anforderungsprofils in den Wintermonaten auf. Ziel ist es dann, den Verbrauch während dieser Tage weitestgehend zu reduzieren, um die ungünstige Witterungslage zu überbrücken. Ist die Last einzelner Verbraucher während dieser Zeit im Rahmen der ursprünglichen Produktionsplanung – beispielsweise aufgrund eines Wartungsintervalls – vergleichsweise niedrig, so ist keine Anpassung des Verbrauchs notwendig. Entscheidend ist bei diesem Anforderungsprofil der lange Zeithorizont im Gegensatz zur vergleichsweise kurzfristigen Bereitstellung von Flexibilität in den Anforderungsprofilen 1 und 2.

### RELEVANZ DER ANFORDERUNGSPROFILE IN DEN STÜTZJAHREN DER ÜBERGEORDNETEN SYNERGIE-ANALYSE

Abbildung 1.8 zeigt die Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren 2020, 2030 und 2040.

Abbildung 1.8: Relevanz der Anforderungsprofile in den Stützjahren der übergeordneten SynErgie-Analyse

	2020	2030	2040
<b>1</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kurzzeitige Anpassung</li> <li>▪ Geringe Vorankündigungszeit</li> </ul>	✓	✓	✓
<b>2</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verschiebung über 3 – 12 Std.</li> <li>▪ 1 Tag Vorankündigungszeit</li> </ul>	(✓)	✓	✓
<b>3</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lastreduktion über 1 – 5 Tage</li> <li>▪ 2 – 5 Tage Vorankündigungszeit</li> </ul>	✗	(✓)	✓

Flexibilitätspotenzial  
Flexibilitätsperspektive

Anforderungsprofil 1 entspricht den Charakteristika der Minutenreserve (neben anderen kurzfristigen Märkten und Reserven) und in ähnlicher Form der Teilnahme am Intraday-Handel und ist daher bereits heute relevant. Auch Primär- und Sekundärregelleistung lassen sich dem Anforderungsprofil 1 zuordnen, wobei sich diese durch deutlich kürzere Vorankündigungszeiten von respektive 30 Sekunden und 5 Minuten auszeichnen. Zukünftig wird die Notwendigkeit für kurzfristige Lasterhöhungen und -reduktionen weiter steigen. Als Beispiel stellt Abbildung 1.9 den Abrufgrad positiver und negativer Minutenreserveleistung (MRL) dar. Der Abrufgrad ist dabei definiert als der Quotient aus der mittleren abgerufenen Leistung und der mittleren bezuschlagten Leistung, ist also hier unabhängig von den Arbeitspreisen einzelner Angebote [17].

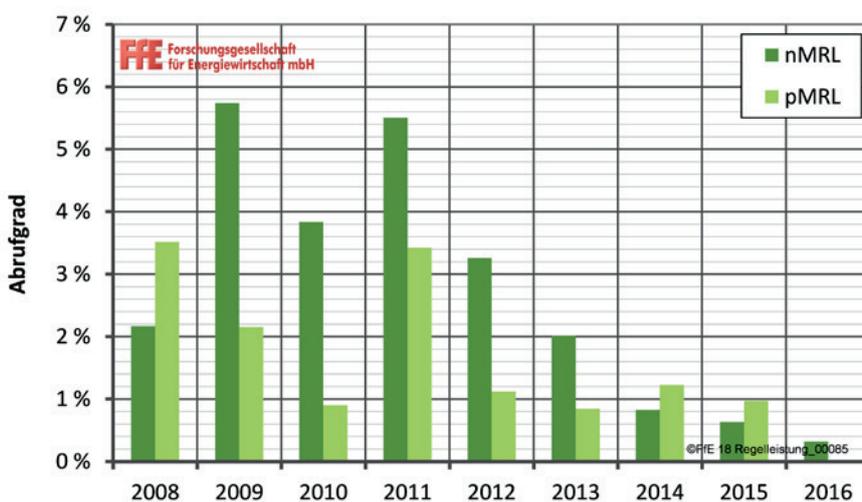


Abbildung 1.9: Mittlerer jährlicher Abrufgrad Minutenreserveleistung (eigene Darstellung, Daten von [34])

Bei Betrachtung der jährlichen Mittelwerte der Abrufgrade verzeichnen insbesondere die Werte der negativen MRL seit 2011 einen starken Rückgang. Die Abrufgrade positiver MRL zeigen keinen eindeutigen Trend.

Auch Situationen, die dem Anforderungsprofil 2 entsprechen, treten bereits heute auf. Beispielsweise kam es am 08.05.2016 aufgrund der hohen EE-Einspeisung zu negativen Strompreisen während der Mittagsstunden (siehe Abbildung 1.16). Durch Verschieben der Produktion in diese Stunden könnten die Strombezugskosten bei einem entsprechenden Stromliefervertrag reduziert werden. Auch sehr hohe Strompreise traten in der Vergangenheit durchaus auf. Abbildung 1.10 stellt als Referenz die Anzahl von Stunden mit Preisen größer als einem gegebenen Day-Ahead Preis in verschiedenen vergangenen Jahren dar. Wie ersichtlich wird unterscheidet sich der Wert von Flexibilität am vortätigen Handel im Verlaufe der Jahre extrem. Im Jahr 2006 trat zum Beispiel ein Spitzenpreis von 2.437 Euro/MWh auf, und im Jahr 2007 traten 52 Stunden im Jahr Preise von höher als 188 Euro/MWh auf. Die aktuelle Differenz zwischen Grund- und Spitzenlastpreisen ist dagegen historisch niedrig. Derartige Situation sind und waren alles in allem eher selten, werden jedoch mit zukünftig steigendem Anteil volatiler Einspeisung an Bedeutung gewinnen.

Anforderungsprofil 3, auch als „Dunkelflaute“ bekannt, da in Zukunft durch gleichzeitig geringe Wind- und Solareinspeisung definiert, spielt zum jetzigen Zeitpunkt eine untergeordnete Rolle. Es treten zwar bereits

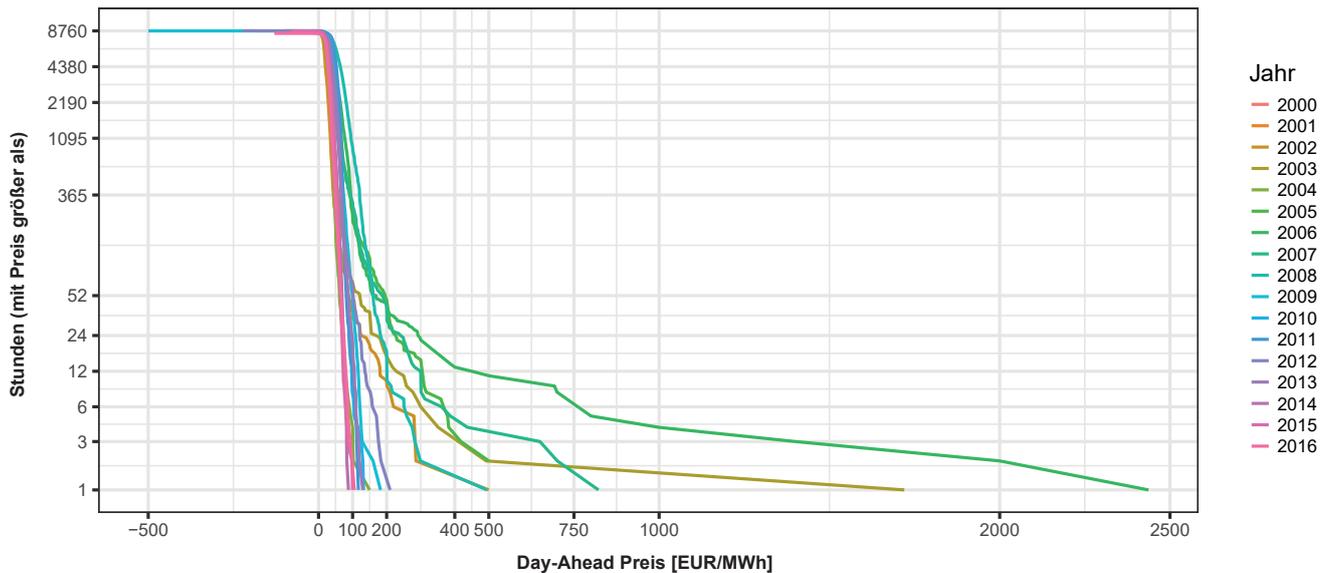


Abbildung 1.10: Häufigkeit von Stunden in denen der Day-Ahead Preis größer ist als auf der X-Achse angegebene Wert

Zeiten mit hohen Strompreisen (siehe Abbildung 1.18) auf, allerdings ist die geringe EE-Einspeisung nicht die einzige Ursache hierfür. Beispielsweise kam es im Januar 2017 zusätzlich zu Kraftwerksausfällen in Frankreich.

Zukünftig wird dieses Anforderungsprofil jedoch von größerer Relevanz sein, denn das Energiekonzept der Bundesregierung sieht vor, die Stromversorgung bis 2050 überwiegend auf erneuerbare Energieträger umzustellen. Dies bedeutet, dass das zukünftige Energiesystem eine zunehmende Menge fluktuierender Erzeugung integrieren muss. Es existiert eine Vielzahl an Szenarien für die mögliche Ausgestaltung eines solchen, nachhaltigen Energiesystems. Kontrovers diskutiert wird insbesondere auch wie die Bereitstellung von Flexibilität, die zum Ausgleich der fluktuierenden Leistungsbereitstellung durch Wind und PV und der schwankenden Nachfrage gebraucht wird, erfolgen soll. Neben flexibel einsetzbaren Erzeugungsanlagen (z.B. Gaskraftwerke) werden Speicher sowie das Lastmanagement und auch der Netzausbau eine Rolle spielen. Die jeweils längsten Zeiträume von Schwachwindphasen bei gleichzeitiger Bewölkung oder Dunkelheit sind mitentscheidend für die Struktur des zukünftigen Energiesystems.

Ein erster Anhaltspunkt für das Maß an Flexibilität, welches in einem zukünftigen Energiesystem mit hohen Anteilen fluktuierender Erzeuger gebraucht wird, ist der Verlauf der Residuallast. Bei der Residuallast handelt es sich um die Differenz zwischen nachgefragter Leistung und der Einspeisung aus fluktuierenden Erzeugern. Eine positive Residuallast spiegelt entsprechend den, vor Einsatz der Flexibilitäten, verbleibenden Strombedarf dar. Illustrativ sind im Folgenden für drei, jeweils ein zukünftiges Energiesystem beschreibende Szenarien<sup>7</sup> die Verläufe der positiven Residuallast ausgewertet worden. Diese basieren auf einem identischen Wetterjahr und einer identischen angenommenen räumlichen Verteilung der Erzeugung aus fluktuierenden Erneuerbaren. Vor dem Hintergrund der Frage, inwieweit zur Bewältigung von Dunkelflauten Lastreduktionen mehrerer Tage in zukünftigen Energiesystemen relevant werden können, sind nur Zeiträume von mehr als 24 h berücksichtigt worden. Abbildung 1.11 zeigt das Vorkommen von Zeiträumen positiver Residuallast verschiedener Länge Dauern. Es wird deutlich, dass in allen drei Szenarien jeweils insgesamt zwischen 30 und 40 solcher

<sup>7</sup> Szenarien mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung mit unterschiedlichen Anteilen an PV und Wind on- und offshore. Es handelt sich um die Szenarien „Regionenverbund“ aus [35] „Szenario 2.1.a“ aus [36] und das „Referenzszenario“ aus [37]. Als Teil eines umfangreichen Vergleichs wurden die hier genutzten Residuallasten in (acatech/Leopoldina/Akademienunion (Hrsg.) 2015 [22]) aufbereitet. Weitere Informationen zum Vorgehen der Residuallastberechnung finden sich in zuletzt genannter Studie ab Seite 21.

Ereignisse pro Jahr gezählt werden können. Die jeweils längsten Zeiträume positiver Residuallast erstrecken sich in den betrachteten Szenarien je über 11 bis 15 Tage. Länger als einwöchig andauernde Zustände positiver Residuallast treten insgesamt je 2–3 Mal pro Jahr auf, 5–7 tägige Ereignisse jeweils 1 bis 4 mal und 3–4 tägige jeweils zwischen 13 und 14 mal.

Zum Ausgleich der Residuallast stehen zukünftig (je nach Dauer, Amplitude und Rampen der Schwankungen) verschiedene Flexibilisierungsoptionen zur Verfügung. Die vorangegangene Analyse kann keinen Aufschluss darüber geben, welche der vielfältigen Flexibilitätskonzepte zukünftig zu welchem Anteil zum Ausgleich der (mehrtägigen) Schwankungen genutzt werden. Sie zeigt jedoch den Bedarf an Flexibilität bei hoher Abhängigkeit der Erzeugung von den Energieträgern Wind und Sonne auf. Des Weiteren wird deutlich, dass dieser Bedarf bei den verschiedenen Ausbauszenarien in derselben Größenordnung liegt. Dies ist ein Indiz dafür, dass die exakten Anteile von Photovoltaik- und Windanlagen an der Erzeugungsstruktur für die Relevanz von Dunkelflauten nicht ausschlaggebend ist.

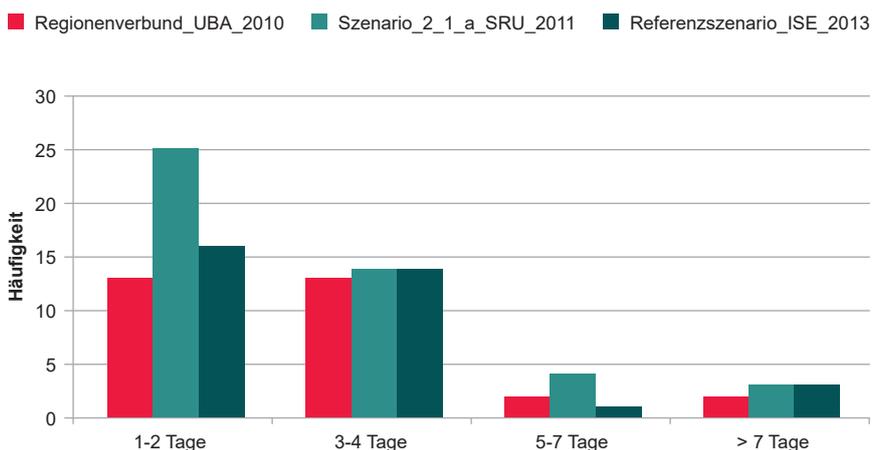


Abbildung 1.11: Ereignisse zusammenhängender Stunden positiver Residuallast für drei illustrative Szenarien mit sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien

Die Modellrechnungen, die den mithilfe von Szenarien dargestellten möglichen Zukünften zugrunde liegen, sind unter anderem stark von den verwendeten Wetterdaten und der angenommenen räumlichen Verteilung der Erzeuger abhängig. Aus diesem Grund sind im Folgenden ergänzend zur obigen Analyse verschiedener Ausbauszenarien die variierenden Einspeiseleistungen aus Wind- und PV für einen denkbaren Ausbaustand in 2050 für verschiedene Wetterjahre betrachtet und einer „Dunkelflautenanalyse“ unterzogen worden. Für die hier detektierten Dunkelflauten ist als Definition die Unterschreitung der mittleren Leistung der Einspeisung aus Wind und Sonne während einer Flaute unter den Schwellwert von a) 20 %, b) 30 % und c) 40 %<sup>8</sup> der mittleren 10-Jahresleistung der Einspeisung aus Wind und Sonne zugrunde gelegt. Auf diese Weise können Monate als auch Jahre untereinander verglichen werden. Genutzt werden Wetterdaten aus 10 Jahren (2003–2012) und eine entsprechend Szenario B der Studie „Tangible ways towards climate protection in the European Union“ [38]<sup>9</sup> verteilte installierte Kapazität an PV- und Winderzeugungskapazitäten für das Jahr 2050. Bei den detektierten Flauten werden (wie auch in Abbildung 1.11) Zeiträumen von 1–2 Tagen, 3–4 Tagen, 5–7 Tagen und mehr als 7 Tagen unterschieden.

<sup>8</sup> Die Auswahl der Schwellwerte erfolgt unter der Annahme, dass die Einspeisung in einem System stattfindet, das zu sehr hohen Anteilen auf fluktuierenden Erzeugern beruht. Entsprechend können mehrtägige Einspeiseleistungen, die im Mittel unter 20 %, 30 % bzw. 40 % der mittleren 10-Jahresleistung liegen, relevant für die Systemgestaltung sein.

<sup>9</sup> Demnach ist die installierte Leistung der fluktuierenden Erneuerbaren Erzeuger in 2050 wie folgt: Wind onshore: 54,4GW, Wind offshore: 50,2GW, PV: 69GW. Im ersten Fortschrittsbericht des Forschungsvorhabens wird die räumliche Verteilung wie folgt beschrieben: „In Abhängigkeit von den mittleren meteorologischen Ressourcen (Strahlung auf geneigte Fläche bzw. Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe) modelliert und lehnt sich dabei an den Ausbaustand in Deutschland Ende 2012 an.“ ([http://forschung-energiespeicher.info/fileadmin/user\\_upload/projektassets/RESTORE\\_2050/Fortschrittsbericht.pdf](http://forschung-energiespeicher.info/fileadmin/user_upload/projektassets/RESTORE_2050/Fortschrittsbericht.pdf))

In dem gesetzten Rahmen zeigt sich (vgl. Abbildung 1.12), dass die Dunkelflautenhäufigkeit erwartungsgemäß einer starken Saisonalität unterliegt. In den Herbst und Wintermonaten treten diese deutlich häufiger und außerdem mit deutlich längeren Dauern auf, insbesondere im November, Dezember und Januar. Im Vergleich der Abbildungen 1.12a, 1.12b und 1.12c zeigt sich zudem, dass die Bestimmung der Häufigkeit von Dunkelflauten zunächst einer Festlegung bedarf, welches Maß an Mindereinspeisung aus fluktuierenden Erneuerbaren zugrunde gelegt wird. Schwächere Dunkelflauten (40 %-Kriterium, Abbildung 1.12c) treten sehr viel häufiger auf als stärkere (20 %-Kriterium, Abbildung 1.12a). Je nach Position einer Flexibilitätsoption in der Merit-Order der Flexibilitätsoptionen wird die zu erwartende Häufigkeit von Dunkelflauten demnach unterschiedlich zu bewerten sein. Während für die Bewältigung der schwächeren Dunkelflauten ggf. zunächst (nur) auf vergleichsweise günstige Flexibilitätsoptionen zurückgegriffen wird, werden für die Bewältigung stärkerer Dunkelflauten ggf. auch teurere Optionen herangezogen werden müssen.

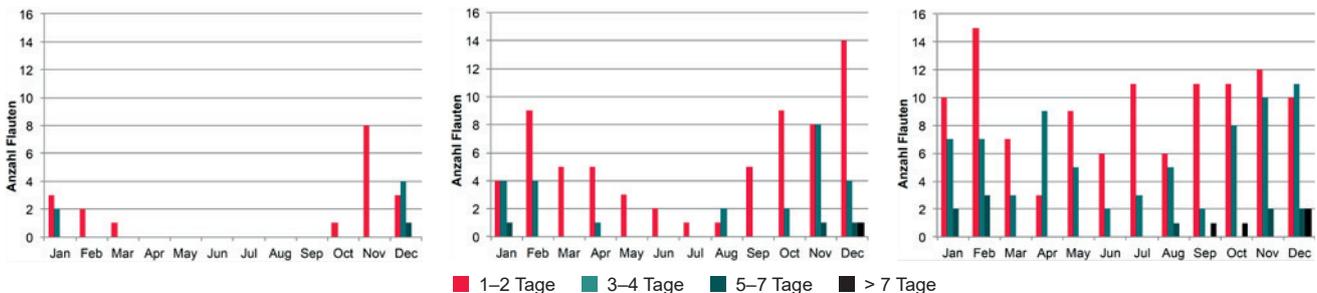


Abbildung 1.12: Anzahl monatlicher Flauten unterschiedlicher Länge aggregiert über 10 Jahre (2003 bis 2012), definiert entsprechend der Unterschreitung der mittleren Leistung der Einspeisung aus Wind und Sonne während einer Dunkelflaute von a) 20 % (links), b) 30 % (Mitte) und c) 40 % (rechts) unter die mittlere 10-Jahresleistung

## WERT DER FLEXIBILITÄT

Der Wert von Flexibilität entsprechend dieser Anforderungsprofile hängt von vielen Faktoren ab, insbesondere (I) dem Anteil von Wind und Solarenergie im Gesamtsystem, (II) dem Grad der Umsetzung der Sektorkopplung einschließlich verstärkter Nutzung von Strom als Energieträger und (III) den alternativen Flexibilitätsoptionen einschließlich dem Netzausbau im System. Deswegen kann aus den heutigen Marktpreisen nur in sehr beschränktem Maße auf den Wert von Flexibilität entsprechend der Anforderungsprofile für die späteren 2020 Jahre geschlossen werden. Wir untersuchen stattdessen aus der Perspektive der einzelnen Flexibilitätsoptionen welche finanziellen Anreize notwendig wären, um die wirtschaftliche Realisierung zu ermöglichen.

## PRODUKTDESIGN

Für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen (kurzfristige Nachfrageanpassungen) existieren Produktspezifikationen die sowohl durch die Anforderungen des Systems als auch der traditionellen Bereitsteller der Systemdienstleistungen (konventionelle Kraftwerke) geprägt sind. Diese Spezifikationen ändern sich aktuell im Kontext der fortschreitenden Integration und damit auch Weiterentwicklung der europäischen Strommärkte und werden sich auch mit neuen Technologien weiterentwickeln. Für die längerfristige Flexibilität ist davon auszugehen, dass im Strommarkt abgesicherte Stromeinkäufe (Terminmarkt) vorgenommen werden und Unternehmen dann den bereits „gekauften“ Strom an das System zurück verkaufen und damit den Wert der Flexibilität vergütet bekommen. Gegebenenfalls können sich auch noch längerfristige

Produkte entwickeln. Eventuell könnten auch noch zusätzliche Anreizsysteme für die Bereitstellung von Flexibilität vorgesehen werden.

### STECKBRIEFE UND BEISPIELHAFTE AUSWERTUNGEN ZU DEN DREI ANFORDERUNGSPROFILIEN

Um die Befragung der Unternehmen zu erleichtern, wird für jedes der drei Anforderungsprofile je ein Steckbrief erstellt. Dieser beinhaltet Informationen zum energiewirtschaftlichen Hintergrund sowie zur heutigen und zukünftigen Bedeutung des Profils. Ferner werden die Vorankündigungszeit und Abrufdauer genannt. Zur Veranschaulichung enthalten die Steckbriefe weitere Ausführungen zu einem möglichen Business Case durch das Angebot von Flexibilität unter den Rahmenbedingungen des entsprechenden Anforderungsprofils sowie ein anschauliches Beispiel auf Basis konkreter Daten. Zusätzlich wird je Anforderungsprofil eine beispielhafte Auswertung erstellt, welche die Relevanz des Profils untermauert. Die Steckbriefe und Auswertungen sind im Folgenden abgebildet.

Abbildung 1.13: Steckbrief zu Profil 1: „Kurzfristige Anpassung der Last“

Rahmenbedingungen	<p><b>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausgleich kurzfristiger Schwankungen von Erzeugung und Nachfrage durch den Kauf von Systemdienstleistungen durch den Netzbetreiber</li> <li>- Auszahlung eines festen Betrages für die Leistungsbereitstellung entsprechend Auktion (Leistungspreis) und zusätzliche Zahlung bei Abruf der Leistung (Arbeitspreis)</li> </ul>	<p><b>Bedeutung heute</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Es existieren vier Produkte: Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve sowie die „Verordnung zu abschaltbaren Lasten“ (AbLaV)</li> </ul> <p><b>Bedeutung in Zukunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Zunehmende Unsicherheit über die Stromerzeugung wird voraussichtlich die Bedeutung von Systemdienstleistungen erhöhen</li> </ul>	
Technische Daten	<p><b>Vorankündigungszeit</b></p> <p>Maximale Dauer zwischen Abruf durch den Netzbetreiber und Erbringung durch Flexibilitätisanbieter</p> <p>Bei einigen Produkten existieren auch kürzere Vorankündigungszeiten von weniger als 30 Sekunden</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; font-size: 1.2em; margin-top: 10px;">15 Minuten</div>		<p><b>Abrufdauer</b></p> <p>Dauer der Anpassung der Nachfrage</p> <p>Über einen Aggregator ist die Teilnahme auch bei kürzeren Erbringungszeiten möglich</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; font-size: 1.2em; margin-top: 10px;">15 Minuten</div>
Business Case	<p><b>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Anbieten von zu- oder abschaltbarer Leistung am Regelleistungsmarkt</li> <li>- Für den Zeitraum, für den die Leistungserbringung garantiert werden kann, wird ein Leistungspreis erwirtschaftet. Im Falle eines Abrufs der Leistung wird zusätzlich der Arbeitspreis realisiert.</li> <li>- Der Anbieter entscheidet selbst über die Höhe von Leistungs- und Arbeitspreis. Die Höhe des Leistungspreises entscheidet, ob ein Zuschlag erteilt wird. Die Höhe des Arbeitspreises entscheidet über die Häufigkeit des Abrufs. Im Falle eines hohen Arbeitspreises ist nur selten mit einem Abruf zu rechnen.</li> </ul>	<p><b>Beispiel</b></p> <p>Für den Folgetag wird positive Minutenreserve für den Zeitraum von 12.00 bis 16.00 Uhr vermarktet. Um 12.30 Uhr bekommen Sie das Signal, Ihre angebotene Leistung zu aktivieren. Von 12.45 bis 13.00 Uhr müssen Sie Ihre Leistung um den angebotenen Wert reduzieren. Sie bekommen für die 4 Stunden einen Leistungspreis vergütet und darüber hinaus für die 15 Minuten Aktivierung einen Arbeitspreis.</p>	

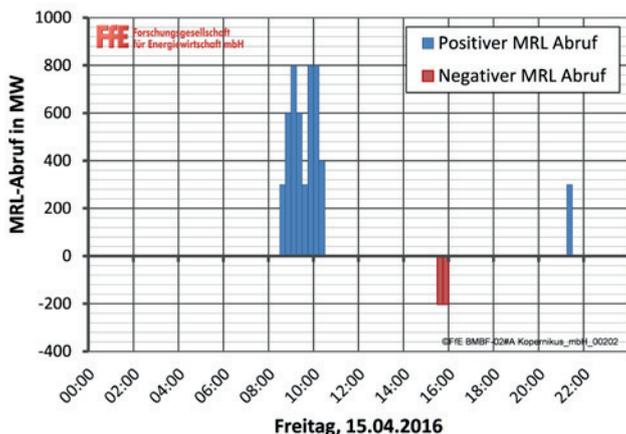


Abbildung 1.14: Auswertung zu Profil 1: Abruf von Minutenreserve am 15.04.2016

Abbildung 1.13 und Abbildung 1.14 zeigen Steckbrief und Auswertung zu Anforderungsprofil 1. Dieses Anforderungsprofil entspricht in etwa der Minutenreserve (neben anderen kurzfristigen Märkten und Reserven) und ist daher auch bereits heute relevant. Abbildung 1.14 zeigt einen exemplarischen Abruf von positiver und negativer Minutenreserve am 15.04.2016.

Steckbrief und Auswertung zu Anforderungsprofil 2 sind in Abbildung 1.15 und in Abbildung 1.16 dargestellt. Auch dieses Profil ist bereits heute relevant, wird jedoch durch die steigenden Anteile volatiler Erneuerbarer künftig weiter an Bedeutung gewinnen. Wie Abbildung 1.16 zu entnehmen, kam es am 08.05.2016 aufgrund hoher Einspeisung aus Erneuerbaren Energien und vergleichsweise geringer Last während der Mittagsstunden zu negativen Strompreisen.

Abbildung 1.15: Steckbrief zu Profil 2:  
„Anpassung der Last über mehrere Stunden“

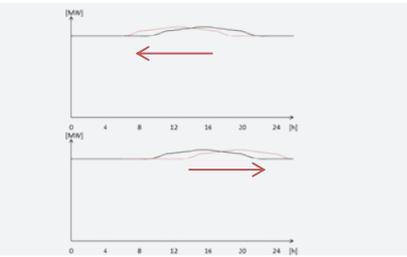
<b>Rahmenbedingungen</b>	<b>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</b>	<b>Bedeutung heute</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Der Strompreis schwankt abhängig von Stromerzeugung und -verbrauch. Daher variiert der Strompreis in Abhängigkeit der Tageszeit.</li> <li>- Mit dem weiteren Ausbau von Photovoltaik und Windkraft können erhebliche Preisunterschiede im Tagesverlauf auftreten. Es ist somit gewinnbringend, den industriellen Verbrauch an den Strompreis anzupassen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgrund des höheren Verbrauchs stehen hohe Preise im Tagesverlauf geringeren Preisen zur Nacht gegenüber.</li> </ul>	
<b>Technische Daten</b>	<b>Vorankündigungszeit</b>		<b>Abrufdauer</b>
	<p>Strompreise werden am Mittags des Vortages bekannt gegeben. Anschließend kann die Produktion für die Stunden 0 bis 24 Uhr an diese Strompreise angepasst werden. Dies entspricht somit einer Vorankündigungszeit von 12 bis 36 Stunden.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">1 Tag</div>		<p>Um signifikante Preisunterschiede nutzen zu können, muss der zeitliche Unterschied zwischen Lasterhöhung und -reduktion mindestens 3 Stunden (kürzere Erzeugungsspitzen) und maximal 12 Stunden (Tag/Nacht Ausgleich) sein</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: 0 auto;">3-12 Stunden</div>
<b>Business Case</b>	<b>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 2</b>		<b>Beispiel</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Negative Strompreise und große untertägige Preis-Spreads bieten die Möglichkeit die Kosten für den Strombezug zu reduzieren.</li> </ul>		<p>Um 12 Uhr wird bekannt gegeben, dass zwischen 10 und 14 Uhr des Folgetages negative Strompreise auftreten. Für den Zeitraum 18 bis 22 Uhr ergeben sich hohe Strompreise. Sie können durch eine Lastverlagerung von den Abendstunden in die Mittagsstunden die Strombezugskosten deutlich reduzieren.</p>

Abbildung 1.16: Auswertung zu Profil 2:  
Negative Strompreise während der Mittagsstunden aufgrund hoher EE-Einspeisung und vergleichsweise geringer Last

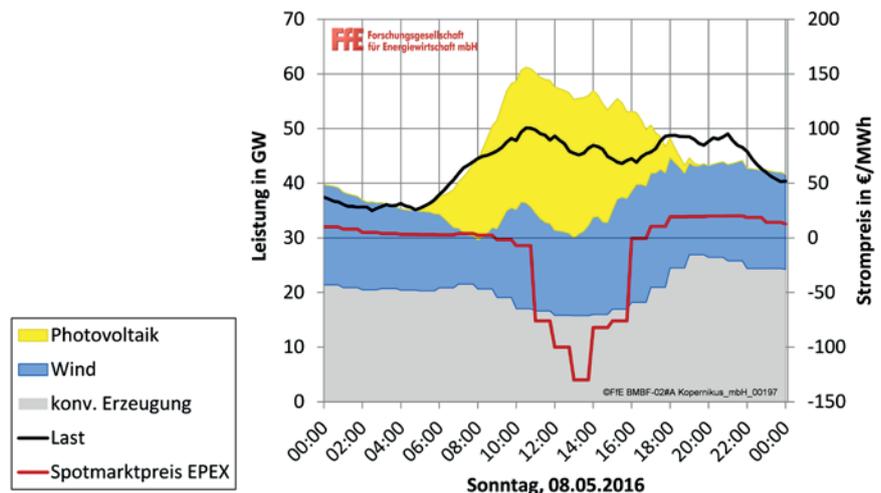


Abbildung 1.17, Abbildung 1.18 und Abbildung 1.19 fassen wichtige Informationen und Auswertungen zu Anforderungsprofil 3 zusammen. Die Dunkelflaute wird erst zukünftig an Bedeutung gewinnen, sobald deutlich höhere Anteile erneuerbarer Erzeugung erreicht werden. 2017 kam es während der vierten Januarwoche zu extrem hohen Strompreisen. Ursache hierfür war die typischerweise hohe Last während der Wintermonate bei gleichzeitig auftretender niedriger Einspeisung aus Wind und Photovoltaik. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass es während dieser Zeit auch zu Kraftwerksausfällen in Frankreich kam, wodurch die Situation zusätzlich verschärft wurde. Abbildung 1.19 zeigt zusätzlich, dass es sich bei der Dunkelflaute um ein seltenes Phänomen handelt. Die beschriebene Situation ergab sich im Verlauf eines Jahres – von April 2016 bis März 2017 – lediglich einmal.

Abbildung 1.17: Steckbrief zu Profil 3: „Reduktion der Last über mehrere Tage“

Rahmenbedingungen	<p><b>Energiewirtschaftlicher Hintergrund</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Im Winter können durch die schwächere Sonneneinstrahlung und mehrere aufeinanderfolgende windstille und bewölkte Tage sehr ungünstige Situationen für Erneuerbare Energie auftreten (Dunkelflaute).</li> <li>- Zur Anpassung an länger andauernde, ungünstige Wetterbedingungen eignet sich eine Lastreduktion über mehrere Tage.</li> </ul>	<p><b>Bedeutung heute</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufgrund des noch hohen Anteils von konventionellen Kraftwerken im Stromsektor ist eine längerfristige Reduktion über mehrere Tage noch nicht relevant.</li> </ul> <p><b>Bedeutung in Zukunft</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Bedeutung von Flexibilisierungen über längere Zeiträume wird aufgrund des ansteigenden Anteils der Erneuerbaren Energien in Zukunft zunehmen.</li> </ul>	
Technische Daten	<p><b>Vorankündigungszeit</b></p> <p>Auf Basis von Wetterprognosen ist die Dunkelflaute bereits 2 bis 5 Tage im Voraus prognostizierbar</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin: 10px 0;">2-5 Tage</div>		<p><b>Abrufdauer</b></p> <p>Jede Art von Lastreduktion ohne Nachholbedarf innerhalb dieser 5 Tage liefert einen positiven Beitrag zur Versorgungssicherheit</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; margin: 10px 0;">1-5 Tage</div>
Business Case	<p><b>Möglicher Business Case zum Anforderungsprofil 3</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Im Falle einer Dunkelflaute werden Strompreise in der Größenordnung von &gt; 10.000 €/MWh erwartet.</li> <li>- Eine Lastreduktion in diesem Zeitraum kann durch den Wiederverkauf des bereits kontrahierten Strombezugs zu erheblichen Erlösen führen.</li> </ul>		<p><b>Beispiel</b></p> <p>Am Donnerstag wird für den Zeitraum der nächsten Woche eine Dunkelflaute prognostiziert. Es ergeben sich hierdurch Strompreise von 10.000 €/MWh. Sie können durch Lastreduktion und Wiederverkauf des kontrahierten Strombezugs in diesem Zeitraum deutliche Erlöse generieren.</p>

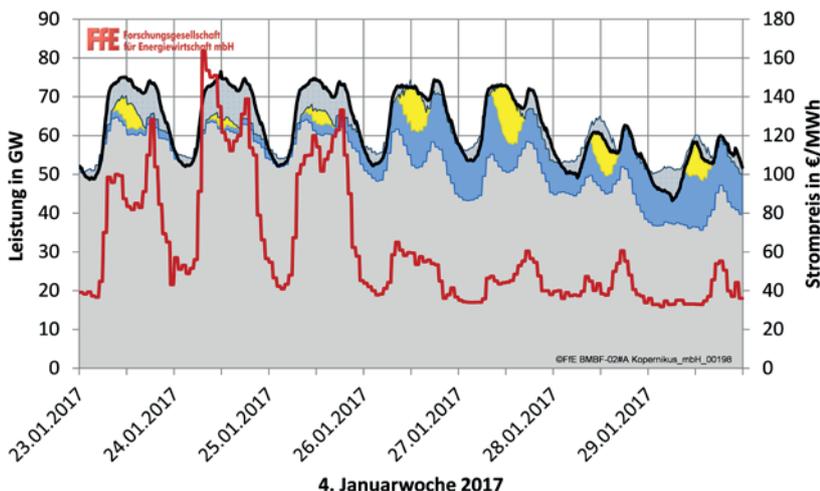
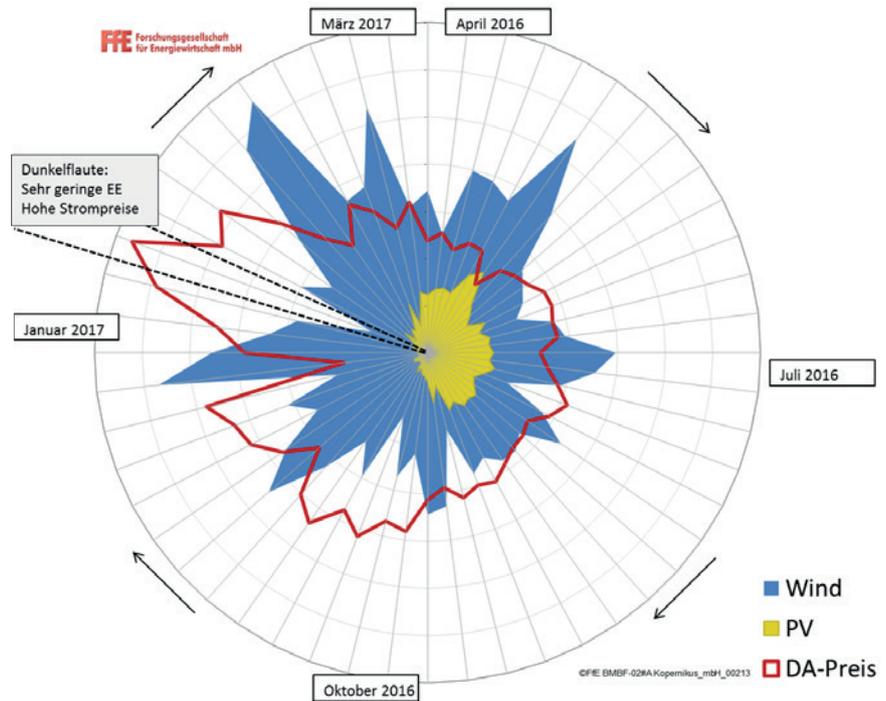


Abbildung 1.18: Auswertung zu Profil 3: Hohe Strompreise im Januar 2017 aufgrund geringer EE-Erzeugung und hohem Verbrauch



Abbildung 1.19: Auswertung zu Profil 3:  
Die „Dunkelflaute“ als seltenes Phänomen



## 1.5 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] C. Dufter, A. Guminski, C. Orthofer, S. von Roon, A. Gruber, Lastflexibilisierung in der Industrie-Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, IEWT 2017, Wien 2017.
- [2] Deutsche Energie-Agentur (dena): dena-Netzstudie II – Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015–2020 mit Ausblick 2025, Berlin 2010.
- [3] T. Buber, A. Gruber, S. von Roon, M. Klobasa, Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast in: Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 3.2013 – Energiewende in Deutschland – Chancen und Herausforderungen, DIW Berlin, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin 2013.
- [4] Y. Scholz, H. C. Gils, T. Pregger, D. Heide, F. Cebulla, K. K. Cao, D. Hess, F. Borggreffe, Möglichkeiten und Grenzen des Lastausgleichs durch Energiespeicher, verschiebbare Lasten und stromgeführte KWK bei hohem Anteil fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart 2014.
- [5] M. Klobasa, Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten, Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich (ETH), Zürich 2007.

- [6] M. Paulus, F. Borggreffe, The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany in: Applied Energy, Institute of Energy Economics (EWI), Köln 2010.
- [7] C. Pelling, T. Schmid, et al., Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 – Teilbericht: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München 2016.
- [8] Buber, Tim; Gruber, Anna; von Roon, Serafin; Hüneke, Marie; Klobasa, Marian; Angerer, Gerhard; Schleich, Joachim; Friedrichsen, Nele; Lüllmann, Arne: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2013.
- [9] M. Steuerer, N. Klempp, K. Hufendiek, B. Baumgart, B. Steinhausen, Identifikation und Realisierung wirtschaftlicher Potenziale für Demand Side Integration in der Industrie in Deutschland, Trianel GmbH, Aachen 2015.
- [10] Leitstudie Strommarkt – Arbeitspaket Funktionsfähigkeit EOM & Impact-Analyse Kapazitätsmechanismen, r2b energy consulting GmbH, Köln 2014.
- [11] V. Orioli, Potentials of Industrial Demand Side Management. Siemens AG, Dresden 2016.
- [12] A. von Scheven, T. Hartkopf, M. Prella, Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix, Technische Universität Darmstadt – Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien (TUD), Darmstadt 2012.
- [13] T. Langrock, S. Achner, C. Jungbluth, C. Marambio, A. Michels, P. Weinhard, B. Baumgart, A. Otto, Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2015.
- [14] R. Apel et al., Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration, Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG), Frankfurt am Main 2012.
- [15] K. Arnold, T. Janßen, L. Echternacht, S. Höller, T. Voss, K. Perrey – Co-vestro, FlexInd – Flexibilisation of industries enables sustainable energy systems. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie, Wuppertal 2016.
- [16] T. Langrock, S. Brühl, A. Michels, Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen: Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen. EnergieAgentur NRW, Düsseldorf 2016.
- [17] A. Gruber, S. Von Roon, S. Fattler, Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern, Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München 2016.

- [18] S. von Roon, T. Gobmaier, Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), München 2010.
- [19] H. Berger, T. Eisenhut, S. Polak, R. Hinterberger, Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector – Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids in: Berichte aus Energie- und Umweltforschung 65/2011, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Wien 2011.
- [20] Gabler Wirtschaftslexikon – Stichwort: Opportunitätskosten, Springer Gabler, Wiesbaden 2016.
- [21] T. Buber, T. Gobmaier, S. von Roon, L. Kreuder, Energiewende im Strommarkt – Chancen nutzen – Risiken vermeiden, : IHK für München und Oberbayern, München 2012.
- [22] P. Elsner, B. Erlach, M. Fishedick, Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 – Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München 2015.
- [23] C. Nabe, Flex-Efficiency – Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern, Agora Energiewende, Berlin 2016.
- [24] N. Krzikalla, S. Achner, S. Brühl, Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien – Studie im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energie, BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, Aachen 2011.
- [25] Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse in: Paper und Vortrag beim 13. Symposium Energieinnovation in Graz. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München 2014.
- [26] Frontier Economics: Strommarkt in Deutschland – Gewährleistet das derzeitige Marktdesign Versorgungssicherheit? Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Köln 2014.
- [27] M. Steurer, U. Fahl, T. Eberl, A. Voß, Identifikation und Bewertung des intelligenten Lastmanagementpotenzials in der Industrie in Baden-Württemberg, EnBW Vertrieb GmbH Stuttgart, Stuttgart 2013.
- [28] D. Atabay, Energiespeichersysteme im Fabrikbetrieb, Seminar Energie und Produktion, Augsburg 2015.
- [29] B. Wille-Haussmann, T. Erge, M. Klobasa, Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe 2009.

- [30] U. Focken, M. Klobasa, Kurz- bis Mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe 2011.
- [31] M. A. Graßl, Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion, München: Dissertation, Technische Universität München, München 2014.
- [32] F. Holtrup, Potenzial für Demand Side Management der energieintensiven Industrie in Deutschland - Eine Kostenbetrachtung am Beispiel der Chlor-Alkali-Elektrolysen. Weltenergieat – Deutschland e.V., Berlin 2015.
- [33] A. Kollmann, K. de Bruyn, S. Moser, LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur – Potenzialanalyse für Smart Grids. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 7e/2015. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2015 [www.nachhaltigwirtschaften.at/de](http://www.nachhaltigwirtschaften.at/de)
- [34] Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB): Ausschreibungsplattform Regelleistung (Daten verschiedener Jahre) in: <https://www.regelleistung.net/>. Hamburg: Vattenfall Europe Information Services, 2016.
- [35] T. Klaus, C. Vollmer, K. Werner, H. Lehmann, Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen, Umweltbundesamt 2010.
- [36] M. Faulstich, H. Foth, C. Calliess, O. Hhmeyer Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung, Sondergutachten des Sachverständigenrats für Umweltfragen, Berlin 2011.
- [37] H. M. Henning, A. Palzer, Energiesystem Deutschland 2050 – Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO<sub>2</sub> Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien, Fraunhofer ISE, Freiburg 2013.
- [38] B. Pfluger, F. Sensfuß, G. Schubert, J. Leisentritt, Tangible ways towards climate protection in the European Union (EU Long-term scenarios 2050), Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), Karlsruhe 2011.
- [39] S. Mitra, I. E. Grossmann, J.M. Pinto, N. Arora, Optimal production planning under time-sensitive electricity prices for continuous power-intensive processes, In Computers & Chemical Engineering, Volume 38, 2012, Pages 171-184, ISSN 0098-1354
- [40] X. Wang, H. Teichgraeber, A. Palazoglu, N.H. El-Farra, An economic receding horizon optimization approach for energy management in the chlor-alkali process with hybrid renewable energy generation, In Journal of Process Control, Volume 24, Issue 8, 2014, Pages 1318-1327, ISSN 0959-1524



## KAPITEL 2

# FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Roland Pietruck, Holger Rosemann,  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut (BFI), Düsseldorf

Marten Sprecher,  
Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

Karin Arnold, Georg Holtz,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

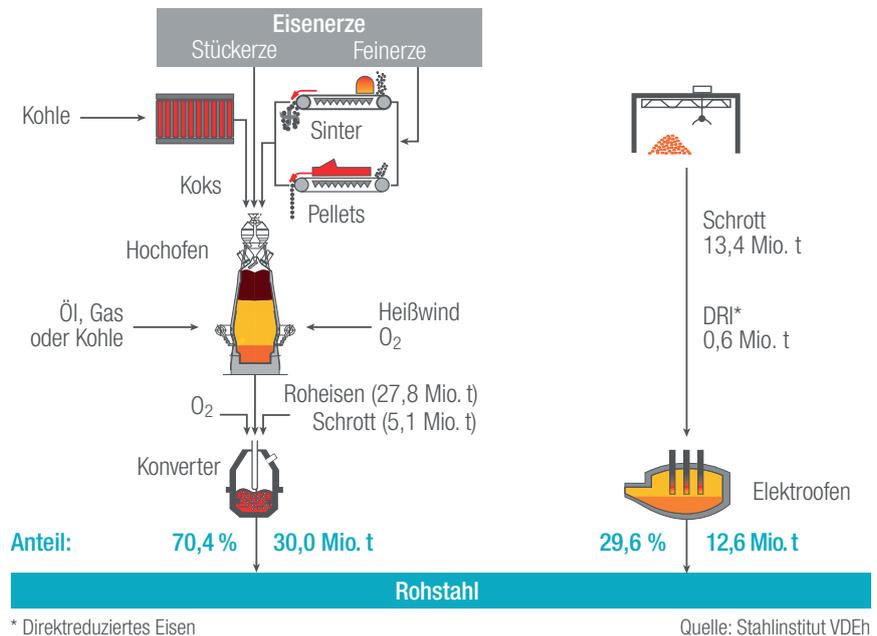
Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

## 2.1 BEDEUTUNG DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS IN DER STAHLINDUSTRIE

Stahl wird vorwiegend über zwei Prozessrouten erzeugt (s. Abbildung 2.1): die Hochofen-/Konverterroute, mit der in Deutschland rd. zwei Drittel des Rohstahls erzeugt wird, und die Elektroofenroute, die zu rd. einem Drittel der Rohstahlproduktion beiträgt. Die Hochofen-/Konverterroute basiert auf Verwendung von Eisenerzen als Rohstoff sowie Koks als Reduktionsmittel. Demgegenüber wird bei der Elektroofenroute überwiegend Stahlschrott zur Stahlherstellung verwendet und in Elektrolichtbogenöfen zu Rohstahl verarbeitet.

Die Standorte der Stahlindustrie in Deutschland unterscheiden sich entsprechend der Produktionsroute und der regionalen Lage der Werke (s. Abbildung 2.2). Die sechs integrierten Hüttenwerke betreiben jeweils zwei bis drei Hochofen an ihren Standorten. Sie erzeugen Oxygenstahl durch Frischen von Roheisen mit Sauerstoff. Zum integrierten Hüttenwerk zählen i.d.R. auch eine Kokerei und eine Sinteranlage. Die in der Koks-, Roheisen- und Stahlerzeugung produzierten Kuppelgase werden an diesen Standorten in angeschlossenen Kraftwerken zur Herstellung von Eigenstrom genutzt.

Abbildung 2.1: Erzeugungsrouten zur Stahlherstellung in Deutschland (2015) [1]



Innerhalb dieses Kapitels wird vor allem die Elektrostahlerzeugung genauer analysiert, da Elektrolichtbogenöfen eine besonders große elektrische Anschlussleistung besitzen und im Gegensatz zu integrierten Hüttenwerken den Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen. Die Elektrostahlwerke in Deutschland nutzen Stahlschrott als Rohstoff für die Stahlherstellung. Nur ein Elektrostahlwerk verfügt über eine Direktreduktionsanlage, in der Eisenerzpellets als Rohstoff verwendet und durch Reduzierung mit Erdgas zu Eisenschwamm (DRI) umgewandelt werden.

Abbildung 2.2: Standorte der Stahlerzeugung in Deutschland [1]

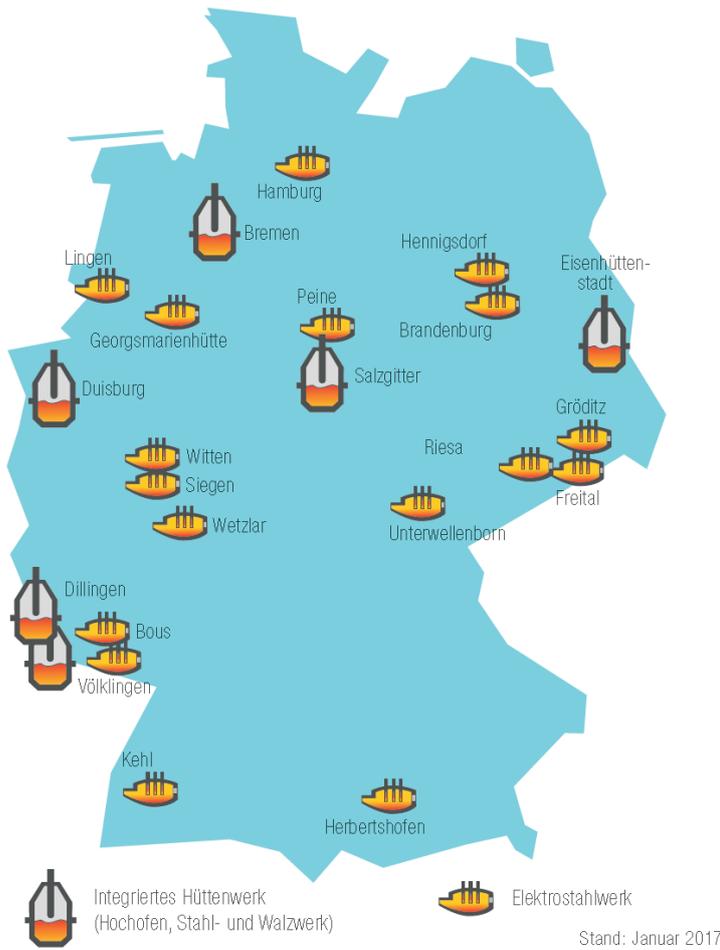


Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über die Produktionsmengen der größeren Unternehmen der Stahlindustrie in Deutschland mit Unterscheidung des Herstellungsverfahrens in Oxygenstahl und Elektro Stahl. Ca. 70 % des Stahls wird als Oxygenstahl in der Hochofen-/Konverterroute und rd. 30 % in Elektrolichtbogenöfen hergestellt.

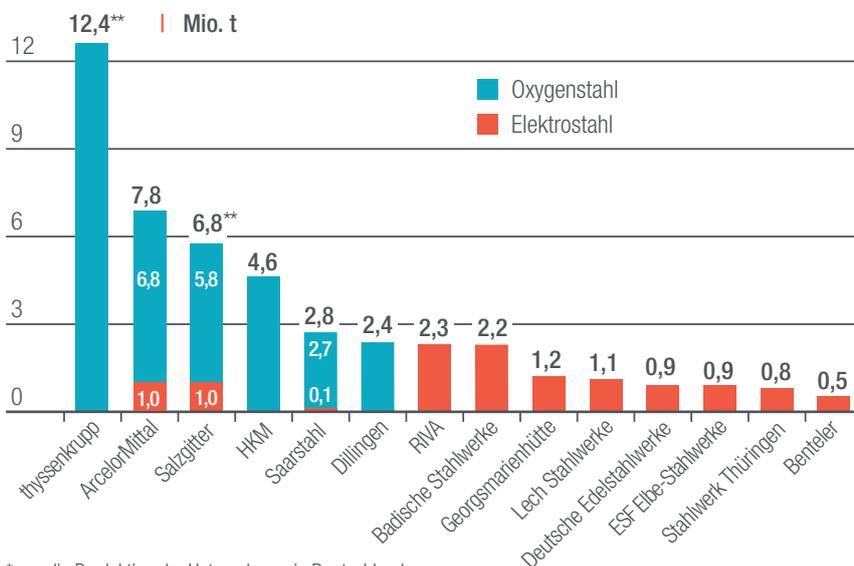


Abbildung 2.3: Stahlerzeugung der größten Stahlwerke in 2015 in Deutschland [1] (Anteil an der Gesamterzeugung von 42,7 Mio. t: 98 %)

\* nur die Produktion der Unternehmen in Deutschland

\*\* Produktion einschließlich HKM-Anteil

Quelle: WV Stahl

Der spezifische Primärenergiebedarf in der deutschen Stahlindustrie betrug im Jahr 2015 etwa 17,9 GJ/t Rohstahl und 19,8 GJ/t Stahlfertigerzeugnis. Bei der Elektrolichtbogenofenroute beträgt der Anteil des elektrischen Energiebedarfs ca. 89 % der Endenergie. In der Prozesskette der Elektrostahlerzeugung bietet sich der Elektrolichtbogenofen als Hauptverbraucher zur Flexibilisierung des elektrischen Energiebedarfs an. (Abbildung 2.4).

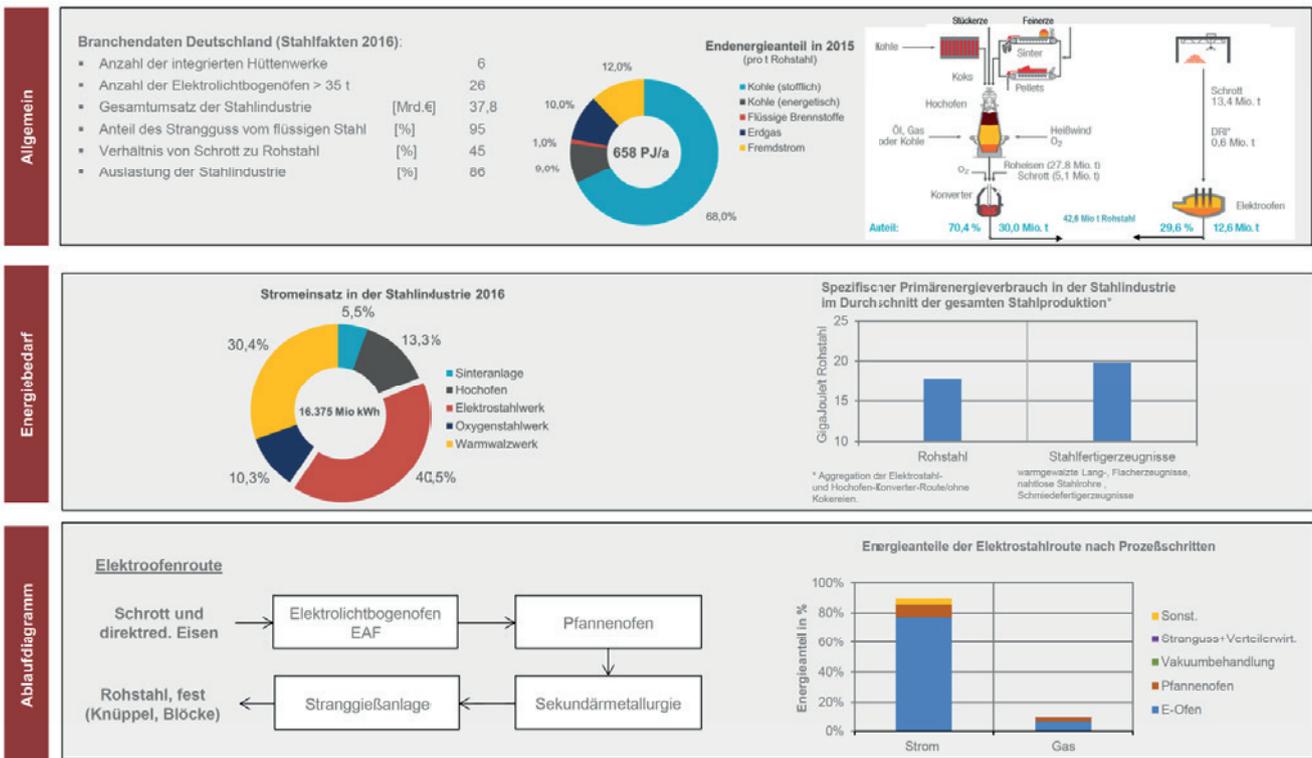


Abbildung 2.4: Branchensteckbrief Stahl

## 2.2 METHODIK DER DATENERHEBUNG

Die Daten der Stahlindustrie wurden durch systematische Analyse der vorhandenen Fachliteratur und mit Auswertung von Forschungs- und Entwicklungsprojekten der Branche ermittelt. Spezifische Daten über die Auslegung vorhandener Elektrolichtbogenöfen (Electric Arc Furnace; EAF) wurden in speziellen Seminaren des Stahlinstituts und mit der Datenbank PLANTFACTS des Stahlinstituts VDEh bereitgestellt. Die Ermittlung der Hemmnisse zur Flexibilisierung des Elektrolichtbogenofenverfahrens wurde nach der in Kapitel 1 beschriebenen Methodik durchgeführt.

Wesentliche Erkenntnisse über die Flexibilitäts-Kriterien und über Hemmnisse bei der Bereitstellung von Flexibilität stammen aus Interviews mit Vertretern der Unternehmen, die sich zur Mitarbeit bereit erklärt haben. Die Autoren des Berichts danken den Vertretern der folgenden Unternehmen für die geführten Diskussionen:

- Lechstuhlwerke GmbH, Meitingen
- Deutsche Edelstahlwerke GmbH, Witten

Die Interviews wurden vor Ort bei den Unternehmen durchgeführt. Die Interviews beinhalteten die Identifikation der wesentlichen Prozesse und Hemmnisse zur Flexibilisierung der Fahrweise des Elektrolichtbogenofens. Die Interviewdauer war jeweils ca. 2–3 Stunden.

Ferner standen Vertreter des VDEh-Energieeffizienznetzwerks Elektrostahl, dem 11 Elektrostahlwerke aus Deutschland angehören, für eine Diskussion der Thematik „Flexibilität der Elektrostahlerzeugung“ und der Ergebnisse des vorliegenden Berichts zur Verfügung.

Die Ergebnisse sind teilweise als exemplarisch für die betrachteten Unternehmen zu sehen und nicht in jedem Fall auf andere Unternehmen oder Standorte übertragbar.

## 2.3 WESENTLICHE CHARAKTERISTIKA DER STAHLBRANCHE

### PRODUKTVIELFALT

Die Grobklassifikation der DIN EN 10020 unterscheidet zwischen Grundstählen, unlegierten Qualitätsstählen, unlegierten Edlstählen, legierten Qualitätsstählen und legierten Edlstählen (u.a. nicht-rostende Stähle). Stahlprodukte werden auch innerhalb dieser Grobklassifikation in einer großen Vielzahl von (häufig kundenspezifischen) Variationen hergestellt. Durch eine Vorauswahl des Schrotts sowie den Zusatz von produktspezifischen Legierungsmitteln können verschiedenste Produktqualitäten erzeugt werden. Unterschiedliche Stähle haben dabei z.T. sehr unterschiedliche Produkteigenschaften, z.B. hinsichtlich der Umformbarkeit, Oberflächenqualität und Korrosionsbeständigkeit. Die Produktpalette der Elektrolichtbogenofenroute reicht dabei von Baustahl bis hin zu Edlstahllegierungen. Nichtrostende und legierte Stähle haben in Deutschland einen höheren Anteil an der Gesamtproduktion (50 %) als im internationalen Vergleich (30 %), [2] (Stand 2010). Die Branche ist global von einer hohen Innovationsintensität zur Neuentwicklung oder Verbesserung von Stählen gekennzeichnet [2], [3].

### KONJUNKTUR UND AUSLASTUNG DER BRANCHE

Die globale Stahlindustrie weist derzeit – insbesondere aufgrund eines immensen Kapazitätsaufbaus in China – eine Überkapazität auf, was zu erhöhtem Wettbewerbsdruck auf die deutsche Stahlindustrie führt [3], [4]. In diesem Kontext wird eine starke Spezialisierung der Produktion gemäß Kundenspezifikationen sowie die starke horizontale Vernetzung der Stahlherstellung mit der Weiterverarbeitung und den Hauptabnehmern z.B. aus dem Automobilbau und Maschinenbau als wesentlicher Wettbewerbsvorteil der europäischen und deutschen Stahlindustrie gesehen [3], [4]. Die Rohstahlerzeugung, und damit die Auslastung der Produktion, schwankt in Deutschland in den einzelnen Monaten der Jahre seit 2011 auf einem insgesamt relativ hohen Niveau im Bereich von ca. 80–90 % effektiver Auslastung [5]<sup>1</sup>. Die globale Überkapazität schlägt (bisher) also nur bedingt auf die Auslastung der deutschen Rohstahlproduktion durch.

<sup>1</sup> Küster Simic u.a. führen ihre Berechnungen nicht genau aus, so dass nicht klar ist inwiefern unvermeidbare Stillstandzeiten in der Berechnung berücksichtigt wurden. Es ist davon auszugehen, dass eine effektive Auslastung von 90 % bereits de facto Volllast bedeutet.

**ZUKAUFMÖGLICHKEITEN UND LIEFERFRISTEN**

Vor dem Hintergrund der hohen Produktvielfalt und dem Wettbewerbsdruck findet eine Lagerhaltung, mit der entsprechende Kosten verbunden sind, in größerem Umfang weder beim Stahlproduzenten noch beim Kunden statt.<sup>2</sup> Stattdessen wird je nach Auftrag, den spezifischen Kundenwünschen entsprechend, produziert. Nach Auftragsingang wird ein Liefertermin (wochenscharf) vereinbart, und somit ein klares Zeitfenster definiert, in dem die Produktion stattfinden muss. Diese just-in-time Produktion wird durch den Trend zur Industrie 4.0 in Zukunft voraussichtlich noch enger getaktet [4]. Die Lieferfristen hängen von der Art des Produkts und den für dessen Herstellung nötigen Bearbeitungsschritten ab, und betragen i. d. R. mehrere Wochen. Die Möglichkeiten, Produkte am Markt zuzukaufen, werden für spezifisch nach Kundenwunsch produzierte Stähle als sehr gering oder nicht gegeben eingeschätzt.

<sup>2</sup>Für den Fall legierter Edelmehle wurde zudem eine Minimierung des Risikos von Preisschwankungen der verarbeiteten Legierungen als Hemmnis für eine Lagerhaltung genannt.

**2.4 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES PROZESSES**

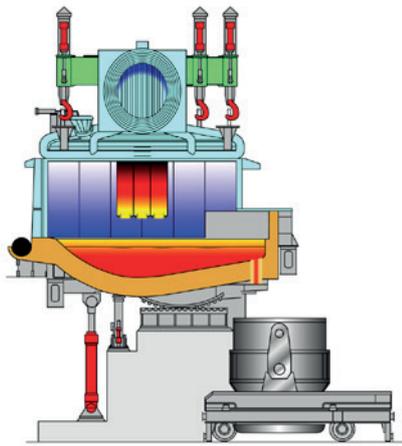
Elektrostahl wird durch Einschmelzen von Stahlschrott im Elektrolichtbogenofen hergestellt. Das zentrale Aggregat eines Elektrostahlwerks ist der Elektrolichtbogenofen, in dem der Elektrostahl chargenweise hergestellt wird. In der Prozessroute zur Herstellung von Elektrostahl folgen dem Einschmelzvorgang im Elektrolichtbogenofen weitere metallurgische Prozessschritte, bevor der Stahl in den Gießanlagen zu Strangguss oder Blockguss verarbeitet werden kann. Dies ist prinzipiell in Abbildung 2.5 dargestellt.



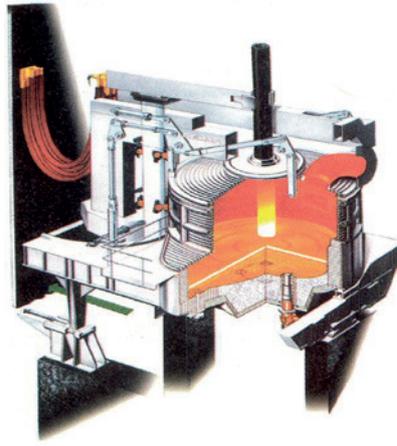
Abbildung 2.5: Prozessroute der Stahlherstellung im Elektrostahlwerk

Elektrostahl wird heute in Deutschland zu 90 % in Stranggussanlagen vergossen. Einzelne Werke besitzen ebenfalls Einrichtungen zur Herstellung von Blockguss, der dort zeitweise parallel zum Strangguss erzeugt werden kann. Auf die Herstellung von Blockguss entfiel in 2016 bei Elektrostahlwerken ein Mengenanteil von 9,1 %, hingegen bei Oxygenstahlwerken nur ein Mengenanteil von 2,8 % der Produktion [6]. Blockguss wird für bestimmte, besonders große Werkstücke, die z.B. für Schmiedevorgänge benötigt werden, verwendet.

Der prinzipielle Aufbau des Elektrolichtbogenofens ist in der folgenden Abbildung 2.6 dargestellt. Es wird zwischen dem Drehstrom-Lichtbogenofen mit 3 Grafitelektroden und dem Gleichstrom-Lichtbogenofen mit einer Elektrode als Zentral-Kathode und einer Anode im Boden des Ofengefäßes unterschieden.



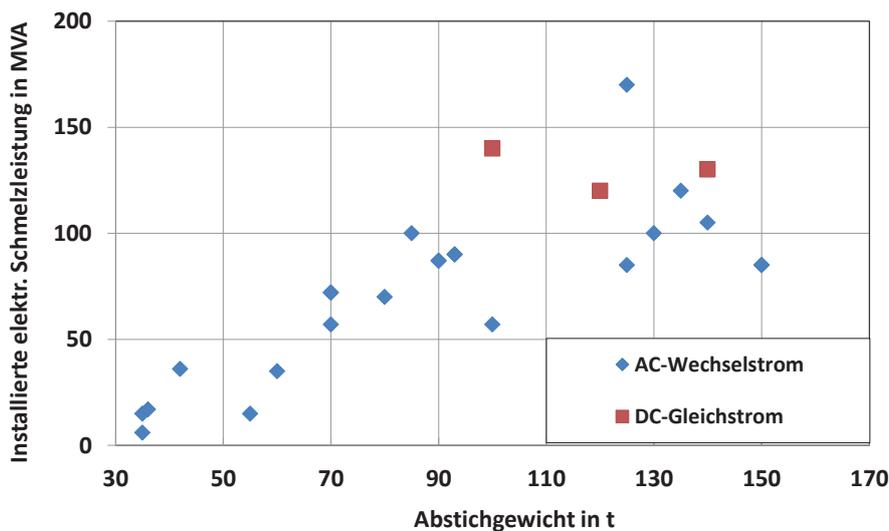
Drehstrom-Elektrolichtbogenofen



Gleichstrom-Elektrolichtbogenofen

Abbildung 2.6: Aufbau des Drehstrom- und Gleichstrom-Elektrolichtbogenofens [7]

Abbildung 2.7 zeigt die installierte elektrische Leistung der in Deutschland betriebenen 26 Elektrolichtbogenöfen mit einem Abstichgewicht  $\geq 35$  t in Abhängigkeit von dem jeweiligen Abstichgewicht.

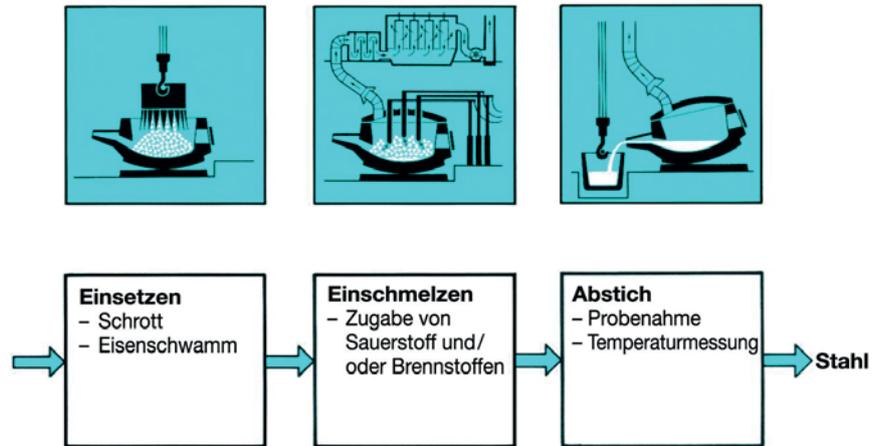
Abbildung 2.7: Elektrische Leistung von Elektrolichtbogenöfen in Deutschland mit Abstichgewicht  $\geq 35$  t (AC=Wechselstrom, DC=Gleichstrom) [6]

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass die Öfengefäße für ein Abstichgewicht zwischen 35 und 150 t dimensioniert wurden und dass die elektrische Anschlussleistung dieser Elektrolichtbogenöfen zwischen 6 und 170 MVA liegt und in Summe 2.046 MVA beträgt.

Die einzelnen Arbeitsschritte am Elektrolichtbogenofen sind in der Abbildung 2.8 vereinfacht dargestellt. Demnach kann der Betriebsablauf in drei Abschnitte unterteilt werden:

- Einsetzen der Rohstoffe,
- Einschmelzen des Schrotts,
- Abstich des flüssigen Stahls und der Schlacke.

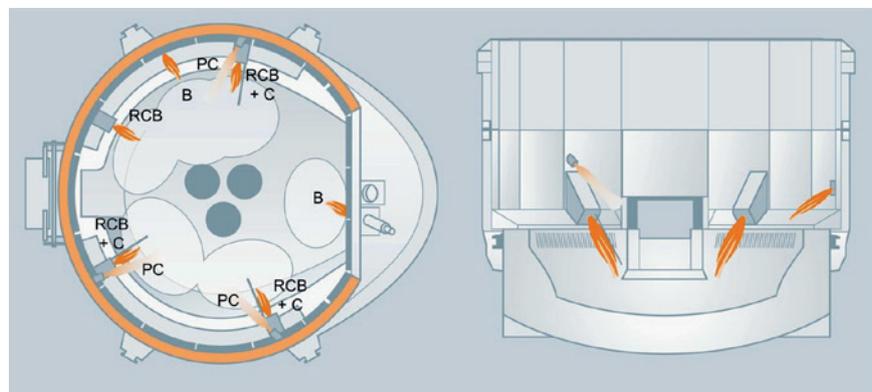
Abbildung 2.8: Prinzipieller Ablauf der Stahlherstellung im Elektrolichtbogenofen [7]



Der Elektrolichtbogenofen wird in der Regel mit 2 bis 3 Körben an Schrott gefüllt. Der Einschmelzvorgang dauert üblicherweise ca. 40–60 min, hiervon entfallen ca.  $\frac{2}{3}$  auf die power-on-Zeit. Kurze Unterbrechungen des Einschmelzvorgangs sind z.B. für das Nachsetzen des 2. bzw. 3. Korbs oder für Probenahmen kurz vor dem Abstich erforderlich.

Der Elektrolichtbogenofen kann in Ergänzung zur elektrischen Beheizung über die zentral installierten Elektroden auch in geringem Umfang mit Zusatzbrennern und Injektoren für fossile Brennstoffe wie Erdgas beheizt werden. Abbildung 2.9 zeigt die prinzipielle Anordnung dieser Zusatzbrenner und Injektoren am Rand des Ofengefäßes.

Abbildung 2.9: Zusatzbrenner und Injektoren am Elektrolichtbogenofen (RCB-Refining Combined Burner, C-Kohlestaubinjektion, PC-Nachverbrennungsinjektor, B-Brenner) [8]



Diese Art der Zusatzbeheizung ist nur in einem kurzen Zeitfenster jeweils nach Chargieren des kalten Schrotts sinnvoll möglich.

Der Elektrolichtbogenofen durchläuft bei der Herstellung einer Charge an flüssigem Stahl unterschiedliche Betriebsphasen. Entsprechend dem Verflüssigungsgrad bzw. dem Volumen des Schmelzgutes stellen sich charakteristische Situationen des Lichtbogens und des Schmelzgutes ein, die in der Abbildung 2.10 dargestellt sind. Der Einschmelzvorgang kann differenziert werden in

- den Anfahrvorgang mit reduzierter Außenleiterspannung,
- das Schrottschmelzen mit hoher Schmelzleistung und langem Lichtbogen,
- der Schaumslaggenperiode mit kürzerem Lichtbogen, und
- dem Warmfahren des flüssigen Bades ohne Schaumslagge.

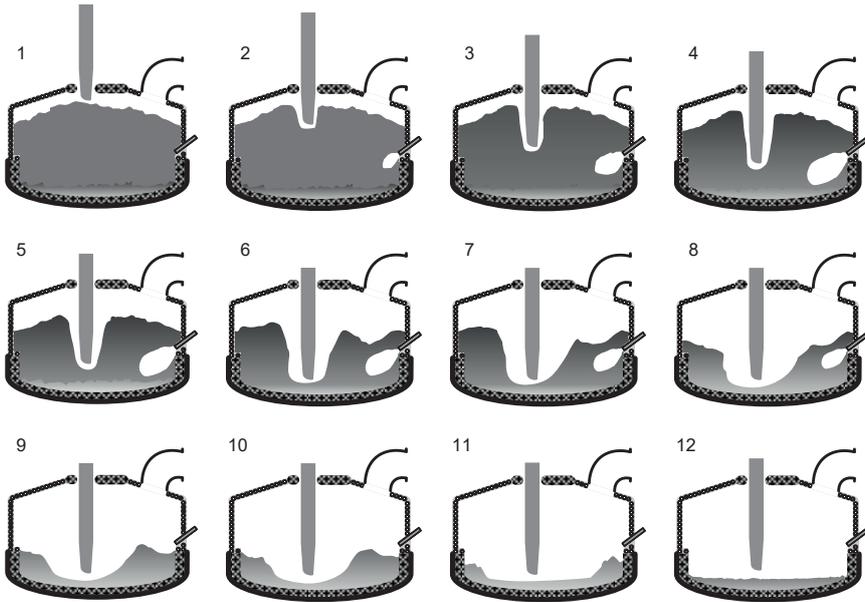
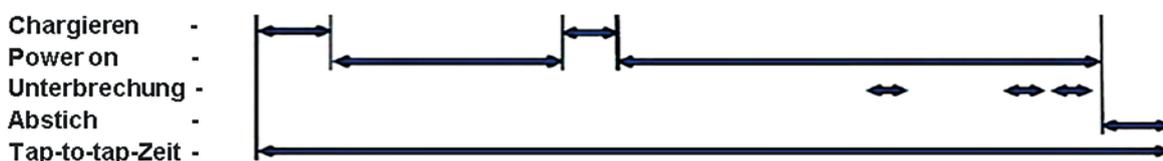
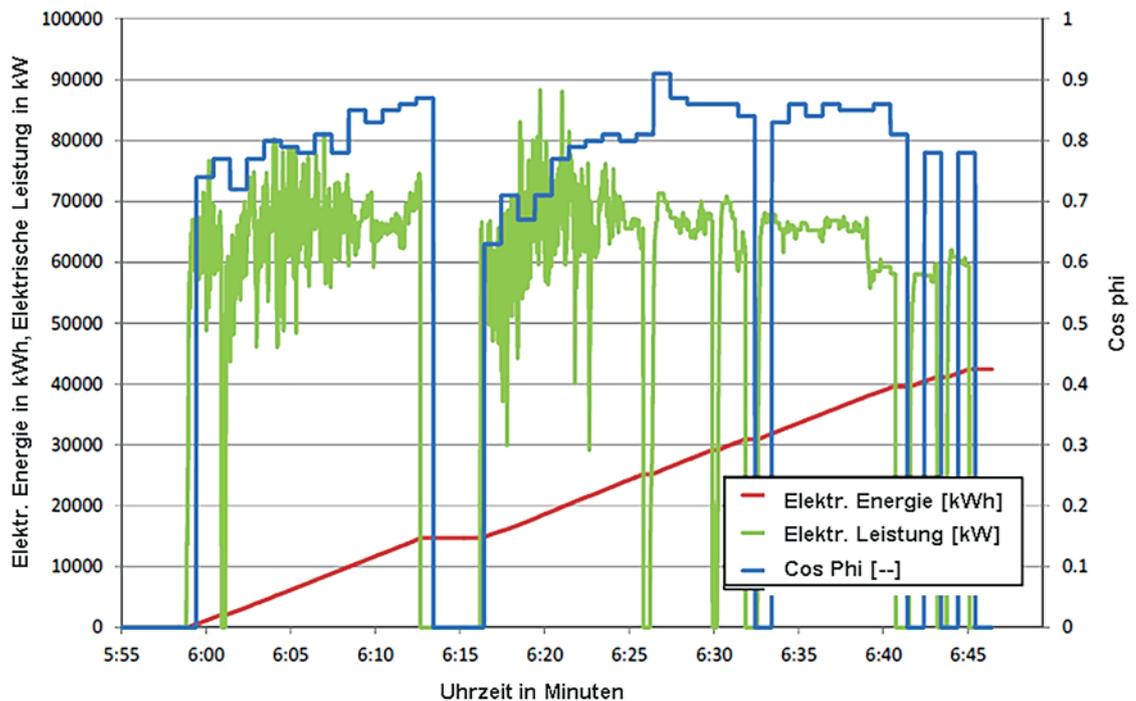


Abbildung 2.10: Verlauf des Schmelzvorgangs und der jeweils in den Betriebsphasen vorliegenden Beheizung mittels Lichtbogen und Zusatzbrennern [8]

In diesen unterschiedlichen Betriebsphasen verändert sich auch die elektrische Leistungsaufnahme des Lichtbogens.

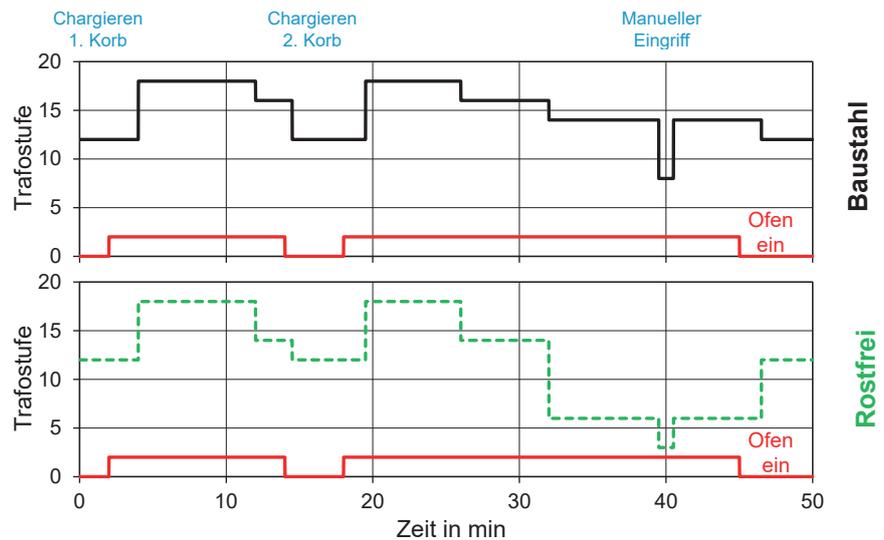
Abbildung 2.11 zeigt ein Beispiel des Lastganges eines Elektrolichtbogenofens für das Einschmelzen einer Charge. Die power-off-Zeiten betragen rd. 1/3 der Gesamtzeit eines Schmelzyklus. In den power-off Zeiten erfolgt das Chargieren von Schrotten, Probenahmen und Temperaturmessungen und am Ende schließlich der Abstich des flüssigen Stahls und der Schlacke.

Abbildung 2.11: Lastgang der elektrischen Leistung eines Elektrolichtbogenofens [9]



Die elektrische Leistung des Lichtbogens kann während des Einschmelzzyklus stufenweise durch Verstellung der Trafo-Spannungsstufe angepasst werden. Dabei werden die jeweiligen Sollwerte der Trafostufen entsprechend dem Verlauf des Schmelzvorganges vorgegeben und in der Software zur Steuerung der Lichtbogenlänge hinterlegt. Abbildung 2.12 zeigt ein Beispiel eines Werks für den Schmelzzyklus von Baustahl und rostfreiem Stahl.

Abbildung 2.12: Leistungsstufen im Chargenverlauf des Elektrolichtbogenofens [8]



Die in Abbildung 2.12 gezeigten Leistungsänderungen im Verlauf der Einschmelzzeit des Elektrolichtbogenofens bewirken, dass die real übertragene Schmelzleistung des EAF im Mittel deutlich unter der installierten elektrischen Anschlussleistung liegt. An dieser Anlage ergab sich aus der Analyse der Betriebsdaten des EAF, dass in der power-on-Zeit im Mittel rd. 72 % der installierten Wirkleistung bezogen werden konnte.

Die Massen- und Energiebilanz des Elektrolichtbogenofens ist geprägt von der Metallurgie der Reaktionen zur Stahlherstellung. Abbildung 2.13 zeigt eine typische Massenbilanz des Elektrolichtbogenofens mit den pro 1.000 kg Stahl benötigten Einsatzstoffen und den erzeugten Reaktionsprodukten.

Im Elektrolichtbogenofen werden die im Schrott enthaltenen unerwünschten Begleitstoffe durch Zusatz von Kalk und Desoxidationsmitteln chemisch gebunden und in Form von Schlacke aus dem Schmelzbad abgetrennt. Zur Entfernung des im Schmelzbad gelösten Kohlenstoffs wird der Stahl auch mit Sauerstoff behandelt.

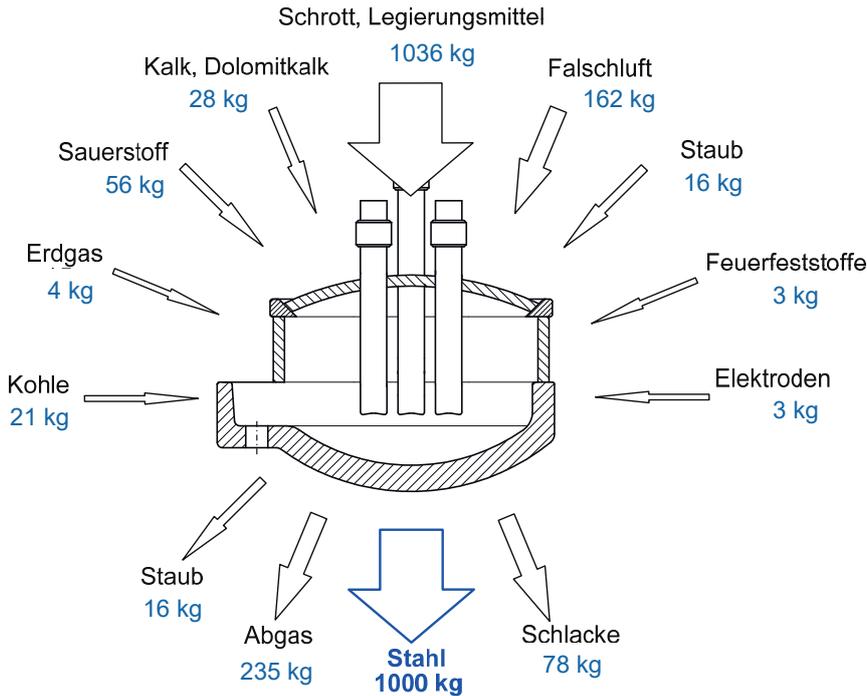


Abbildung 2.13: Typische Massenbilanz des Elektrolichtbogenofens [7]

Ferner zeigt Abbildung 2.14 eine typische Energiebilanz eines Elektrolichtbogens mit den zugeführten Energieeinträgen durch elektrische Energie, Erdgas und durch chemische Reaktionen der Einsatzstoffe sowie den Energieverlusten durch Gefäßkühlung, Wandwärmeverluste und durch Enthalpieströme der Abgase bzw. des flüssigen Stahls und der Schlacke. Der elektrische Energiebedarf kann zwischen 350 und 500 kWh/t Rohstahl betragen.

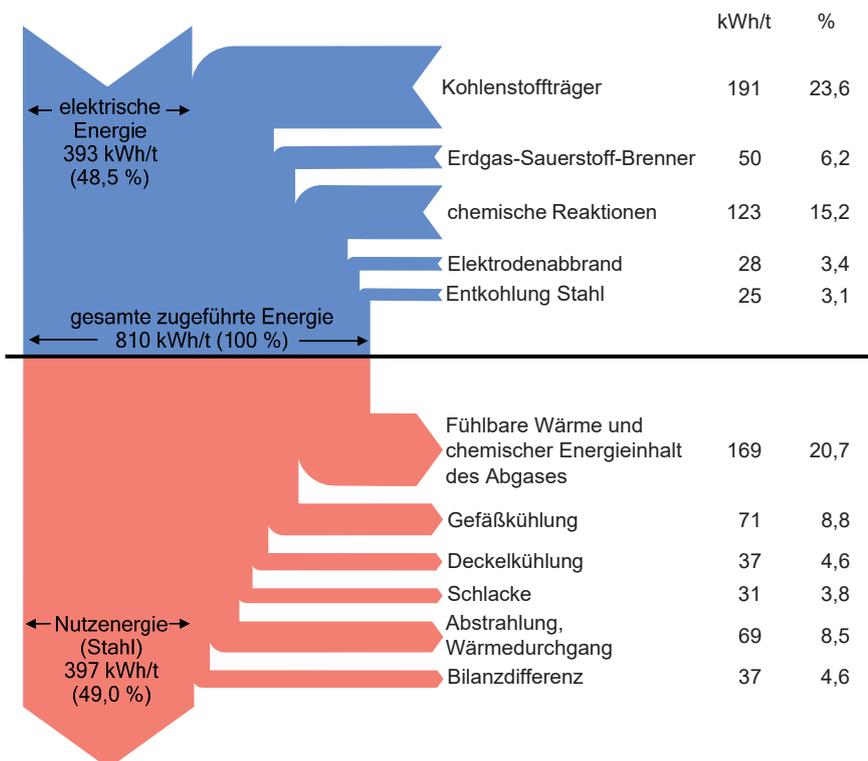


Abbildung 2.14: Typische Energiebilanz eines Elektrolichtbogenofens [7]

## 2.5 INNERBETRIEBLICHE ORGANISATION

Der Betriebsablauf eines Stahlwerks wird vor allem von der Qualitätssteuerung und Sortenvielfalt der unterschiedlichen Stahlsorten bestimmt. Insgesamt wird angestrebt, eine möglichst hohe Material- und Energieeffizienz des Gesamtprozesses zu erreichen. Hierfür sind in der Regel die folgenden Kriterien von hoher Bedeutung:

- hohes Ausbringen und Vermeiden von Minderqualitäten bzw. Materialrückläufen
- optimale Auslastung der Anlagen, kurze tap-to-tap-Zeit des EAF
- möglichst wenig Betriebsunterbrechungen für ungeplante Instandsetzungen und dadurch hohe Produktivität und geringer spezifischer Energiebedarf

### ZEITVERFÜGBARKEIT EINES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Für eine Analyse der Stromverbrauchssituation ist die real vorliegende Zeitverfügbarkeit eines Elektrolichtbogenofens zu betrachten. Die Verlustzeiten für Wartung, Instandsetzung und Nichtbetrieb des EAF eines im 3-Schicht-Rhythmus vollkontinuierlich betriebenen Werks sind exemplarisch in Tabelle 2.1 dargestellt. Aus der Tabelle geht hervor, dass die power-on-Zeit des hier betrachteten Elektrolichtbogenofens rd. 52 % der gesamten Kalenderzeit von 365 Tagen betrug. Dieser Wert kann sich je nach Auslastung der einzelnen Standorte verändern. Diese Größe ist vor allem für eine mögliche Extrapolation der zeitgleich verfügbaren Flexibilität von Elektrolichtbogenöfen von großer Bedeutung.

Tabelle 2.1: Beispiel der jährlichen Betriebszeit eines Elektrolichtbogenofens<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Beispiel nach Angaben eines Elektrostahlwerks

Kalenderzeit			
Betriebszeit			Geplante Nicht-Produktion
Laufzeit		Störung Instandsetzung	
Power-On	Chargieren Abstechen Nebenzeiten		
52 %		22 %	14 %
		Leistungs-verluste	Verfügbar-keits-verluste = Jahres-revision

### AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Die Auslastung des Stahlwerks ist anhand der Auftragseingänge absehbar, bzw. kann daraus für die nähere Zukunft abgeschätzt werden. Als Reaktion auf steigende/sinkende Auslastung werden die Betriebs- und Stillstandzeiten entsprechend erhöht bzw. verringert. Nicht benötigte Kapazitäten werden also zu Stillstandzeiten gebündelt. In der verbleibenden Betriebszeit wird eine volle Auslastung des Betriebs eingeplant. Die Produktion für einen Auftrag wird in den Betriebszeiten entsprechend eng über verschiedene Produktionsschritte hinweg getaktet. Einzelne

Aggregate, welche die Prozesse limitieren oder besonders störanfällig sind, werden in ihrer Leistung angepasst oder im organisatorischen Ablauf mit angemessenen Pufferzeiten versehen. So auch der kontinuierliche Batchprozess des Elektrolichtbogenofens, der ebenfalls betrieblichen Störungen unterliegt und deshalb gegenüber der Stranggußanlage eine erhöhte Produktionskapazität besitzen sollte. Für die Planung der Betriebszeit des EAF werden Aufträge verschiedener Größe und Stahlqualität zu einer betriebswirtschaftlich optimalen Schmelzenfolge kombiniert. Hierbei werden Einzelaufträge entsprechender Sorten kumuliert und entsprechend der Größe des EAF als Charge von ca. 60 bis 150 t in die Produktionsplanung übernommen. Die Betriebs- und Stillstandzeiten werden anschließend unter Berücksichtigung der Arbeitszeitregelungen in einen Schichtplan überführt. Dies beinhaltet unter Umständen auch den Auf- und Abbau von Personal. Die Auftrags- und Schichtplanung erfolgt im dazu befragten Unternehmen mit ein bis zwei Wochen Vorlauf für den Folgemonat.

Viele Werke sind im Vollkontinbetrieb zu 100 % ausgelastet und können ihren Schichtplan nicht verändern. Nur einzelne Werke verfügen noch über freie Produktionsschichten. In diesen Fällen lässt sich ggf. eine Flexibilität durch Verschiebung der Produktionszeit realisieren.

#### **VERNETZTE PRODUKTIONSPROZESSE**

Die Produktionskette zur Stahlherstellung im EAF ist nicht direkt über Stoff- oder Energieflüsse mit anderen Produktionsprozessen gekoppelt. Zur Vermeidung von Lastspitzen sind die Stromfahrpläne im Werk jedoch so ausgelegt, dass nicht alle Verbraucher gleichzeitig aktiv sind (EAF, Walzwerke, andere Anlagen im Werk). Viele Werke praktizieren aufgrund des hohen (von der Jahresmaximalleistung abhängigen) Netzentgelts eine Maximum-Begrenzung der in 15 min-Intervallen im Mittel aufgenommenen Leistung. Entsprechend müsste bei flexibler Fahrweise des EAF auch der Betrieb der anderen Verbraucher flexibel angepasst werden, was einen zusätzlichen organisatorischen Aufwand mit sich bringt. Dies wurde in den geführten Gesprächen jedoch nicht ausführlicher thematisiert.

#### **GEPLANTE REPARATUREN**

Pro Jahr werden ca. zwei umfangreiche Revisionen durchgeführt, die langfristig geplant sind. Daneben findet einmal pro Woche eine Reparaturschicht statt. Dabei werden Verschleißteile entsprechend ihrer Lebensdauer ausgetauscht. Das Personal der Reparaturschicht unterscheidet sich von dem der Produktionsschicht, und der Rhythmus der Reparaturschicht ist mit den arbeitszeitrechtlichen Bestimmungen bzgl. freier Tage der Produktionsschicht abgestimmt. Fremdfirmen werden in die Reparatur einbezogen, und Material muss beschafft werden.

## 2.6 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Fälle dargestellt und Beispiele des technischen Flexibilitätspotentials von Elektrostahlwerken beschrieben. Die vielfältigen Diskussionen mit Vertretern der Unternehmen haben gezeigt, dass es trotz ähnlicher Technik des Elektrolichtbogenofens grundsätzliche Unterschiede im technischen Flexibilitätspotential bzw. der Kapazität der jeweiligen Standorte gibt. Dies ergibt sich vor allem aus folgenden Aspekten und Details der jeweiligen Werksstruktur:

- **Produktionsleistung des Elektrolichtbogenofens:** Sie ist meist nicht steigerungsfähig, um z.B. eine Flexibilisierung durch Mehr-/Minderleistung auszugleichen.
- **Gießkapazität:** Sie ist häufig ein Flaschenhals in der Prozessfolge.

Der im EAF geschmolzene heiße Stahl wird nach Fertigstellung einer Charge im Pfannenofen sekundär-metallurgisch aufbereitet und dann vergossen. Der Guss erfolgt in Deutschland im Wesentlichen im Stranggussverfahren. Blockguss, der überwiegend für Schmiedeprodukte Anwendung findet, spielt eine geringere Rolle. Der Betrieb der Stranggussanlage stellt eine wesentliche Rahmenbedingung für den EAF dar, da diese kontinuierlich mit Stahlschmelzen beschickt werden muss. Unterbleibt die kontinuierliche Beschickung, muss die Stranggießanlage abgestellt werden, was einen erheblichen Störfall darstellt. In diesem Fall ist der Verteiler verloren und muss zeitintensiv neu ausgemauert werden. Die Gießleistung der Einzelanlage kann meist nicht verändert werden. Eine geringfügige Erhöhung der Gießleistung kann aber in einzelnen wenigen Werken z.B. durch parallelen Blockguss erzielt werden.

Diese o.g. Unterschiede der einzelnen Standorte sowie (z.B. auslastungsbedingte) Unterschiede bei der innerbetrieblichen Organisation führen zu typischen Fällen der Werks- und Betriebsstruktur, die nachfolgend beschrieben werden. Aus dieser Fallunterscheidung lässt sich allerdings noch keine kumulierte, branchenweite Hochrechnung ableiten, da hierfür weitere Daten der Einzelunternehmen erforderlich sind. Diese Daten liegen gegenwärtig aber (noch) nicht vor. Eine Hochrechnung für die Gesamtbranche ist deshalb erst nach einer weiteren Datenerhebung möglich.

### 2.6.1 TECHNISCHE FLEXIBILITÄT DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Zur Ermittlung des technischen Flexibilitätspotentials von Elektrostahlwerken wurden neben dem Prozess- und Lastverlauf des Elektrolichtbogenofens auch sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen des Betriebs und der vor- und nachgelagerten Prozesse herangezogen. Eine wesentliche Randbedingung der gesamten Betrachtung war die Einhaltung sämtlicher Lieferverpflichtungen der Stahlwerke.

Das Flexibilisierungspotential eines Lichtbogenofens wird anhand eines Lastgangs während eines Schmelzzyklus (Tap to tap-Zeit) deutlich (s. Abbildung 2.11). Die Schaffung eines Flexibilisierungspotentials durch eine Variation der Lichtbogenleistung während eines Schmelzzyklus ist grundsätzlich nur in Form einer Leistungsreduzierung möglich, da der Ofen aus Effizienzgründen jeweils mit maximaler, dem Prozess angepasster Leistung gefahren wird.

Außerdem kann der Arbeitspunkt des Elektrolichtbogenofens nicht beliebig gewählt werden, da das Aggregat bei einem ungünstigen Arbeitspunkt eventuell beschädigt werden könnte und ein ungünstiger Arbeitspunkt zu Kurzschlüssen und einem Energiemehrverbrauch sowie zu einem Elektrodenbruch, d.h. zu Produktionsausfall führen kann.

Der Elektrolichtbogenofen bietet ausschließlich ein Flexibilisierungspotential zur Lastabsenkung durch Unterbrechen des Prozesses, d.h. Ausschalten des Lichtbogens. Eine Unterbrechung/Ausschalten des Lichtbogens ist nur in der Aufschmelzphase möglich und darf nicht zum Ende der Chargenzeit erfolgen. Eine Unterbrechung erfolgt ebenfalls beim Chargieren von neuem Schrott in den Elektrolichtbogenofen. Dieser Betriebspunkt ermöglicht eine Bereitstellung eines Flexibilitätspotentials durch Verlängerung der Ausschaltzeiten und kurzzeitiger Verschiebung der Zykluszeit.

Die möglichen Flexibilisierungspotentiale werden oft durch spezielle produktabhängige Verfahrensweisen begrenzt, da es z.B. beim Warmfahren von flüssigem Stahl durch Zusammenfallen der Schaumschlacke zu prozessbedingten Störungen kommen kann. Weiterhin führen zunehmende Stillstandzeiten zu stofflichen Verunreinigungen der Stahlprodukte, bedingt durch Korrosionsprozesse der Feuerfestauskleidung. Auch ein Nachholen der Produktion mit erhöhter Leistung ist bei Elektrostahlwerken meist nicht möglich, da der Ofen nicht mit Überlast betrieben werden kann.

Aufgrund der Verkettung der Aggregate sind Schmelz- und Gießprozess gemeinsam zu betrachten.

## 2.6.2 TECHNISCHE FLEXIBILITÄT DER PROZESSROUTE -STRANGGUSS

Für die Elektro-Stahlwerke, die die Schmelzen im Strangguss vergießen, ist der Strangguss der wesentliche limitierende Faktor in der Elektrostahlroute, da aus wirtschaftlichen Gründen ein kontinuierlicher Stranggussprozess zu gewährleisten ist und der Elektrolichtbogenofen die erforderliche Produktionsmenge jederzeit zur Verfügung stellen muss. Da der Elektrolichtbogenofen aufgrund der Anlagenauslegung eine geringfügig höhere Kapazität als der Strangguss besitzt, kann dies i. d. R. gewährleistet werden. Bei einer derartigen Auslegung kann über einen längeren Produktionszeitraum (z.B. eine Schicht) im Ergebnis auch eine Pufferzeit aufgebaut werden, die dann z.B. zur Behebung kurzfristiger Störungen im Betriebsablauf zur Verfügung steht.

Bei idealen, d.h. störungsfreiem, Betrieb der Elektrostahlroute kann trotz hoher Auslastung bei dieser Anlagenkonfiguration ein Flexibilitätsfenster erarbeitet werden das heißt, es ließe sich ggf. Flexibilität auf dem Regelenergiemarkt vermarkten. Am Beispiel eines Stahlwerkes konnte bei einer störungsfreien Schicht von 8 Stunden ein Flexibilitätsfenster von 20 Minuten aufgebaut werden.

### 2.6.3 TECHNISCHE FLEXIBILITÄT DER PROZESSROUTE – STRANGGUSS UND BLOCKGUSS

Einzelne wenige Stahlwerke verfügen neben der Stranggussproduktion auch über eine Blockgussproduktion. In diesen Werken kann der im Elektrolichtbogenofen erzeugte Flüssigstahl bei Engpässen der Stranggussproduktion zum Teil auch als Blockguss vergossen werden. Dadurch lässt sich die vorhandene Kapazität des Elektrolichtbogenofens vollständig ausnutzen. Es besteht in diesem Fall im Produktionsprozess nicht mehr die Möglichkeit zum Aufbau eines Flexibilitätsfensters und aktiven Teilnahme am Regelenergiemarkt.

### 2.6.4 PROZESSROUTE – TIMESHIFT-MODELL

#### MIT LEISTUNGSÄNDERUNG DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Ein norddeutsches Unternehmen erprobt gegenwärtig im Rahmen des Großprojekts Norddeutsche Energiewende NEW 4.0 ein neues Konzept zur Flexibilisierung elektrischer Lasten [10]. Das Unternehmen testet im Projekt „Timeshift“ eine Leistungserhöhung des Elektrolichtbogenofens um rd. 12 MW, um entsprechend dem regionalen Bedarf die Produktionsleistung von dem Hochlastzeitfenster am Tage in das Niedriglastzeitfenster (nachts) zu verschieben. Die Produktionsleistung des Elektrolichtbogenofens kann in der Nacht erhöht und am Tage gedrosselt werden.

Abbildung 2.15 zeigt die prinzipiellen Änderungen der Schmelzleistung eines Elektrolichtbogenofens bei Verschiebung der Produktion entsprechend dem Timeshift-Konzept.

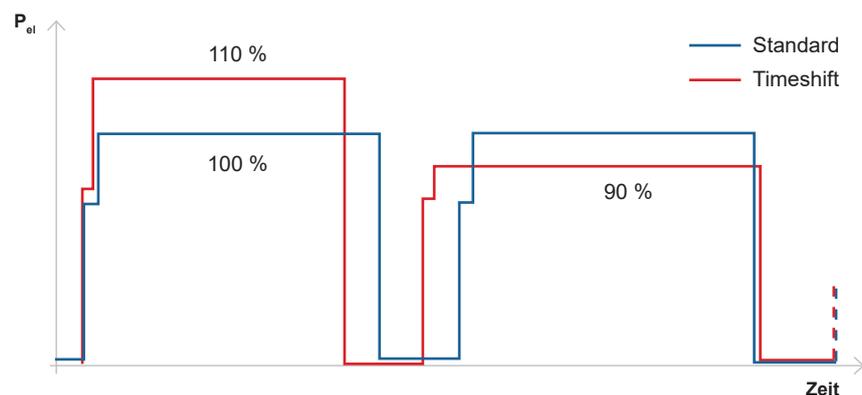


Abbildung 2.15: Schmelzleistung des EAF beim Timeshift-Konzept [11]

Dieses Konzept setzt voraus, dass an dem jeweiligen Standort auch die technischen und genehmigungsrechtlichen Voraussetzungen für eine derartige Leistungsverschiebung gegeben sind oder geschaffen werden.

### OHNE LEISTUNGSÄNDERUNG DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

An einigen, unvollständig ausgelasteten Standorten stehen ggf. zusätzlich belegbare Produktionsschichten zur Verfügung. Dort ließe sich möglicherweise eine Flexibilität allein durch Verschiebung der Produktionszeit mit Nachholung des nicht produzierten Anteils in anderen Zeiträumen realisieren. Dieses Konzept ist aber nur dann umsetzbar, wenn in diesem Fall auch die Mitarbeiter in ihrer Arbeitszeitplanung derart flexibel reagieren können und die Prozesskette mit der integrierten Lagerung von Zwischenprodukten dies zulässt. Die Mitarbeiter hätten in diesem Fall nach angemessener Vorankündigung ihre Arbeitszeiten zu verschieben und müssten dies vor allem mit ihrem persönlichen Schichtrythmus verbinden können.

## 2.6.5 QUANTITATIVE BESTIMMUNG DES THEORETISCHEN UND TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALS

Bei einer Berechnung des technischen Flexibilitätspotentials ist zwischen zwei Flexibilitätsgrößen zu unterscheiden zwischen:

- der Flex-Leistung  $P_{\text{Flex}}$  = bereitgestellte, abschaltbare Wirkleistung [kW]
- und der Flex-Arbeit  $E_{\text{Flex}}$  = tatsächlich pro Jahr abgerufene Arbeit [kWh]

Die Berechnung dieser Größen erfolgt für Elektrolichtbogenöfen auf folgender Grundlage:

- Die installierte elektrische Leistung  $P_{\text{Inst.}}$ , d.h. das theoretische Flexibilitätspotential, charakterisiert die technische Auslegung und Dimension eines Elektrolichtbogenofens. Sie beträgt für Anlagen in Deutschland zwischen 30 und 150 MVA. Die kumulierte installierte elektrische Leistung der 26 Elektrolichtbogenöfen in Deutschland mit einem Abstichgewicht  $\geq 35$  t beträgt ca.  $P_{\text{Inst.}} = 2.046$  MVA.
- Es wird ein **Leistungsfaktor**  $\epsilon$  definiert als Verhältnis der mittleren Schmelzleistung eines Lichtbogenofens im power-on-Betrieb  $P_{\text{Schm}}$  zu der installierten Leistung  $P_{\text{Inst.}}$ .

$$\text{Leistungsfaktor: } \epsilon = \frac{P_{\text{Schm.}}}{P_{\text{Inst.}}} = \frac{\text{mittlere Leistung im power-on-Betrieb}}{\text{Installierte Leistung}}$$

Die Auswertung von Betriebsdaten eines Elektrolichtbogenofens ergab in einem Unternehmen einen Jahresmittelwert von  $\epsilon = 72$  %. Es ist anzunehmen, dass andere Elektrolichtbogenöfen ähnlich arbeiten und dass bei optimierter Regelungstechnik evtl. ein Wert bis  $\epsilon = 80$  % erreicht werden kann. Der Faktor kennzeichnet die Höhe der im Mittel abschaltbaren Leistung.

- Es wird der Anteil  $\tau$  der power-on-Betriebszeit an der Kalenderzeit definiert:

$$\tau = \frac{\text{power-on-Betriebszeit des EAF pro Jahr [Std.]}}{\text{Gesamte Kalenderzeit [Std.]}}$$

Dieser Wert wurde für einen EAF eines voll ausgelasteten Unternehmens mit  $\tau = 52\%$  bestimmt.

- Betrachtet man die 26 in Deutschland betriebenen Lichtbogenöfen mit einem Abstichgewicht  $\geq 35$  t, so ist nicht ihre gesamte installierte Leistung in Höhe von  $P_{\text{Inst.}} = 2.046$  MVA zeitgleich am Netz in Betrieb. Vielmehr ergibt sich die tatsächlich im (Jahres)-Mittel schaltbare Leistung  $\sum P_{\text{Flex}}$  aller zeitgleich im power-on-modus betriebenen Elektrolichtbogenöfen zu:

$$\sum P_{\text{Flex}} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Flex}, i} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Inst.}, i} * \epsilon_i * \tau_i$$

- Es wird ein Flexibilitätsfaktor  $\zeta$  zur Lastverschiebung definiert als Zeitanteil der betrieblich maximal bereitstellbaren Flexibilitätsdauer für eine kurzzeitige Abschaltung der Leistung auf Anforderung:

$$\zeta = \frac{\text{maximal nutzbare Flexibilitätsdauer pro Schicht [min]}}{\text{Betriebszeit einer Produktionsschicht [min]}}$$

Flexibilität wird als Lastverschiebung ohne Produktionsausfall verstanden. D.h. die fehlende Leistung ist in anderen unkritischen Zeiten nachzuholen. In diesem Wert sind auch vorgegebene Kapazitäts-Einschränkungen aufgrund der Technik und Produktionsstruktur unterschiedlicher Standorte zu berücksichtigen.

Deshalb sind aus heutiger Sicht zumindest folgende Fälle für  $\zeta$  zu unterscheiden:

**Fall A:** In einem voll ausgelasteten Werk mit einer Stranggussanlage wurde der Flexibilitätsfaktor des EAF bestimmt zu:

$$\zeta_A = 20 \text{ min} : 8 \text{ h} = 4\%$$

**Fall B:** In einem voll ausgelastetem Werk mit Strangguss- und Blockgussanlage war keine Flexibilität des EAF vorhanden, d.h.

$$\zeta_B = 0\%$$

**Fall C:** Ein Werk, das in der Lage ist, seine Produktionsleistung kurzzeitig um z.B. +/- 10% zu erhöhen:

$$\zeta_C = +/- 10\%$$

**Fall D:** Ein nicht ausgelastetes Werk, das in der Lage ist, statt 2 Schichten zeitweise 3 bzw. nur 1 Schicht zu produzieren:

$$\zeta_D = +/- 50\%$$

Nur in den Fällen C und D könnte neben einer Abschaltung ggf. auch eine Zuschaltung von zusätzlicher Leistung des EAF auf mittel- bzw. langfristige Anforderung ermöglicht werden. In diesen Fällen kann somit Flexibilität in beide Richtungen erzeugt werden.

- Es wird eine **Wahrscheinlichkeit  $\beta$**  der Beteiligung des einzelnen Unternehmens an der Flexibilitätsbereitstellung geschätzt. Dieser Faktor berücksichtigt Hemmnisse, die aus der Situation des Einzelfalls oder dem Prozessstatus zum Zeitpunkt des Flexibilitätsabrufes entstehen. Er kennzeichnet den Umfang der tatsächlich kurz vor Abruf bereitgestellten Flexibilität. Im ersten Ansatz wird geschätzt, dass  $\beta = 50\%$  beträgt.
- Es wird ein **Abrufanteil  $\mu$**  als das Verhältnis der tatsächlich in Anspruch genommenen Abrufdauer zu der maximal bereitgestellten Abrufdauer definiert:

$$\mu = \frac{\text{in Anspruch genommene (abgerufene) Flexibilitätsdauer pro Jahr [Std.]}}{\text{bereitgestellte Flexibilitätsdauer pro Jahr [Std.]}}$$

Dieser Wert berücksichtigt den Unterschied zwischen der kumuliert in einer längeren Periode bereitgestellten Flexibilitätsdauer und der tatsächlich in dieser Periode in Anspruch genommenen (abgerufenen) Flexibilität. Der Faktor bildet eine wesentliche Grundlage, um die zu erwartende Auswirkung einer Flexibilitätsbereitstellung beurteilen zu können. Er muss aus betrieblichen Gründen begrenzt werden und ist deshalb in den Anforderungsprofilen (s. Kapitel 1) zu ergänzen.

Mit den o.g. Größen kann das technische Flexibilitätspotential als Flex-Leistung der 26 Elektrolichtbogenöfen mit einem Abstichgewicht  $\geq 35$  t in Deutschland abgeschätzt werden:

$$\text{a) } \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Flex}, i} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Inst}, i} \cdot \epsilon_i \cdot \tau_i = 2.046 \text{ MW} \cdot 72\% \cdot 52\% = 766 \text{ MW}$$

Dieser Wert ergibt sich ebenfalls als mittlere Last, berechnet aus dem statistisch erfassten Jahresstromverbrauch der Elektrostahlwerke in Höhe von 6.633 Mio kWh in 2016 bezogen auf 8.760 Stunden [15].

$$\text{b) } \sum_{i=1}^{i=26} E_{\text{Flex}, i} = \sum_{i=1}^{i=26} P_{\text{Inst}, i} \cdot \epsilon_i \cdot \tau_i \cdot 8760 \text{ h} \cdot \zeta_i \cdot \beta_i \cdot \mu_i$$

= ...(Einzelwerte sind noch zu ermitteln)

Sie kann jedoch erst ermittelt werden, wenn alle Hemmnisse je Werk bekannt sind und bestimmt wurden. Die tatsächlich abgerufene Flex-Arbeit ist schließlich das Ergebnis der möglichen Energieflüsse und Flexibilitätsbeiträge aller Marktteilnehmer.

## 2.7 ERFÜLLBARKEIT DER ANFORDERUNGSPROFILE

### 2.7.1 ANFORDERUNGSPROFIL 1 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

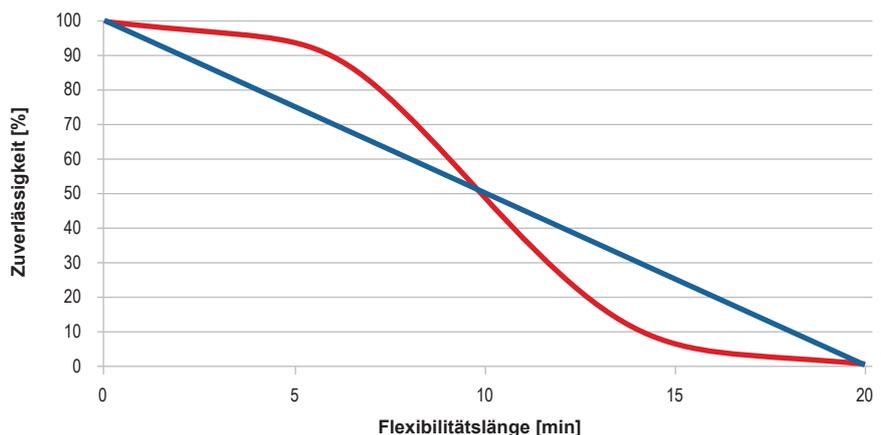
Eine temporär erhöhte Leistungsaufnahme (negative Regelleistung) ist nicht möglich, da der Prozess zu power-on Zeiten auf maximaler Last läuft, und der EAF während power-off Zeiten nicht kurzfristig aktiviert werden kann. Eine positive Regelleistung durch Unterbrechung des Prozesses bzw. durch kurzes Abschalten des EAF ist in der ersten Hälfte der Chargenzeit während des Aufschmelzens oder durch Verschieben des Beginns der nächsten Charge aus technischer Sicht möglich. Jedoch kann die in Anforderungsprofil 1 vorgesehene Vorankündigungszeit von 15 min nicht immer gewährleistet werden, da die aktuelle Charge in der zweiten Hälfte der Chargenzeit fertig gestellt werden muss und nicht mehr unterbrochen werden darf, d.h die Ankündigungszeiten zu kurz sind. Eine Entscheidung über eine Unterbrechung der Leistungsaufnahme muss demnach von Fall zu Fall kurzfristig vom Betriebsleiter vor Ort getroffen werden.

Ein Nachholen der durch temporär verringerte Leistungsaufnahme verzögerten Produktion durch im Nachgang erhöhte Leistungsaufnahme ist nicht möglich (s.o.). Die (akkumulierten) Verzögerungen der Produktion durch (regelmäßige) Flexibilitätsmaßnahmen müssten demnach im Rahmen des zeitlichen Puffers (= Flexibilitätslänge) der Stranggussanlage bleiben und in die Arbeitsplanung einbezogen werden.

Bei Betrieb des Elektrolichtbogenofens mit einer Stranggussanlage ohne Blockguss kann der bei störungsfreiem Ablauf entstehende zeitliche Puffer auch ohne weitere organisatorische Anpassungen für Flexibilitätsmaßnahmen genutzt werden. Der zeitliche Puffer ergibt sich aber individuell aus den technischen Rahmenbedingungen und Auslastung des einzelnen Werks und seiner Produktionsaggregate (Überkapazität des EAF gegenüber dem Strangguss) und wird primär für die Behebung produktionsseitiger Störfälle vorgehalten. Die Flexibilität wird durch Störungen vermindert.

Die Zulässigkeit der abgerufenen Flexibilitätslänge nimmt mit abnehmender Abrufdauer zu. Der Verlauf dieses Zusammenhangs ist in Abbildung 2.16 mit zwei Beispielen möglicher Verlaufskurven dargestellt.

Abbildung 2.16: Zulässigkeit der Flexibilisierungsmaßnahme über die flexibilisierbare Vorlaufzeit



## 2.7.2 ANFORDERUNGSPROFIL 2 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Ein Elektrolichtbogenofen kann aus technischer Sicht prinzipiell für mehrere Stunden abgeschaltet werden, ohne dass er Schaden nimmt. In diesem Fall würde jedoch auch der Betrieb einer Stranggussanlage zum Stillstand kommen und unterbrochen. Der Abbruch des Stranggusses stellt eine erhebliche Störung dar und ist mit erheblichen Kosten für das Wiederanfahren verbunden.

Ein mehrstündiges Abschalten des Elektrolichtbogenofens bewirkt einen Produktionsverlust, da im Nachgang die Produktion nicht durch erhöhte Leistungsaufnahme nachgeholt und ausgeglichen werden kann. Auch mit Blick auf die innerbetriebliche Organisation und die Priorität der Einhaltung von Lieferfristen ist das Anforderungsprofil wie im Folgenden dargelegt, daher (derzeit) nicht umsetzbar.

Für den Fall hoher Auslastung ohne geplante Stillstandzeiten wäre durch Produktionsverzögerungen um mehrere Stunden die Einhaltung von Lieferterminen gefährdet – insbesondere falls diese Stillstände wiederholt auftreten. Liefertermine stehen bereits mehrere Wochen im Vorfeld fest, und die Produktion ist in diesem Zeitraum auf die volle Kapazität ausgelegt und eng durchgeplant. Für eine Flexibilisierung der Produktion gemäß Anforderungsprofil 2 müssten aufgrund der mit einer zeitweise reduzierten Leistungsaufnahme einhergehenden Produktionsverzögerung Lieferfristen länger oder flexibler kalkuliert und die Akzeptanz bei Kunden für solchermaßen veränderte Lieferfristen vorab evaluiert werden.

Für Zeiten einer vergleichsweise geringen Auslastung, in denen beim derzeitigen Organisationsmodus Stillstandzeiten zeitlich über mehrere Tage oder in einem Schichtsystem mit ungenutzten Produktionsschichten gebündelt sind, müsste dieses Organisationsmodell zur Erfüllung von Anforderungsprofil 2 durch flexibel durchgeführte Stillstände mit einer veränderlichen Dauer abgelöst werden. Dabei gibt es verschiedene wirtschaftliche und organisatorische Hemmnisse, die im Einzelfall zu analysieren sind. Die organisatorische Umsetzung eines solchen Stillstandes erfordert einen erheblichem Vorlauf.

In jedem Fall werfen die Auftrags- und Personaleinsatzplanung bei stundenweise flexibel durchgeführten Stillständen erhebliche Probleme auf. Die fehlenden Chargen aus dem Elektrolichtbogenofen würden sich in sämtlichen nachgelagerten Verarbeitungsschritten niederschlagen. Dies aufzufangen würde eine adaptive Planung erfordern, um Stillstand- und Betriebszeiten in nachgelagerten Produktionsschritten (Walzwerk, usw.) an die flexible Produktion des Elektrolichtbogenofen anzupassen, und Betriebszeiten mit geringer Auslastung zu minimieren. Nicht zuletzt wäre, um die Produktionszeiten mit einem Tag Vorlauf flexibel auf Strompreise des Folgetages anzupassen, eine deutliche Flexibilisierung der betrieblich vereinbarten Arbeitszeitregelungen nötig. Inwiefern dies mit dem geltenden Arbeitsrecht vereinbar wäre, wäre zu untersuchen. Es wäre zudem abzuwägen, wie sich die zu erwartenden reduzierten Kosten aufgrund der flexiblen Produktionsweise im Vergleich zu den damit verbundenen Belastungen der Belegschaft darstellen würden. Um Flexibilität im Sinne von Anforderungsprofil 2 bereitzustellen, wäre ent-

sprechend eine strategische längerfristige Ausrichtung eines Betriebs auf einen geeigneten Organisationsmodus für Zeiten vergleichsweise geringer Auslastung erforderlich. Die Sinnhaftigkeit bzw. die Wirtschaftlichkeit für das Unternehmen ist fraglich und im Einzelfall vor Ort genau zu prüfen. Die einhergehende Unterbrechung des Stranggussprozesses ist in jedem Fall mit erheblichen Mehrkosten verbunden.

Für die Durchführung geplanter Reparaturen ist zu beachten, dass sie eine präzise Personalplanung erfordern und Reparaturmaterial und Montage-Hilfsmittel unter Einbezug von Fremdfirmen genau terminiert werden müssen. Deshalb sind Verschiebungen von größeren Reparaturen nicht flexibel mit nur einem Tag Vorlauf im Sinne von Anforderungsprofil 2 möglich.

### 2.7.3 ANFORDERUNGSPROFIL 3 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Aus rein technischer Sicht ist ein mehrtägiger Stillstand des Elektrolichtbogenofens, wie in Anforderungsprofil 3 vorgesehen, möglich, bedarf aber einer langen Planungsfrist.

In Zeiten hoher Auslastung wäre ein mehrtägiger Stillstand jedoch mit einem hohen, nicht nachholbaren Produktionsverlust und damit einhergehenden Verletzungen von Lieferverpflichtungen verbunden. Solch ein Szenario ist aus Sicht der Branche nicht akzeptabel, und war entsprechend auch nicht Teil der vertieften Analyse. In Zeiten vergleichsweise geringer Auslastung werden mehrtägige Stillstandzeiten derzeit bereits geplant und durchgeführt. Die (derzeit) benötigten Vorlaufzeiten bzgl. Auftrags- und Personaleinsatzplanung für diese mehrtägigen Stillstandzeiten sind jedoch deutlich länger (mehrere Wochen), als im Anforderungsprofil vorgesehen (2–5 Tage). Das Anforderungsprofil kann daher nicht erfüllt werden.

## 2.8 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Bei einem flexibel betriebenen Elektrolichtbogenofen sind mögliche Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität zu erwarten, z. B. durch Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs, durch Beeinträchtigung der Produktqualität, durch Änderung der Netz-Inanspruchnahme und des Netzentgelts sowie durch Auswirkungen auf die Standzeit von verschleißenden Anlagenkomponenten.

Aus Gründen der Energieeffizienz wird angestrebt, den Elektrolichtbogen auf hohem Leistungsniveau mit möglichst wenigen Unterbrechungen zu betreiben, da eine Reduzierung der Produktionsleistung zu spezifisch höheren Energieverlusten der Anlage führt. Bei einer zu niedrigen Einschmelzleistung besteht auch die Gefahr, dass sich ggf. Kavernen bilden können, die das Nachrutschen von noch nicht aufgeschmolzenem Schrott blockieren könnten. Das könnte ggf. einen Elektrodenbruch mit Produktionsausfall zur Folge haben.

Jede zusätzlich durch Flexibilitätsabruf erzeugte Betriebsunterbrechung bedeutet außerdem, dass die Anlage in der Unterbrechungszeit zusätzlich abkühlt und folglich wieder aufgeheizt werden muss. Dieser Vorgang führt somit zu einem erhöhten Energieverlust und zu geringerer Energieeffizienz. Geht man beispielsweise für einen 100 t-Elektrolichtbogenofen von einer Energiebilanz entsprechend Abbildung 2.13 aus, so werden die Energieverluste des mit Schmelze gefüllten Ofens in Höhe von ca. 22 % der Energiebilanz auch bei einem zusätzlichen Produktionsstopp weiterhin auftreten. Dies führt bei einer angenommenen Dauer des Stopps von 20 min entsprechend der nachfolgenden Beispiels zu einer Erhöhung des spez. Energiebedarfs um ca. 15 %:

### BEISPIELRECHNUNG ZUR ABSCHÄTZUNG DER EFFIZIENZ-WECHSELWIRKUNG

- Elektrolichtbogenofen mit 100 t-Gefäß,  
Energiebedarf: 800 kWh/t Rohstahl
- Tap-to-Tap-Zeit: 60 min (Schätzwert)
- Energieverlust des EAF (ohne Abgas): ca. 22 % (s. Bilanz in Abb. 2.14)<sup>1</sup>  
= 22 % \* 800 kWh/t \* 100 t / 1 h = 17,6 MW
- Energieverlust im 20 min-Stillstand:  
Abwärmeverlust: 17,6 MW \* 1/3 h = 5.867 kWh  
Erforderliche Energiezufuhr: 5.867 kWh/50 %<sup>2</sup> = 11.733 kWh pro 100 t  
= 117 kWh/t Rohstahl (15 %)

<sup>1</sup> Gefäß- und Deckelkühlung sowie Abstrahlung

<sup>2</sup> bei einem Wirkungsgrad der Wärmeübertragung auf das Nutzgut von ca. 50 %

Auch aus Qualitätsgründen sind die Energieeffizienz und die Planbarkeit der Temperaturführung für den Gesamtprozess sehr wichtig. Es können keine „Speicher“ mit flüssigem, heißen Stahl angelegt werden, da zusätzliche Haltezeiten neben den Energieverlusten des flüssigen Stahls meist auch einen zusätzlichen Feuerfestverschleiß mit Folge von Verunreinigungen im flüssigen Stahl nach sich ziehen.

Zu beachten ist ferner, dass aufgrund einer erhöhten Anzahl von Lastwechseln auch die Beanspruchung vieler Anlagenkomponenten ansteigen wird und deshalb mit zusätzlichem Verschleiß zu rechnen ist. Nicht nur Feuerfest-Materialien sondern auch andere Bauteile der Anlage benötigen bei erhöhtem Lastwechsel eine zusätzliche Wartung und Instandsetzung. Dies kann ggf. zu einer deutlichen Veränderung des Instandhaltungsbedarfs und der Verfügbarkeit der Anlage führen.

Das Flexibilisierungspotential der Stahlwerke wird zusätzlich durch die gegebene stromvertragliche Begrenzung der Leistungsabnahme (Lastbegrenzung) und die vorgelagerte Bilanzkreisbewirtschaftung eingeschränkt. Ein Überschreiten bzw. eine Erhöhung der Spitzenlast führt zu einem erhöhten Netz-Leistungspreis und damit zu erheblichen wirtschaftlichen Nachteilen. Zusätzlich können weitere Kosten aus der Bilanzkreisbewirtschaftung entstehen, wenn die tatsächliche Leistungsabnahme von der bestellten Leistung abweicht. Deshalb müssen Elektrostahlwerke im Allgemeinen ihre Lastspitzen reduzieren. Zur Optimierung und Begrenzung der jeweils im 15 min-Intervall überwachten Spitzenleistung werden entsprechende Lastbegrenzungssteuerungen eingesetzt.

Die rechtlichen Grundlagen zur Netzoptimierung sollen zukünftig weiter verbessert werden und mit den neuen Anforderungen zur Flexibilisierung in Einklang gebracht werden. Dazu wurde von der dena die neu eingerichtete Taskforce Netzentgelte [12] gegründet, in der mehrere Unternehmen der Stahlindustrie mitarbeiten.

## 2.9 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DES ELEKTROLICHTBOGENOFENS

Der Lichtbogenofen ist heute das Standardverfahren zum Recycling von Schrott. Es gibt weltweit 120 Gleichstrom-Elektrolichtbogenöfen und 1.200 Wechselstrom-Elektrolichtbogenöfen. Alternative Energieträger wie Erdgasbrenner können in der Frühphase des Schmelzprozesses eingesetzt werden, wenn der Schrott noch kalt ist. Wenn der Schrott bereits beginnt aufzuschmelzen, werden die Gasbrenner abgeschaltet und nur noch elektrisch über den Lichtbogen beheizt. Die Optimierung des flexiblen Einsatzes hybrider Beheizungsmethoden bietet somit Flexibilitätsperspektiven.

Eine zusätzliche Flexibilisierungsperspektive bieten Nebenaggregate der Elektrostahlroute, wie z.B. die Anlagen zur Sauerstofferzeugung durch Luftzerlegung. Diese Anlagen werden in der Regel von externen Firmen betrieben und fallen daher oft nicht in den Bilanzbereich des Stahlwerksbetreibers bzw. des energieintensiven Betriebs. Sie bieten oft auch die Möglichkeit zum Speichern der technischen Gase und eröffnen damit ein Potential zur Speicherung von fluktuierend erzeugter Energie.

Weitere Flexibilisierungsperspektiven bestehen in der Verwendung von alternativ erzeugten technischen Gasen wie z.B. Wasserstoff. Dieser könnte partiell den momentan verwendeten Standardbrenngasen zugemischt werden. Ferner besteht eine weitere Perspektive zur Installation von hybriden Wärmeübertragern, mit denen z.B. die Verbrennungsluft von Walzwerksöfen hybrid (d.h. mit Strom und/oder Erdgas) vorgewärmt werden könnte.

## 2.10 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland – 2016,“ Wirtschaftsvereinigung Stahl.
- [2] J. Rotering, P. von Hochberg, N. Naujuk und T. Schmidt-Brockhoff, „Die Stahlindustrie in Deutschland – Rückgrat des Industriestandorts Deutschland“, Booz & Company, 2012. Online verfügbar unter: [www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/2012-01-19\\_Die-Stahlindustrie-in-Deutschland-Kurzfassung\\_Viewpoint-fin.pdf](http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/09/2012-01-19_Die-Stahlindustrie-in-Deutschland-Kurzfassung_Viewpoint-fin.pdf)
- [3] PWC, „Stahlmarkt 2016 – Stahlmarkt 2025: Quo vadis?,“ 2016. Online verfügbar unter: [www.pwc.de/de/industrielle-produktion/assets/pwc-stahlmarkt-2016-stahlmarktprognose-2025.pdf](http://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/assets/pwc-stahlmarkt-2016-stahlmarktprognose-2025.pdf)
- [4] Roland Berger, „Think Act – Beyond mainstream: Weathering the steel crisis,“ 2016. Online verfügbar unter: [www.rolandberger.com](http://www.rolandberger.com)
- [5] A. Küster-Simic, O. Gül und P. Lauenstein, „Branchenanalyse Stahlindustrie: Entwicklungstrends und Zukunftschancen“ Hans-Böckler-Stiftung, 2017.
- [6] Stahl-Zentrum
- [7] B. Kleimt, „Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen,“ Stahlakademie, Düsseldorf, 2016.
- [8] K. Krüger, „Stahlerzeugung im Lichtbogenofen,“ MaxAicher GmbH & Co. KG, Meitingen, 2017.
- [9] F. e. a. Marchiori, „Integrated dynamic energy management for steel production,“ European Commission, RFCS, 2017.
- [10] H. Naoumis, „Flexibilisierung von Lasten in der Stahlproduktion,“ August 2017. Online verfügbar unter: <http://new4-0.erneuerbare-energien-hamburg.de/de/new-40-blog/details/flexibilisierung-von-lasten-in-der-stahl-produktion.html>
- [11] M. Weng, „Die Energieeffizienten – Flexibilität im Elektrostahlwerk,“ VIK Mitteilungen, Sonderdruck, pp. 12–13, Juni 2016.
- [12] dena, „Taskforce Netzentgelte“. Online verfügbar unter: [www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/taskforce-netzentgelte/](http://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/taskforce-netzentgelte/)
- [13] R. Apel, B. Buchholz und H. Domels, „Demand Side Integration, Lastverschiebungspotentiale in Deutschland,“ VDE, 2012.
- [14] Jellinghaus, Stahlerzeugung im Lichtbogenofen, Düsseldorf: Stahleisen Verlag, 1994.
- [15] Statistisches Jahrbuch der Stahlindustrie 2017/2018. Stahl-Zentrum, Düsseldorf 2017.



## KAPITEL 3

# BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

Bernhard Fleischmann,  
Hüttentechnische Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG),  
Offenbach am Main

Karin Arnold, Georg Holtz,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

### 3.1 EINLEITUNG

Die zu den Grundstoffindustrien zählende Glasindustrie in Deutschland wird im Branchensteckbrief (Abbildung 3.1) mit ihren schmelzenden Betrieben beschrieben bzw. mit entsprechenden Kennzahlen charakterisiert. Die Veredelung von Flachglas ist aus den statistischen Daten herausgenommen worden, da es sich dabei um völlig andere Technologien und Prozesse handelt, die mit dem Schmelzen von Glas nicht vergleichbar sind.

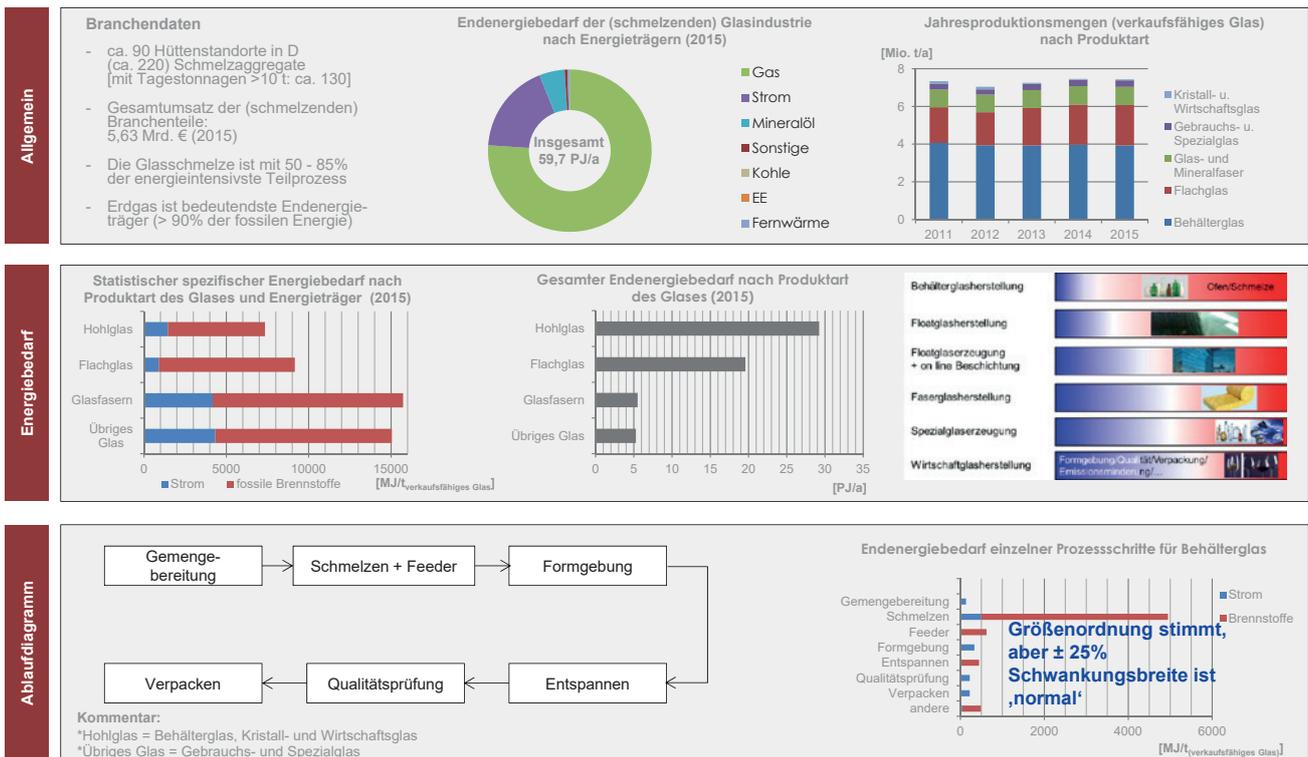
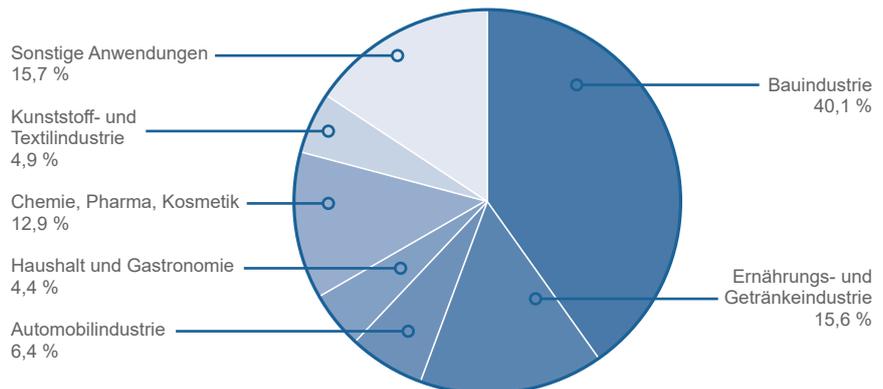


Abbildung 3.1: Branchensteckbrief Glasindustrie (Schmelzbetriebe) [2015]

Die Kunden des Grundstoffindustriezweiges der Glasherstellung, unter Berücksichtigung der Flachglasveredelung, sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Glasindustrie für viele Industriezweige wichtige Ausgangsprodukte bereitstellt.

Abbildung 3.2: Kunden des Grundstoffindustriezweiges der Glasindustrie [1]



Abweichungen sind aufgrund von Rundungsdifferenzen möglich

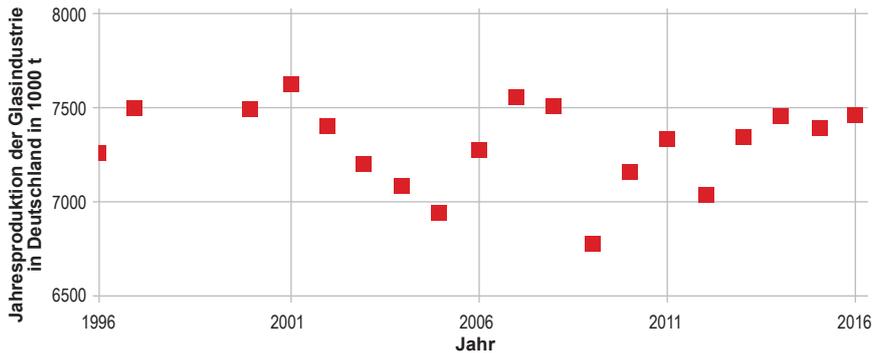


Abbildung 3.3: Jahresproduktionsmenge der Glasindustrie in Deutschland an verkaufsfähigem Glas in den letzten 20 Jahren in kt [1]

Abbildung 3.3 gibt die Jahresproduktion der Glasindustrie an verkaufsfähigem Glas in Deutschland in den letzten 20 Jahren wieder und dokumentiert die relativ stabilen Verhältnisse bezüglich der Jahrestonnage, während Abbildung 3.4 die Jahrestonnage für die einzelnen Glasbranchen beispielhaft für das Jahr 2016 darstellt. Die zu den Grundstoffindustrien zählende Glasindustrie in Deutschland hatte in 2016 etwas über 53.000 Beschäftigte und einen Gesamtumsatz von ca. 9,4 Mrd. EUR. Dabei betrug der Anteil der Behälterglasindustrie in 2016 am Gesamtumsatz ca. 20,5 %, während ihr Anteil an der Jahrestonnage bei 53 % lag (Abbildung 3.4).

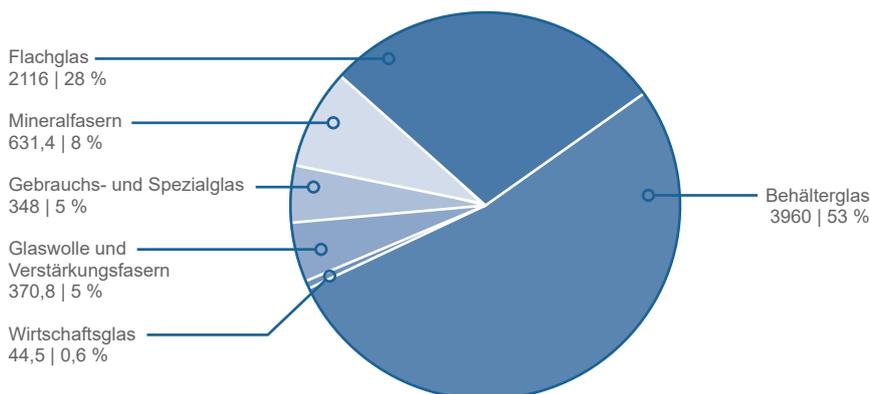


Abbildung 3.4: Jahresproduktion der Glasbranchen an verkaufsfähigem Glas in Deutschland im Jahr 2016, Menge in 1000 t [2]

## 3.2 GRUNDSÄTZLICHE PROZESSSCHRITTE

Der Produktionsablauf zur Herstellung von Glasprodukten kann in fünf grundsätzliche Schritte unterteilt werden. Diese Prozessschritte und ihre Reihenfolge gelten für alle Glasprodukte (Behälterglas, Flachglas, Faserglas, Spezial- und Gebrauchsglas). Die Glasproduktion gliedert sich dabei in

- Gemenge-/Scherbenbereitung
- Schmelze mit den Teilschritten Schmelzen, Läutern und Homogenisieren
- Formgebungsprozess (je nach Produkt und Glasart)
- Spannungsfrei/-arm Kühlen/Tempern
- Qualitätsprüfung und Verpackung, eventuell Veredelung

Als zusätzlichen Prozessschritt, der nicht direkt an die Entstehung des Produktes gekoppelt ist, beinhaltet der Herstellungsprozess von Glasprodukten wie bei allen industriellen Thermoprozessanlagen die Emissionsminderungsmaßnahmen, hauptsächlich von Verbrennungsprodukten, die bei der Schmelze entstehen.

### 3.3 GLASARTEN UND PRODUKTGRUPPEN, GLASANWENDUNGEN

Die Chemie des Glases bzw. der Glasschmelze ergibt sich vor allem aus den Anforderungen an das Glasprodukt (chemische Beständigkeit, physikalische Eigenschaften wie mechanische Festigkeit, optische Eigenschaften wie Farbe, elektrische Eigenschaften u.a.m) und den Erfordernissen des Formgebungsprozesses. Hierbei stehen die Fragen, wie die Anforderungen an die Abkühlgeschwindigkeit beim Formgebungsprozess und das Viskositäts-Temperatur-Verhalten der Schmelze aufeinander abgestimmt werden können, als entscheidende Einflussgrößen für die Glaschemie im Mittelpunkt. Aus diesen beiden Hauptanforderungen ergeben sich für unterschiedliche Anwendungen folgende typische Glasarten.

Tabelle 3.1: Typische Glasarten bzw. Glaschemie für unterschiedliche Glasprodukte

Glasanwendung/-produkt	Glasart/-chemie
Verpackungsglas/Behälterglas	Kalk-Natron-Silicatglas
Wirtschaftsglas	Kalk-Natron-Silicatglas; Kristallglas
Flach- bzw. Floatglas (Bauglas, Fahrzeugverglasung)	Kalk-Natron-Silicatglas
Verstärkungsfasern für Beton	AR-Glas (Alkali resistentes Glas)
Gläser für Elektronik und Elektrik	Kalk-Natron-Silicatglas, Erdalkali-Alumo-Silicatglas, Alkali-Bleiglas, E-Glasfaser, ...
Spezial- und Gebrauchsglas	Glaskeramik, Borosilicatglas, ...

Die Preise bzw. Kosten für Rohstoffe und die regionale Verfügbarkeit spielen ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Auswahl und Suche nach den passenden Rohstoffen. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind, wie bereits genannt, die sich aus den Rohstoffen ergebende Glaschemie eines Produktes und dessen physikalische Eigenschaften sowie die Eigenschaften der Schmelze, um die jeweiligen Formgebungs- und Prozessschritte optimal ausgestalten zu können.

### 3.4 BEDEUTUNG DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG IN DER GLASINDUSTRIE

Die Behälterglasindustrie stellt Glasverpackungen her, die hauptsächlich in der Getränke- und Lebensmittelindustrie zum Einsatz kommen oder von Arzneimittelherstellern und in der Kosmetikbranche verwendet werden.

„Die deutsche Behälterglasindustrie – das sind 12 unabhängige Unternehmen mit ca. 9.000 Beschäftigten in Deutschland. Viele der Behälter-

glashersteller sind globale Player, die nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen europäischen Ländern oder in den USA Glasverpackungen aller Art produzieren. Ein Blick auf die Produktionszahlen dieses Wirtschaftszweiges zeigt, dass die deutsche Behälterglasindustrie die größte in Europa ist.“ [3]. Abbildung 3.5 zeigt die Standorte der Behälterglashersteller in Deutschland, wobei neben den Produktionsstandorten auch Verwaltungsstandorte aufgeführt sind.

Aktuelle Erhebungen der HVG (Stand: Aug. 2017) ergeben in Deutschland etwas mehr als 220 Glasschmelzaggregate, die zur industriellen Glasherstellung genutzt werden. Dabei werden Tagedstonnagen von 100 kg bis 1.000 t in den Schmelzaggregaten erschmolzen. Bei ausschließlicher Betrachtung der Schmelzaggregate mit Tagedstonnagen größer 10 t/d reduziert sich deren Anzahl auf ca. 130 Glasschmelzwannen.

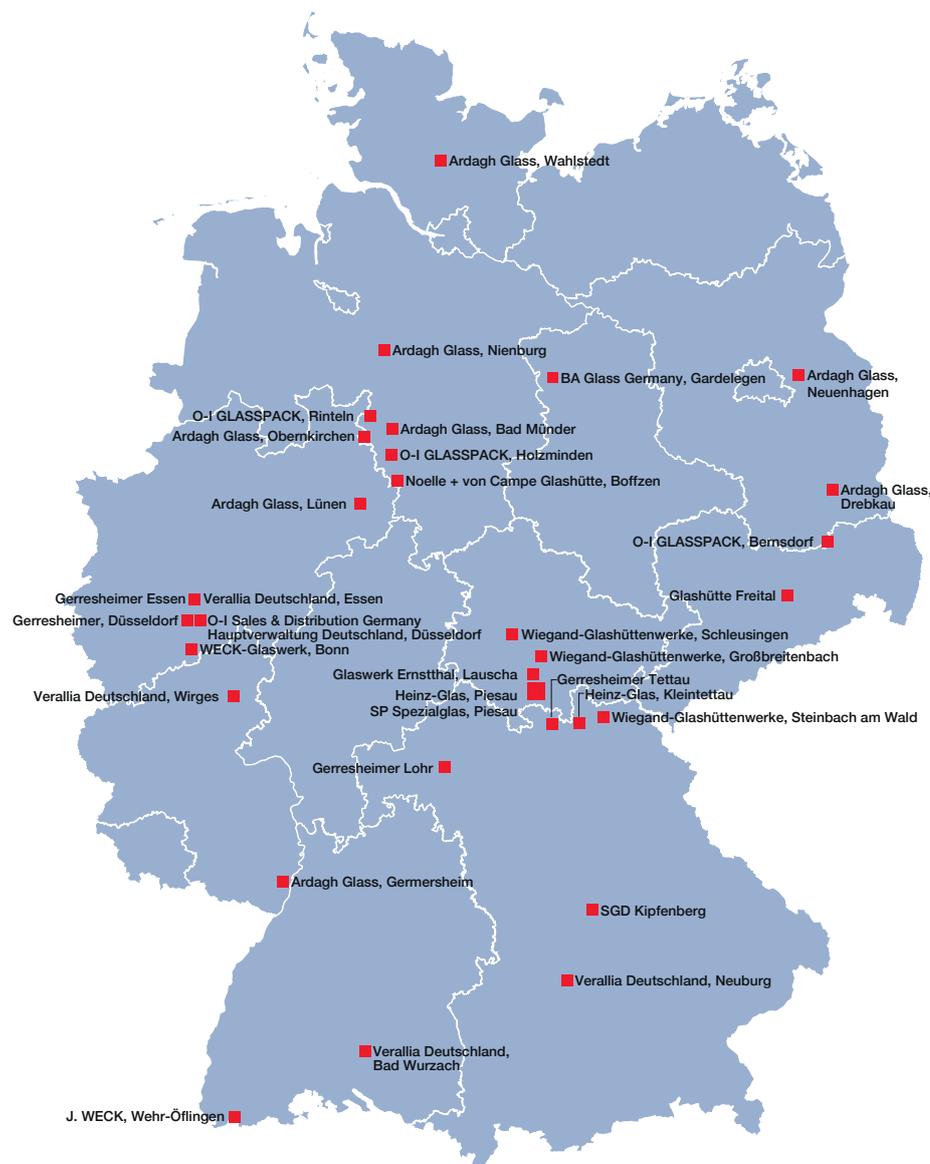
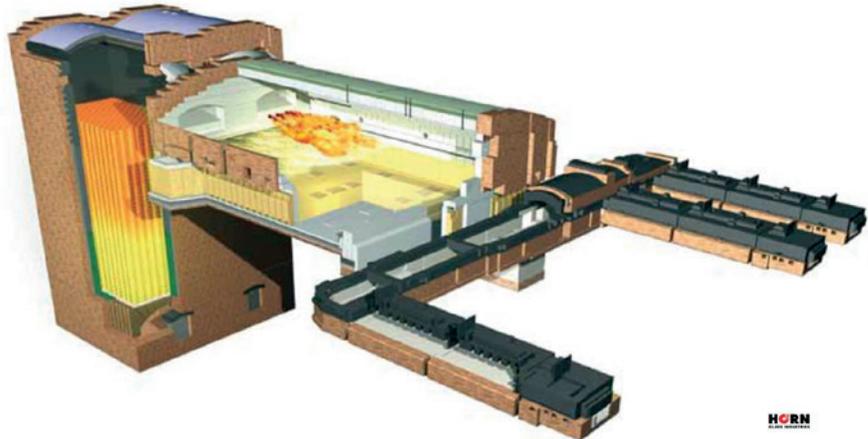


Abbildung 3.5: Behälterglashersteller in Deutschland [4]

Zur Erzeugung von Behälterglas werden in Deutschland ca. 60 Wannen genutzt. Die Mehrheit von ihnen (fast 40) sind regenerativ beheizte U-Flammenwannen (Abbildung 3.6). Dies bedeutet, dass die Verbrennungsluft in der Regel mit Hilfe von Regeneratoren auf über 1300 °C vorgewärmt wird und so die Wärme des Abgases aus der Verbrennung

Abbildung 3.6: Regenerativ beheizte U-Flammenwanne zur Schmelze von Glas [5]



wiedergewonnen und dem Prozess direkt zugeführt wird, um fossile Energieträger einzusparen und die benötigten Prozesstemperaturen zu erreichen. Zur Schmelze von Behälterglas kommen in Deutschland auch einige querbeheizte Regenerativwannen, zwei Brennstoff-Sauerstoff-beheizte Wannen (Oxy-Fuel) und einige wenige Wannen mit rekupe-rativer (Luft-)Vorwärmung zum Einsatz.

Die Beheizung der Glasschmelzwanne erfolgt z. Zt. bei ca. 90 % der Wan-nen mit Erdgas als fossilem Energieträger und zu weniger als 10 % mit Heizöl. Bei vielen Behälterglaswannen (ca. 45) ist eine sog. elektrische Zusatzheizung (EZH) installiert, die genutzt wird, im Mittel ca. 10 % (vari-abel, je nach Glassorte, installierter Leistung und aktueller Tonnage: 5 bis 15 %) der zum Schmelzen benötigten Energie elektrisch als Widerstands-heizung zuzuführen. Vor allem bei farbigen Behältergläsern und bei hohen (spezifischen) Tonnagen wird die EZH genutzt bzw. zur Erzeugung eines qualitativ hochwertigen Produktes technologisch benötigt.

### 3.5 PROZESSCHARAKTERISIERUNG

Bei der Gemengebereitung werden die mineralischen und chemischen Rohstoffe (im Wesentlichen: Sand, Soda, Kalk und Dolomit sowie Natri-umsulfat) sowie Recycling- und Eigenscherven verwogen, gemischt und bei Bedarf gemahlen, so dass nach dem Schmelzprozess die benötigte chemische Zusammensetzung an Oxidverbindungen in der Schmelze vorliegt.

Bei der Schmelze wird in einem Schmelzaggregat das Gemenge mit Hilfe geeigneter Energieträger (Brennstoffe und/oder elektrische Energie) erschmolzen und eine von Schmelzrelikten sowie Blasen befreite, chemisch homogene Schmelze erzeugt. Diese wird bei der Zuführung in entsprechenden „Kanälen“ thermisch homogenisiert und auf das für die Formgebung benötigte Temperaturniveau bzw. optimalen Viskositäts-bereich eingestellt.

Als Schmelzaggregate kommen in Deutschland vor allem mit Erdgas beheizte Wannenöfen mit regenerativer Luftvorwärmung zum Einsatz, die bei technologischem Bedarf auch mit elektrischer Zusatzheizung (EZH) ausgestattet sind und damit betrieben werden. Bei alleinigem Ein-satz von elektrischer Energie zum Schmelzen von Glas werden sog. voll-

elektrische Schmelzwannen (VES-Wannen) eingesetzt. Außerdem wird „reiner“ Sauerstoff als Oxidatormedium für Brennstoffe (Oxy-Fuel-Wannen) an Stelle von Luft und in wenigen Fällen alternative Konzepte wie Drehrohr- und Kupolöfen zum Schmelzen von Glas genutzt.

Die Formgebungsmethode ist über das Glasprodukt vorgegeben. Behälterglas wird zum größten Teil mit Hilfe von Individual-Section-Maschinen (IS-Maschinen: parallel geschaltete Formgebungseinheiten) nach einer Portionierung mit Hilfe eines Tropfenschnittes ausgeformt. Flachglas wird überwiegend als sog. Floatglas in einer Floatkammer gezogen bzw. gegossen. Bei Faserwerkstoffen (Glaswolle und -schnüre sowie -gewebe oder Isolierglasfaser) werden nach einem Zerfaserungsprozess die Fasern weiterverarbeitet. Für die Herstellung von Rohren und anderen Produkten werden spezielle Formgebungsverfahren genutzt.

Auf die Formgebung folgt eine Temperaturbehandlung in entsprechenden Kühl- bzw. Temperöfen, um die bei der Formgebung erzeugten mechanischen Spannungen und Verletzungen in der Oberfläche abzubauen bzw. auszuheilen oder eine Nachbehandlung vorzunehmen.

Nach einer Qualitätsprüfung der Glasprodukte auf Fehler aus der Schmelze oder Formgebung werden diese meist verpackt und an den Kunden ausgeliefert, veredelt oder in manchen Fällen als Halbzeug weiteren Verarbeitungsschritten zugeführt.

### 3.5.1 SCHMELZAGGREGAT

Grundsätzlich können folgende Arten von Glasschmelzaggregaten unterschieden werden:

- Hafenöfen für kleine Produktionsmengen ( $< 1$  t/d) mit zyklischer diskontinuierlicher Betriebsweise. Hafenöfen werden mit fossilen Brennstoffen oder (voll-)elektrisch beheizt.
- Wannenöfen für geringe Tagestonnagen ( $< 10$  t/d) mit fossilen Brennstoffen beheizt, meist kontinuierlich betrieben.
- Wannenöfen für Produktionsmengen zw. 10 und 1.000 t/d, mit Brennstoffen (in Deutschland vor allem Erdgas) beheizt, mit Luft als Oxidator und einer regenerativen oder rekuperativen Luftvorwärmung im kontinuierlichen Dauerbetrieb. Bei Wannen mit fast reinem Sauerstoff als Oxidator ist dessen Vorwärmung meist nicht üblich.
- Voll elektrische Schmelzwannen, bei denen die elektrische Energie direkt in der Glasschmelze durch Ohm'sche Widerstandserwärmung freigesetzt wird, und die im kontinuierlichen Betrieb gefahren werden. In Deutschland sind die bestehenden vollelektrischen Schmelzaggregate für eine maximale Tonnage von unter 10 t/d bis ca. 50 t/d ausgelegt. Die weltweit größten vollelektrisch betriebenen Wannen haben eine Tagestonnage von knapp über 200 t/d.

Das Schmelzaggreat hat anteilig einen großen, meist den größten Anteil am Energieverbrauch des Glasherstellungsprozesses. Der statistische Energiebedarf (Energieverbrauch an Endenergie pro t verkaufsfähiges Glas) zur Herstellung von Glas in Deutschland liegt seit Jahren bei ca. 2,5 kWh/kg ( $\approx 9,0$  MJ/kg) verkaufsfähiges Glas.

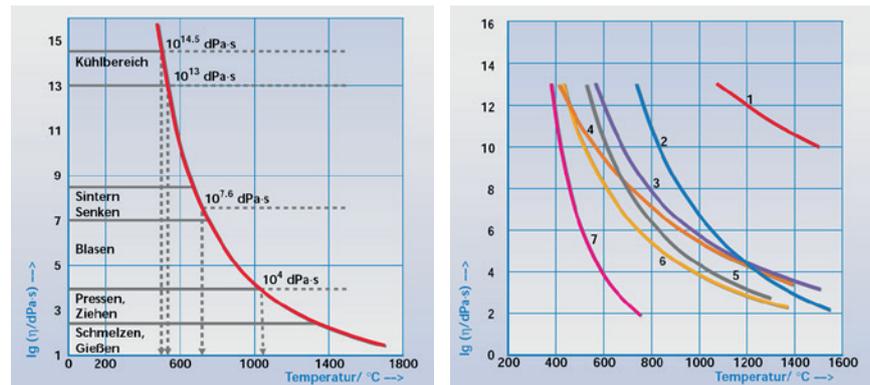
### 3.5.2 TEMPERATUR UND VISKOSITÄT

Die Temperaturen, die bei den einzelnen Prozessschritten erreicht werden müssen, um ein verkaufsfähiges Glasprodukt zu erzeugen, sind in erster Linie durch die Chemie des Glases, den Formgebungsprozess und die Qualitätsanforderungen an das Produkt vorgegeben. Je höher die zu erreichenden Temperaturen sind, desto höher ist der Bedarf an Energie. Bei thermodynamischen Betrachtungen (wie z. B. Energiebilanzen) stimmen die dabei erfassten Temperaturen an den Bilanzgrenzen (= „Übergabestellen“ zwischen den einzelnen betrachteten Prozessschritten) selten mit den prozessbedingten (Maximal-)Temperaturen überein.

Die physikalische Größe, die hier abhängig von der Glaschemie Auskunft gibt über die zu erreichenden (Prozess-)Temperaturen, ist die Viskosität der Glasschmelze. Der Zusammenhang zwischen Viskosität einer Schmelze und der Temperatur ist in Abbildung 3.7 prinzipiell aufgezeigt. Der Einfluss der Glaszusammensetzung auf die Viskositäts-Temperatur-Kurve ist in Abbildung 3.8 exemplarisch für einige typische Glasarten dargestellt.

Abbildung 3.7 (links): Viskositäts-Temperatur-Verlauf einer Glasschmelze mit Benennung typischer Viskositätsbereiche oder -punkte zur Herstellung von Glas, wobei die Temperaturabhängigkeit der Viskosität grob das Verhalten sogenannter Massengläser (Kalk-Natron-Silicatglas) wiedergibt. [6]

Abbildung 3.8 (rechts): Viskositäts-Temperatur-Verhalten bei unterschiedlicher Glaschemie. (1: Kieselglas; 2: Erdalkali-Alumino-Silicatglas; 3: Borosilicatglas A; 4: Borosilicatglas B; 5: Kalk-Natron-Silicatglas; 6: Bleiglas; 7: Lotglas) [7]



Folgende wichtige Viskositätseckpunkte und die damit verbundene Temperatur bei gegebener Glaszusammensetzung müssen erreicht werden, um die Herstellung verkaufsfähiger Produkte in möglichst kurzer Zeit und mit so geringem Energieaufwand wie möglich sicher zu stellen:

- Schmelze** Temperatur von  $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 1,5$ , um in möglichst kurzer Zeit eine blasenfreie und homogene Glasschmelze zu erhalten
- Formgebung** je nach Formgebungsprozess:
  - Tropfenschnitt bei Behälterglas bei der Temperatur von  $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3$ ;
  - Übergabe der Schmelze ans Floatbad bei Temperatur von  $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 2$  bis 2,5;
  - Glasguss beim Walzprozess: Temperatur von  $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 3,2$ ;
- Tempern** je nach Vorgehensweise beim Tempern bzw. Kühlen (Geschwindigkeit bzw. Dauer des Kühlprozesses) und je nach effektiver Produktdicke sowie abhängig von den zulässigen Restspannungen im Produkt: Temperatur von  $\log(\text{Viskosität in dPa}\cdot\text{s}) \approx 13$  bis 14,5.

### 3.5.3 SCHMELZPROZESS

Die Aufgabe des Schmelzprozesses ist es, dem Formgebungsprozess eine thermisch und chemisch homogene Schmelze, ohne kristalline oder gasförmige Einschlüsse bzw. Fremdkörper und mit einer für den Formgebungsprozess geeigneten Temperatur (besser Viskosität) zur Verfügung zu stellen.

Auf dem Weg von den Rohstoffen bis zur für den Formgebungsprozess optimalen Schmelze müssen in möglichst kurzer aber ausreichender Zeit mit möglichst geringem Energieaufwand folgende Prozessschritte durchlaufen werden:

- Erwärmen und Aufschmelzen des Gemenges
- Abgabe der Gemengegase aus carbonatischen und sulfatischen sowie sulfatischen Rohstoffen
- Auflösung schwer löslicher Gemengebestandteile (Restquarzauflösung)
- Blasenfreiheit der Schmelze bei der Formgebung sicherstellen (Läuterung)
- Sicherstellung der thermischen und chemischen Homogenität der Schmelze bei der Übergabe an den Formgebungsprozess

### 3.5.4 WANNENLAUFZEIT – KONTINUIERLICHER PRODUKTIONSPROZESS

Der Glasherstellungsprozess läuft, nach dem Anfahren (Aufheizen, Erwärmen) der Glasschmelzwanne und der Zugabe von Scherben zur ersten Füllung des Glasbades, kontinuierlich durch und sollte ohne Unterbrechung in Betrieb gehalten werden. Dies bedeutet, dass 24 Stunden am Tag, 7 Tage die Woche, 52 Wochen im Jahr und das je nach Art des Schmelzaggregates, der Glaschemie, den Anforderungen an die Produktqualität, der Fahrweise des Schmelzaggregats und des eingesetzten Feuerfestmaterials die Anlage über bis zu 15 Jahre ohne Unterbrechung der Energiezufuhr betrieben wird (sog. Wannenlaufzeit). Erst dann wird das Glasschmelzaggregat außer Betrieb genommen, es findet ein Wechsel bzw. eine Erneuerung der feuerfesten Auskleidung statt und der Produktionsprozess kommt zum Erliegen. Dies ist dann eine sogenannte Wannen(haupt)reparatur.

Ein unerwünschter bzw. ungeplanter Stillstand und Abkühlen des Schmelzaggregates oder anderer Schmelze führender Teile (mit Erstarren der Schmelze) würde zu dessen Zerstörung und zum völligen Zusammenbruch der Produktionskette führen.

### 3.5.5 ENERGIEFLUSSBILD EINER TYPISCHEN GLASSCHMELZWANNE ZUR BEHÄLTERGLASERZEUGUNG

Seit der Einführung der heutigen Glasschmelzaggregate in Deutschland vor 150 Jahren [8] durch Friedrich Siemens ist die regenerative Wärmerückgewinnung der Abwärme der Abgase zur Vorwärmung der Verbrennungsluft ein wesentlicher Bestandteil des Aggregates. Wie in Abbildung 3.9 dokumentiert, wird rund  $\frac{1}{3}$  der benötigten Energie zur Schmelze von Glas bei heutigen Behälterglaswannen durch die Wärmerückgewinnung zur Verfügung gestellt und damit der Bedarf an (meist fossilen) Energieträgern entsprechend vermindert.

Abbildung 3.9: Sankey-Diagramm des Energieflusses einer typischen Behälterglaswanne

Gesamtwirkungsgrad der Gesamtanlage nach ISO 13579-1:2013(E)

Energieströme in kWh pro t geschmolzenes Glas

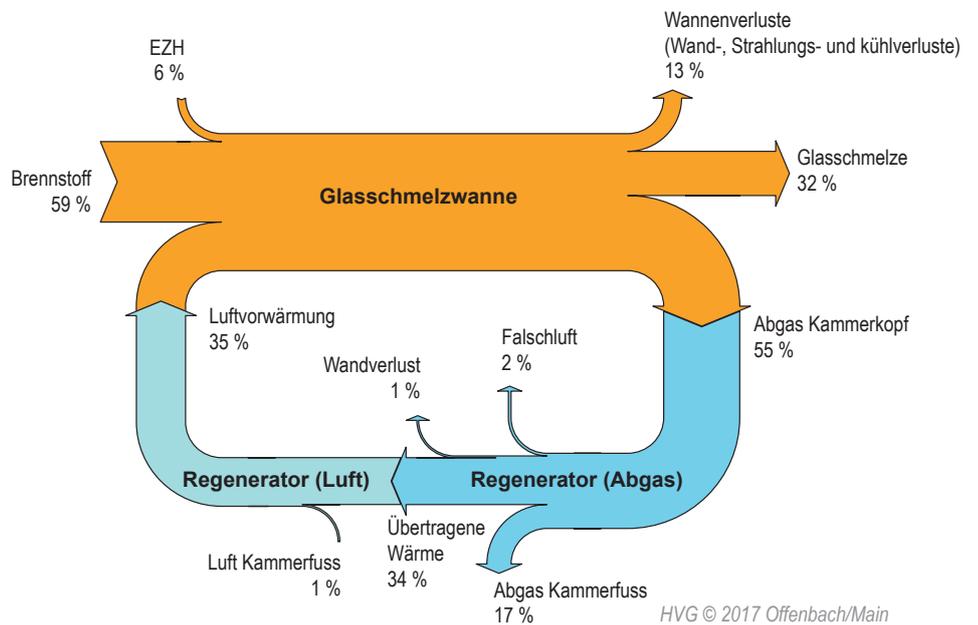
Bezugstemperatur für Energie ist 0 °C

Bezugstemperatur für Volumen ist 0 °C

Bezugsdruck für Energie und Volumen ist 1013,25 hPa

Heizwert des Brenngases berechnet nach DIN EN

ISO 6967:2005



Bemerkenswert ist auch, dass bei einem großen Teil (rund dreiviertel) der Behälterglaswannen neben dem fossilen Energieträger gleichzeitig elektrische Energie dem Schmelzaggregat zugeführt wird (im Mittel ca. 10 % der fossilen Energie). Dies ist meist dann der Fall, wenn damit die Leistung (Tonnage) der Anlage den Bedürfnissen (des Formgebungsschrittes) angepasst werden kann, wenn Farbgläser erschmolzen werden, die eine schlechteren Wärmeeintrag aus dem Verbrennungsraum in die „unteren“ Bereiche des Glasbades zeigen, und/oder wenn die Produktqualität bzw. das Alter der Anlage es verlangt.

### 3.6 METHODIK DER DATENERHEBUNG

Zur Ermittlung der grundlegenden Daten wurden von Seiten der HVG alle verfügbaren Quellen (Forschungsberichte der HVG, Jahresberichte des BV Glas, Daten des statistischen Bundesamtes, Messungen im Rahmen von Forschungsvorhaben und Messberichte der Emissionsmessstelle der HVG sowie Fortbildungsveranstaltungen der HVG und DGG) herangezogen und entsprechend aufbereitet bzw. anonymisiert.

Bei Veranstaltungen der DGG, HVG und des BV Glas wurden in persönlichen Gesprächen mit Kollegen aus der Glasindustrie Detailfragen zur Hemmnisanalyse und grundlegende Fragen zum Flexibilitätspotential besprochen sowie allgemein das Thema betreffende Fragestellungen diskutiert. Den Kollegen aus der Glasindustrie, die sich hier beteiligt bzw. engagiert haben, sei hiermit herzlichst gedankt.

Ein besonderer Dank gilt auch den Mitarbeitern der Schott AG in Mainz, die für ein Interview zur Hemmnisanalyse und Erhebung des Flexibilitätspotentials aus der Sicht eines Spezialglasherstellers und dessen Besonderheiten zur Verfügung standen.

## 3.7 FLEXIBILISIERUNG DES ANTEILS AN ELEKTRISCHER ENERGIE BEI DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

### 3.7.1 IDENTIFIKATION WESENTLICHER HEMMNISSE – METHODIK UND DATENGRUNDLAGE

Die Ermittlung der technischen Restriktionen und der Hemmnisse wurde nach der oben beschriebenen Methodik durchgeführt. Als Grundlage dienen drei Experteninterviews:

- die von DLR und FfE mit Vertretern der SCHOTT AG durchgeführte Befragung bei Beteiligung der HVG zur einführenden Erläuterung glastechnischer Grundlagen;
- das von DLR, WI, FfE und TUM mit der Hüttentechnischen Vereinigung der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG) angesetzte Gespräch zu den Grundlagen und Besonderheiten der Behälterglasherstellung;
- sowie das vom WI mit Experten des Gas- und Wärme-Instituts (GWI) in Essen geführte Interview.

Das Interview im Hause der SCHOTT AG beinhaltete die Identifikation der wesentlichen Prozesse und technischen Hemmnisse der Glaschmelze, welche im Interview mit der HVG im Detail aufgegriffen und in Bezug auf die Behälterglasindustrie detaillierter diskutiert wurden. Bei der Betrachtung der Behälterglasproduktion konnte der Schmelzprozess als Flexibilitätsoption identifiziert werden. Im HVG-Interview wurden ebenfalls nicht-technische Restriktionen für Flexibilität angeschnitten bzw. diskutiert wie beispielsweise organisatorische Rahmenbedingungen, Schicht- und Reparaturplanung. In dem GWI-Interview lag der Fokus auf einer energetischen Bilanzierung und der Funktionsweise verschiedener Brenner bzw. Verbrennungstechnologien, Abgaswärmerückgewinnungsanlagen sowie Glaswannen. Daneben wurden alternative Routen andiskutiert, wie beispielsweise der (teilweise) Ersatz von Erdgas durch Biogas als Energieträger bei der Schmelze von Glas.

## 3.7.2 MARKTUMFELD UND KUNDENBEZIEHUNGEN

### PRODUKTVIELFALT

Behältergläser zählen – zusammen mit den Wirtschaftsgläsern (z.B. Trinkgläser, Schalen, Karaffen) – zu der Gruppe der Hohlgläser, also jenen Gläsern, die aufgrund ihrer Form befüllt werden können. Als Verpackungsglas werden Behältergläser in Form von Flaschen und Konserven (insbesondere für Lebensmittel) und Flakonagen (z.B. für Parfum) oder für andere kosmetische und medizinische Artikel hergestellt, wobei die Gläser bezüglich der Zusammensetzung meist der Gruppe der Kalk-Natron-Silicatgläser zugeordnet werden können.

Wesentliche Merkmale von Glasverpackungen sind für den Anwender die Farbe (insbesondere Schattierungen von Weiß, Grün und Braun), ihre mechanische Festigkeit sowie ihre chemische Beständigkeit gegenüber dem Füllmittel (Lebensmittelechtheit). Für den Glashersteller spielen die Eigenschaften bei der Produktion (Viskositäts-Temperatur-Verhalten, Schmelz- und Läuterverhalten, Verarbeitbarkeit bzw. Verhalten bei der Formgebung) eine ausschlaggebende Rolle. Die jeweilige Glaschemie der Behältergläser ergibt sich aus der Schnittmenge dieser beiden Anforderungsprofile.

### KONJUNKTUR UND AUSLASTUNG DER BRANCHE

Die Hohlglasproduktion (Behälter- und Wirtschaftsglas) liegt seit knapp zehn Jahren mehr oder weniger konstant bei vier Millionen Tonnen pro Jahr. Kennzeichnend ist eine hohe Recyclingquote. Der Anteil an Recyclingscherben an den Eingangsstoffen liegt bei der Behälterglasherstellung bei ca. 60 bis 90 %, je nach Verfügbarkeit von qualitativ guten und farbreinen Scherben sowie der zu erzielenden Glasfarbe. Die Branche war in den letzten Jahren relativ konjunkturstabil, lediglich rund um die Weltwirtschaftskrise 2008/2009 lag die Produktion deutlich niedriger (s.a. Abbildung 3.3).

Bei den geringen Erlösen pro Stück, die mit Verpackungsglas erzielbar sind, und dem relativ hohem Raumgewicht und den damit verbundenen höheren Transportkosten ist ein weiter Weg zwischen Glashersteller und Anwender bei Verpackungsglas nicht rentabel. Auch dies begünstigt die eher lokale, über Deutschland verteilte Standortstruktur (s.a. Abbildung 3.5), bei der die Glasproduktion so nahe wie möglich am Abnehmer stattfindet.

Die „durchschnittliche“ Tonnage von Behälterglaswannen (unter Berücksichtigung der Jahresproduktion an Behälterglas und der Anzahl der Schmelzaggregate) liegt bei etwa 180 t verkaufsfähiges Behälterglas pro Anlage und Tag. Rechnet man dies auf die geschmolzene Tagestonnage um, so ergibt sich eine statistische „mittlere“ Schmelzleistung von ca. 200 t/d. Die Schmelzleistung einer Glasschmelzwanne und die Auslegung der Formgebungsmaschinen sind die kapazitätsbestimmenden Einheiten im Gesamtprozess der Behälterglasherstellung. Die Anzahl der Produktionseinheiten pro Zeiteinheit ergibt sich dann im Wesentlichen aus der Artikelgröße und dem Artikelgewicht sowie der Auslegung der Formgebungsmaschinen (Einfach-, Doppel-, Dreifach- oder Vierfachtropfen; Anzahl der parallel geschalteten Stationen einer IS-Maschine; Abkühlgeschwindigkeit der Glasmasse bei der Formgebung bis zur Formstabilität; ...).

## ZUKAUFMÖGLICHKEITEN UND LIEFERFRISTEN

Die Möglichkeit des Zukaufs von Zwischenprodukten des Herstellungsprozesses von Behälterglas zum Ausgleich von eventueller Minderproduktion auf Grund der Ausführung von Flexibilitätsmaßnahmen entfällt, da der Gesamtprozess in der Behälterglasindustrie nicht teilbar bzw. unterbrechbar ist und am Ende des Prozesses meist das Fertigprodukt (Flasche, Konservenglas, Flakon o. ä.) steht und kein Zwischenprodukt.

### 3.7.3 ORGANISATORISCHE HEMMNISSE

#### AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Wie oben beschrieben, müssen die Schmelze führenden Teile (die Glasschmelzanlage selbst sowie der nachfolgende Speiser (Feeder) ständig auf Temperatur gehalten werden. Der Herstellungsprozess von Behälterglas wird daher ununterbrochen im Dreischicht-Betrieb, 7 Tage die Woche, 365 Tage im Jahr und über 10 bis zu 18 Jahre ohne Unterbrechung gefahren. Konjunktur bzw. Jahreszeitlich bedingt und abhängig vom Produkt und der Auslegung der Formgebungsmaschine liegt die Auslastung der Prozesskette üblicherweise zwischen 80 bis 100 %.

Der Formenwechsel in den Maschinen, bedingt durch Verschleiß der Formen und/oder Produktwechsel, geschieht im Normalfall täglich, meist am Beginn der Frühschicht (6 bis 8 Uhr) und benötigt je nach Größe der Formen, Maschinen und anderer Parameter üblicherweise 30 bis 60 (90) Minuten. In dieser Zeit wird die Schmelze nicht (vollständig) gestoppt sondern meistens ein verringerter Schmelzstrom an den Maschinen vorbei in den Keller geleitet und Eigenscherben erzeugt, um die Entstehung von Glasfehlern zu verhindern bzw. vermindern.

Die Produktion wird vom Verkauf normalerweise im Voraus geplant, wobei es auch zu kurzfristigen Änderungen bzw. Anpassungen auf Grund von Lieferterminen oder Kundenwünschen kommen kann. Die Produktionsplanung für Samstag und Sonntag erfolgt mit dem Ziel einer möglichst ruhigen und störungsfreien Produktion. Die Möglichkeit zu kurzfristigen Änderungen und Anpassungen der Tonnage auf Grund von Flexibilitätsanfragen bzw. -optionen entfällt damit fast grundsätzlich im (Behälter-) Glasherstellungsprozess.

Wie oben beschrieben, werden die Glasschmelzwannen nach Inbetriebnahme im 3 x 8 Stunden-Schichtbetrieb rund um die Uhr betrieben. Während man in der Spät- und vor allem in der Nachschicht versucht, den Prozess möglichst ruhig zu fahren, um den Personalaufwand so gering wie möglich zu halten, werden die anfallenden Wartungs- und Reparaturarbeiten sowie auch der Formenwechsel so weit wie möglich in der Frühschicht durchgeführt.

#### GEPLANTE REVISIONEN

Reparatur- und Wartungsarbeiten an den die Glasschmelze führenden Bauteilen (Glasschmelzwanne, Arbeitswanne, Feeder bzw. Speiser) werden üblicherweise im laufenden Betrieb durchgeführt (sog. Heißreparaturen).

Je nach Glasart, Qualitätsanforderungen an das Glasprodukt, verwendeten Materialien beim Wannenbau, Belastung und Fahrweise der Wanne u.v.m. wird bei der Behälterglasfertigung nach 10 bis 18 Jahren eine sog. Hauptreparatur des Schmelzaggregates vorgenommen. Erst dann wird die Energiezufuhr gestoppt, das Schmelzaggregat kalt gefahren und die feuerfeste Auskleidung der Glasschmelze führenden Teile und den dazugehörigen Verbrennungsräumen erneuert.

Eine ungeplante oder geplante Abschaltung der Energiezufuhr würde nach kurzer Zeit (je nach Anlage bzw. Anlagenteil:  $\geq$  ca. 30–60 Min.) zur Abkühlung und Erstarrung der Schmelze führen und damit zum Totalausfall und Zerstörung der Schmelzanlage sowie der Feeder.

### 3.7.4 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL UND HEMMNISSE DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

#### PROZESSBESCHREIBUNG

Basisdaten der Behälterglasindustrie und eine detaillierte Prozessbeschreibung sind den Kapiteln 3.4 und 3.5 zu entnehmen. Die Produktentnahme (geschmolzene Tonnage) wird normalerweise konjunktur- und produktbedingt im Auslastungsbereich von 80 bis 100 % der maximalen Tonnage schwanken, wobei die Auslegung der Schmelzaggregate bezüglich der energetischen Optimierung meist für eine Auslastung von 80 bis 90 % optimal ausgelegt sind.

Zum Schmelzen wird als Energieträger überwiegend Erdgas eingesetzt und zu kleinen Anteilen zusätzlich auch Strom als Energieträger genutzt. Dieser wird mittels sog. EZH, im Englischen auch „electric boosting“ genannt, ortsspezifisch in die Wanne eingebracht. Der Einsatz der elektrischen Energie hängt u.a. von der Glasart und der Glasfarbe (Weiß-, Grün- und Braunglas) ab. Strombasierte Flexibilisierungen, und damit positive wie negative elektrische Laständerungen im Schmelzprozess, sind individuell für jede Anlage zu prüfen, da Veränderungen in der Wärmezufuhr Auswirkungen auf die Tonnage und vor allem auf die Produktqualität haben können.

#### EINBETTUNG IN DIE PROZESSKETTE

Nach dem Schmelzen in der Wanne wird das Glas kontinuierlich über den Speiser (Feeder) an die formgebenden Maschinen übergeben. Im Speiser wird die Schmelze mittels Brenner thermisch homogenisiert, um eine konstante Temperatur- und damit Viskositätsverteilung zu erhalten. In der anschließenden Formgebung werden die Behältergläser mit unterschiedlichen Verfahren für Enghals- und Weithalsgläser hergestellt. Einer Glaswanne sind i.d.R. mehrere Formgebungsmaschinen für Behälter zugeordnet, die wiederum aus einer Vielzahl von einzelnen Produktionssträngen (Stationen) bestehen. Nach der Formgebung folgt oft die Heißendvergütung. Danach muss das Produkt im Kühllofen (Temperofen) – einem exakten Temperaturprofil folgend – kontrolliert auf ca. 300 °C abgekühlt werden. Trotz des Namens „Kühl“ wird im Kühllofen nicht etwa aktiv gekühlt, sondern durch Gas- oder Elektroheizung so viel Wärme eingebracht, dass das Glas langsam und definiert abkühlt, so dass thermische Spannungen im Glas abgebaut werden. Der Prozess des

Spannungsabbau ist bei etwa 300 °C abgeschlossen. Der letzte Produktionsschritt vor der Verpackung der Behältergläser ist die Kaltendvergütung mit der anschließenden Qualitätsprüfung, welche die Prüfung auf Einschlüsse sowie Einhaltung der geometrischen Abmessungen beinhalten. Dieser Verfahrensschritt ist energetisch gesehen unbedeutend, aber wichtig für die Produktqualität.

### VERNETZTE PRODUKTE

Beim Herstellungsprozess von Behälterglas werden kaum Halbzeuge produziert – anders als in anderen Branchen wie z.B. der Stahlherstellung – sondern es steht am Ende des Produktionsprozesses das für den Kunden nutzbare Endprodukt zur Verfügung<sup>1</sup>. Behälterglas verlässt die Produktion bereits in seiner endgültigen Form und unterliegt in den meisten Fällen auch keiner Weiterverarbeitung mehr (die Etikettierung und ähnliche Prozesse übernimmt meist der Kunde [Abfüller]). Auch eine Segmentierung der aktuellen Prozesskette und -abläufe ist nicht möglich ohne Störung des gesamten Prozesses und Verminderung der Produktqualität.

<sup>1</sup> Seltene Ausnahme sind z.B. Glasrohre für die Pharmaziebehälterherstellung (Ampullen) oder Glasfrühen, die z.B. zur Herstellung von Filtermaterial eingesetzt werden können.

### TECHNISCHE LIMITATIONEN IM HINBLICK AUF LASTFLEXIBILISIERUNG

#### A. TEMPERATUR-ZEIT-REGIME

Beim Schmelzprozess in der Glasschmelzwanne durchläuft das zugeführte Gemenge die fünf Phasen der Glasschmelze:

1. Gemengeerwärmung
2. Gemengereaktion
3. Restquarauflösung
4. Läuterung
5. Abstehen und thermisches Homogenisieren

Die Phasen sind über den Wannenvverlauf in Abbildung 3.10 exemplarisch, von der Zugabe des Gemenges bis zur „fertigen“ Schmelze, dargestellt. In der Realität vermischen und verwischen die im Bild genannten Bereiche sich im Schmelzaggregat und eine so klare räumliche Zuordnung ist nur bedingt möglich.

Die erfolgreiche Glasproduktion erfordert ein exaktes Einstellen der Viskosität in der Schmelze und damit eine genaue Kenntnis der herrschenden Temperaturen, die kontinuierlich überwacht werden [9]. Der Spielraum für Temperaturschwankungen im Prozess ist mit maximal  $\pm 5$  K gering und führt bei Überschreitung zur Abnahme der Produktqualität und zu Störungen im Formgebungsprozess.

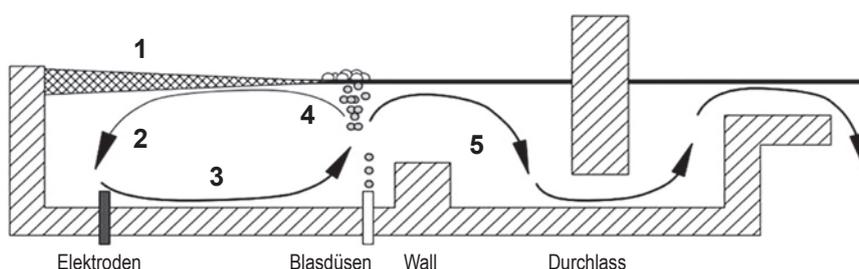


Abbildung 3.10: Strömungsprofil in der Schmelzwanne mit Schmelzphasen

Wie in Abbildung 3.10 angedeutet, bildet sich aufgrund von Temperaturunterschieden in der Schmelzwanne idealer Weise ein Strömungsprofil aus. Dieses sorgt für das Aufschmelzen des Gemenges von unten, wobei die Temperatur etwas abnimmt, so dass anschließend die Schmelze absinkt. Am sog. „Hot Spot“ wird der Rauschmelze mittels Wärmestrahlung und/oder die elektrische Zusatzheizung wieder Energie zugeführt und diese erwärmt, so dass die Schmelze, manchmal auch durch sog. Bubbles mechanisch unterstützt, wieder aufsteigt. Durch die chemischen Reaktionen während der Schmelze entstehen Gase (überwiegend  $\text{CO}_2$ , aber meist auch  $\text{SO}_3$  und  $\text{O}_2$ ), die im weiteren Prozess unerwünscht sind und aus der Glasschmelze entfernt werden müssen. Es findet die sogenannte Läuterung (Phase 4) statt. Für diesen Prozess ist die (entsprechend niedrige) Viskosität besonders entscheidend, da die Gasblasen sonst nicht „agglomerieren“ und zu langsam vertikal aufsteigen würden. Die blasenfreie und chemisch homogenisierte Glasschmelze wird nun auf dem Weg zur Formgebung thermisch homogenisiert, wobei dieser Prozessschritt in der Wanne (Phase 5) eingeleitet und im Feeder abgeschlossen wird.

Das eingebrachte Gemenge benötigt für den Durchlauf aller 5 Phasen bei Behälterglas zwischen ca. 5 (schnellste Strömungskennlinie) bis durchschnittlich 12 Stunden, bei einer maximalen Verweilzeit von ca. 24 Stunden (langsamste Strömungskennlinie). Als Grundaussage kann man annehmen, dass der Inhalt einer Schmelzwanne bei der Behälterglasfertigung etwa einmal am Tag erneuert wird.

#### B. EINFLUSS DER ELEKTRISCHEN ZUSATZHEIZUNG (EZH)

Die chemische Zusammensetzung des Glases und seine Absorptionseigenschaften bezüglich elektromagnetischer Strahlung (Wärmestrahlung) bestimmen im Wesentlichen den Bedarf einer elektrischen Zusatzheizung. Wird die Wärmestrahlung der „Flamme“ stark absorbiert und die tiefer liegenden Bereiche der Schmelze erhalten nur einen geringen Anteil der Strahlungsenergie, kann die benötigte Energie mit Hilfe der EZH an dieser Stelle eingebracht werden. Wobei zu beachten ist, dass die Absorptionseigenschaften des semitransparenten Mediums Glasschmelze (im Wellenlängenbereich des Sichtbaren „erkennbar“ auf Grund der Farbe des Glases; im IR durchaus anderes Verhalten als im sichtbaren Wellenlängenbereich möglich) sich mit den bei der Schmelze einstellenden Temperaturen verändert und die Glasfarbe des Glasproduktes daher nur bedingt das Absorptionsverhalten der Schmelze bei unterschiedlichen Temperaturen wieder gibt.

So muss beispielsweise beim sog. Weißglas meist nicht elektrisch zugeheizt werden, da auf Grund der geringeren Absorption das gesamte Glasbad von der Wärmestrahlung aus dem Verbrennungsraum durchdrungen wird. Allerdings kann z.B. auch bei der Schmelze von Weißglas die EZH zur Steigerung des Durchsatzes verwendet werden.

Erfahrungsgemäß kann die zugeführte elektrische Energie zumindest bis zu einem gewissen Grad (bis zu ca. 33 % der installierten elektrischen Leistung) teilflexibilisiert werden, wenn die Glasfarbe dies erlaubt oder keine Verringerung der Tonnage damit verbunden ist. Um die für die Erzeugung eines qualitativen Produktes nötigen Temperatur zu halten, muss die flexibilisierte elektrische Leistung durch eine Anpassung des Erdgasverbrauchs substituiert bzw. ausgeglichen werden. So bleibt der über alle Energieträger summierte Energieverbrauch mehr oder weniger

konstant. Limitiert durch die Glasfarbe kann nicht jede Wanne den elektrischen Bezug gleich stark variieren, zumal die elektrische Leistungsänderung von der Auslastung der EZH und den zulässigen Temperaturschwankungen der Schmelze auf max.  $\pm 5$  K begrenzt wird.

Das sich einstellende Strömungsprofil, bei dem ein Teil der Schmelze die Walze ein zweites Mal durchläuft (Umlauf der Walze in ca. 6 Stunden, je nach Anlagengröße und Durchsatz) und eine ungünstige periodische erhöhte Zuführung der EZH im gleichen Rhythmus, kann dafür sorgen, dass die variierende EZH für inhomogene Temperaturprofile verantwortlich ist und Temperaturwellen erzeugt, die sich durch einen zyklischen Einsatz einer Flexibilitätsmaßnahme in einem entsprechenden Aufschwingen der lokalen Glasbadtemperaturen widerspiegeln und damit eine Verletzung der tolerierbaren Temperaturvariationen am Durchlass (Austritt aus der Glasschmelzwanne) eintritt.

### C. VOLL ELEKTRISCHE SCHMELZE (VES)

Neben den oben beschriebenen, als Hybridsysteme nutzbaren – brennerbeheizten Wannen mit EZH – gibt es auch rein elektrisch (monovalent) betriebene Wannen mit i.d.R. geringerer Kapazität. Da diese Wannen und deren Heizung in Grundlast betrieben werden (müssen), ergibt sich hier praktisch kein Flexibilisierungspotenzial unter der Voraussetzung der Beibehaltung der Tonnage und der Glasqualität.

### D. FORMGEBUNG

Die Prozessgeschwindigkeit in der Formgebung kann nicht variiert werden (bestimmender Prozessparameter auf der einen Seite: Kühlgeschwindigkeit/Erstarrungsgeschwindigkeit der Schmelze beim Kontakt mit dem Formgebungsmaterial; auf der anderen Seite: getakteter und verzahnter Ablauf der nachfolgenden Prozessschritte [Transportband von den Stationen zum Kühllofen, Durchlaufzeit im Kühllofen, ...]).

Somit ergibt sich keine Flexibilität auf der Verarbeitungsseite, da die Formgebungsmaschine immer dem Produkt gemäß optimal ausgelastet ist. Auch ein Zu- oder Abschalten von einzelnen Produktionssträngen ist nicht ohne weiteres (ohne Qualitätseinbußen) möglich. Entweder ist die gesamte Formgebungsmaschine „an“ oder „aus“.

Es ist prinzipiell technisch möglich, mit entsprechenden Vorlaufzeiten (mind. ein(ige) Tag(e)) das Produkt und damit die Tonnage über das Produkt so anzupassen, dass nach Austausch der Formensätze ein geänderter Durchsatz und damit verbunden auch Energieverbrauch entsteht. Allerdings lässt sich dies unter Beachtung von Kundenwünschen, Lieferterminen und Qualitätsanforderungen in vielen Fällen aus heutiger Sicht nicht wirklich umsetzen.

### E. KÜHLOFEN

Die Beheizung der Kühlöfen kann prinzipiell mit fossilen Brennstoffen oder vollelektrisch erfolgen. Der Energieaufwand für die kontrollierte Abkühlung beträgt bei Behältergläsern im Mittel ca. 10 bis 15 kWh/t, entsprechend ca. 1 % der Energie für die Schmelzwanne.

Eine Umrüstung der Kühlöfen auf rein elektrische Systeme ist technisch möglich, ergäbe aber kein Flexibilisierungspotenzial, da für die Einhaltung der strikten Zeit-Temperatur-Kurve kein Spielraum bezüglich der

Energiezufuhr gegeben ist. Abweichungen von einer gegebenen Abkühlkurve führen zu erhöhten (Rest-)Spannungen im Produkt und zu dessen Zerstörung mit einer möglichen Gefährdung von Verbrauchern (Bsp.: Scherben beim Bruch in der Abfüllanlage könnten in das Gut (Lebensmittel) gelangen; unkontrollierter Bruch beim Verbraucher).

Für eine Hybridisierung der Kühlung und damit verbunden für eine Flexibilisierung der Kühlung ist bei den heutigen Randbedingungen der Kostenaufwand viel zu hoch.

Außerdem werden von der (Behälter-) Glasindustrie entsprechende Bemühungen unternommen, im Sinne der Energieeinsparung Kühlöfen mit der Eigenwärme der Glasprodukte nach der Formgebung bei geeigneten Produkten (Restwärme bei gegebener Wanddicke und Gewicht) zu betreiben und somit mehr oder weniger gänzlich auf eine zusätzliche Beheizung zu verzichten.

### 3.7.5 ANFORDERUNGSPROFIL 1 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Für eine Flexibilisierung des Einsatzes elektrischer Energie stehen in der Behälterglasindustrie nur begrenzte Möglichkeiten zur Verfügung, da es anders als in vergleichbaren Branchen, wie z.B. bei der Stahlherstellung, so gut wie nie Zwischenprodukte gibt.

Die Anlagen und Prozesse bei der Glasherstellung werden in der Regel kontinuierlich betrieben und sind – auf Grund der Temperatur„empfindlichkeit“ (genauer: der exponentiellen Abhängigkeit der Viskosität von der Temperatur (s. Abbildung 3.7) des Produktionsprozesses – kaum flexibel.

Ferner kann die Glasschmelze nicht beliebig erwärmt und abgekühlt werden, da dann nicht mehr das Produkt mit seinen gewünschten Eigenschaften und in der verlangten Qualität erzielbar ist. Eine übermäßige Erwärmung führt zu lokal erhöhter Verdampfung die mit chemischer Inhomogenität einhergeht und damit zu Glasfehlern (Schlieren) führt. Eine Unterkühlung der Schmelze führt dazu, dass bei Unterschreitung der Keimbildungstemperatur bzw. bei Erreichen des Bereiches des Kristallwachstums die Gefahr von Kristallisationsprozessen besteht, die zu Fehlern (kristallinen Einschlüssen) im Produkt führen können. Der gesamte Herstellungsprozess wird daher kontinuierlich, bei entsprechend konstant hohen Temperaturen betrieben und ist auf ein optimiertes Temperatur-Zeit-Regime ausgelegt, um in so kurzer Zeit wie möglich und mit so geringem Energieaufwand wie nötig ein Qualitätsprodukt zu erzeugen.

Wird die EZH als Instrument der Flexibilisierung herangezogen, so muss durch (zeitnahen) Ausgleich mit Hilfe andere Energieträger dafür gesorgt werden, dass die Temperaturen im Prozess „konstant“ (innerhalb der tolerierbaren Schwankungsbreite von wenigen Kelvin) bleiben. Bei Erhöhung der elektrischen Last kann bzw. muss also z. B. der Erdgasverbrauch entsprechend erniedrigt und bei Verminderung der elektrischen Last muss entsprechend erhöht werden. Dabei ist zu beachten, dass der effektive Energieeintrag in die Glasschmelze bei unterschiedlichen

Energieträgern unterschiedlich gut ist und an verschiedenen Orten stattfindet (EZH: Freisetzung der Energie in der Schmelze; Verbrennung: Eintrag der Wärmestrahlung (von oben) aus dem Verbrennungsraum in die Schmelze, wobei die Eindringtiefe von den optischen Eigenschaften der Schmelze (Transmission) bei der gegebenen Temperatur und Wellenlänge abhängt).

Geht man von der installierten elektrischen Leistung der elektrischen Zusatzheizung in der Behälterglasindustrie aus, dann beträgt diese beim Behälterglas in Deutschland ca. 75 MW.

Es ist jedoch zu bedenken, dass zum Einen nicht alle Zusatzheizungen gleichzeitig im Einsatz sind und zum Andern nur ein Teil der gerade genutzten Last nutzbar ist (Teilerhöhung bzw. -erniedrigung). Gründe hierfür sind u.a.:

- EZH in Volllast:
  - keine Erhöhung möglich;
  - keine Minderung möglich, da technologisch benötigt um erforderliche Tonnage zu schmelzen und/oder Farbglas einen ausreichenden Energieeintrag von oben (Verbrennungsraum) in tiefere Badbereiche nicht erlaubt und daher die Energie „von unten“ benötigt wird.
- Wannen werden repariert (bei ca. 60 Wannen sind bei einer Laufzeit zw. 10 und 20 Jahren rein rechnerisch (bei Gleichverteilung) 3 bis 6 Wannen pro Jahr in Revision (Hauptreparatur). Die Stillstandszeit für eine Hauptreparatur schwankt erfahrungsgemäß je nach Umfang der Arbeiten und abhängig von ökonomischen Randbedingungen zwischen ca. 6 Wochen und 3 Monaten.
- Die EZH ist nicht eingeschaltet, da bei der erschmolzenen Glasfarbe (weiß) der Einsatz der EZH technologisch und/oder ökonomisch nicht sinnvoll ist.

Wenn die EZH im Einsatz und eine Flexibilisierung möglich ist, kann in den allermeisten Fällen nicht einfach ab- bzw. zugeschaltet werden, ohne dass sich eine Störung der Produktion einstellt, auf Grund der oben beschriebenen Randbedingungen. Daher werden meist nur geringfügige Änderungen im Eintrag der elektrischen Energie (nach Aussagen der Glashersteller: ca.  $\frac{1}{3}$  bis  $\frac{1}{4}$  des aktuellen Energieeintrages der EZH) vorgenommen. Im Rahmen von DSM wird die EZH auch heute schon genutzt. Es liegen also entsprechende Erfahrungen bei einigen Glasherstellern schon vor. Als realisierbares Potenzial ergeben sich somit ca. 25 MW<sub>el</sub>, die durch die Behälterglasherstellung zur Verfügung gestellt werden können.

Prinzipiell muss eine elektrische Laständerung mit der Substitution durch fossiler Energieträgern einhergehen, mit Ausnahme von sehr kurzen Flexibilisierungsmaßnahmen, die weniger als 5 Minuten andauern. Bei positiver wie negativer elektrischer Leistungsänderung gilt es, die maximale Schwankungsbreite der Temperatur von etwa  $\pm 5$  K über alle prozessrelevanten Kontroll- und Messstellen einzuhalten.

### 3.7.6 ANFORDERUNGSPROFIL 2 UND 3 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Vom Produktionsprozess der Glasherstellung mit Schmelze und Formgebungsschritt als nicht trennbare Abfolge ist eine Lastreduktion bzw. -erhöhung über mehrere Stunden sowie Tage nicht zu erfüllen.

Durch eine entsprechende Produktplanung mit entsprechenden Vorlaufzeiten von mindestens einem Tag ist es vorstellbar, den Durchsatz und damit der Energiebezug an von außen kommende Anforderungen anzupassen, indem durch einen (Produkt-)Wechsel an der Formungsmaschine von einem dickwandigeren, größeren bzw. schwerere Artikel auf ein dünnwandiges, kleineres bzw. leichteres Behälterglas (oder umgekehrt) umgestellt wird. Allerdings sprechen oft Liefertermine, Kundenverpflichtungen und bestelltes Sortiment gegen eine solche Maßnahme. Dazu müssen einerseits die passenden Formen zur Verfügung stehen und andererseits die Lieferverpflichtungen eine Produktionsumstellung zulassen. Nur wenn also dünnwandigere bzw. dickwandigere Produkte bereits in den Auftragsbüchern stehen, die Werkslogistik und die Lieferverpflichtungen eine Produktionsverschiebung zulassen, wäre diese Flexibilitätsmaßnahme umsetzbar. Wie in den Grundstoffindustrien üblich, ist eine übermäßige Lagerhaltung mit zusätzlichen Kosten verbunden und daher zu vermeiden. Technisch lässt sich die Produktionskapazität pro Tag um maximal etwa 10 % der Tonnage (z.B. Reduktion von 200 t/d auf 180 t/d) ohne Qualitätseinbußen anpassen. Entsprechende Tonnagesprünge sind allerdings auch schon im 24 h Takt eine technologische Herausforderung, da sowohl die Glasschmelzwanne als auch der Feeder und die Formgebungsmaschinen an die neuen Randbedingungen mit einigem Aufwand angepasst werden müssen. Außerdem reagiert das Schmelzaggregat bei der Anpassung an die neuen (thermischen) Randbedingungen sehr träge (24 bis 48 Stunden bei größeren Änderungen), so dass schnell aufeinander folgende, größere Änderungen sich ungünstig auf die Produktqualität auswirken.

Bei einer langfristig geplanten Produktumstellung kann die Temperatur in den Glasschmelze führenden Teilen langsam an die optimalen Bedingungen für das neue Produkt herangeführt werden. So eine (Temperatur-)Anpassung der Schmelze benötigt u. U. einige Stunden. Der Formwechsel selber dauert nur ca. eine bis zwei Stunden, je nach Anzahl der parallel geschalteten Stationen und der notwendigen Änderungen der unterschiedlichsten Formgebungsparameter beim Formenwechsel. Eine Ausweisung von Potenzialen ist für diese Maßnahme ist z. Zt. schwierig, auch auf Grund der Komplexität der damit verbundenen Arbeiten.

### 3.7.7 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Generell werden industrielle Herstellungsprozesse seit Jahrzehnten bezüglich ihrer Energieeffizienz optimiert, auch um die Energiekosten niedrig zu halten. Eine zweite Anforderung von Seiten des Gesetzgebers prägt die Fahrweise bzw. Betriebsweise vor allem von industriellen Prozesswärmeanlagen bezüglich der Forderung der Minderung von schädlichen Emissionen (TA-Luft, BImSchG o.ä. behördliche Vorgaben). Schon

die Optimierung der einzelnen Prozessschritte hinsichtlich Energieeffizienz und Emissionsminderung führen manchmal zu sich widersprechenden Maßnahmenkatalogen bzw. Vorgaben. Eine Erhöhung der Flexibilisierung bzw. Bereitstellung und Durchführung von Flexibilisierung führt in manchen Bereichen bzw. Prozessschritten auch zu einer deutlichen Verschlechterung der Energieeffizienz.

Der technologische Bedarf der EZH ist auch auf die optimale Energieeffizienz der Summe aller Energieträger hin ausgerichtet. Wird der Beitrag der EZH massiv verändert, ergeben sich u. U. auf Grund der unterschiedlichen Energieeintragungsraten der unterschiedlichen Energieträger eine schlechtere Gesamteffizienz der entsprechenden (Teil-)Prozesse. Da bei der Glasherstellung bei hybriden Ansätzen die Flexibilität des einen Energieträger durch die flexible Nutzung eines zweiten Energieträgers kompensiert werden muss, um den kontinuierlichen Prozess aufrecht zu erhalten, ergeben unterschiedliche Energie- bzw. Wärmeeintragsraten auch Unterschiede in der Gesamtbilanz des Energieeinsatzes.

### 3.7.8 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

#### OXYFUEL-BEHEIZTE WANNEN UND SAUERSTOFF-ERZEUGUNGSANLAGE

Eine Alternative zu Wannen mit einer (regenerativen) Abgaswärmerückgewinnung sind sog. oxy-fuel beheizte Wannen<sup>2</sup>, deren Verbrennung statt mit Luft als Oxidator mit mehr oder weniger reinem Sauerstoff (abhängig von der O<sub>2</sub>-Herstellung: üblicherweise >92 Vol.-% O<sub>2</sub>) versorgt werden. Diese Betriebsweise ist feuerungstechnisch effizienter, da der in der Luft enthaltene und nicht an der Verbrennungsreaktion beteiligte bzw. für diese nicht benötigte Stickstoff dann nicht durch den Verbrennungsprozess geschleust werden muss. Entsprechend ist das Abgasvolumen nach der Verbrennung deutlich verringert. Allerdings wird der Abgasstrom üblicherweise mit Luft gequenscht (abgekühlt), um die für die Abgasreinigung im Filter benötigten niedrigeren Temperaturen zu erreichen. Das Abgasvolumen nimmt dann fast die gleiche Größenordnung ein, wie hinter einer Brennstoff-Luft-Verbrennung. Die höheren Flammentemperaturen, die veränderte Wärmestrahlung (Intensität und Strahlungsverhalten als Funktion der Wellenlänge) führen bei Oxy-Fuel zu einem verbesserten Wärmeeintrag in die Schmelze. Das erst einmal verringerte Abgasvolumen erniedrigt die Abgasverluste hinter der Verbrennungsstrecke.

Allerdings muss die energieaufwändige Sauerstoff-Herstellung mitbilanziert werden, so dass sich der energetische Vorteil im Gesamtprozess relativiert bzw. bezüglich der Kosten oft kompensiert.

Aufgrund des fehlenden Stickstoffs im Oxidator kann die Entstehung von Stickoxiden bei der Verbrennung deutlich vermindert werden. Nur der im Brennstoff enthaltene Stickstoff, Falschluff und prozesstechnisch eingebrachte Nitrate in den Rohstoffen führen noch zur Stickoxidbildung. Bei Beachtung dieser Randbedingungen verringert sich die Emissionsbelastung mit Stickoxiden pro t Glasprodukt bei Oxy-Fuel-Verbrennung erkennbar.

<sup>2</sup> Bei Oxyfuel-Wannen sind bisher keine Wärmerückgewinnungssysteme im Einsatz, allerdings gibt es ein EU-Forschungsvorhaben, das eine solche Integration der Wärmerückgewinnung für die thermochemische Regeneration von Erdgas im industriellen Feldversuch untersucht. [Life 15 CCM/NL/000121 – LIFE OPTIMELT; [www.lifeoptimelt.com](http://www.lifeoptimelt.com)]

Der für die Verbrennung notwendige Sauerstoff kann rein technologisch alternativ über verschiedene Wege hergestellt werden. Für die Bereitstellung von Sauerstoff für eine Oxy-Fuel-Feuerung werden üblicherweise die Luftzerlegung und VPSA (Vapour Pressure Swing Absorption)-Anlagen genutzt, wobei technologisch auch eine Elektrolyse-Anlage Sauerstoff liefern kann. Alle Anlagentypen sind Stromanwendungen mit (zwischen-)speicherbaren Gasen und daher prinzipiell (aus technischer Sicht) gut für einen flexibilisierten Betrieb geeignet, sofern entsprechende große Zwischenspeicher oder flexible Abnehmer für die Gase ( $O_2$  und im Fall der Elektrolyse zusätzlich  $H_2$ ) vorhanden sind. Für eine Flexibilisierung müssten die  $O_2$ -(Zwischen-)Lager aber gegenüber den heute üblichen Größen mit geringeren Speichervolumen deutlich erhöht werden.

#### **ANSATZ DES SATELLITENPROJEKTES „DISCONMELT“ UND ANFORDERUNGSPROFIL 2**

Ziel des Satellitenprojektes „DisConMelt“ (Kopernikusfördernummer S3A bis D) ist, vereinfacht dargestellt, eine Segmentierung des Glasschmelzprozesses, so dass die Flexibilität deutlich erhöht wird. Die eigentliche Schmelze und die Formgebung sollen durch einen entsprechenden „(Zwischen-) Speicher“ voneinander getrennt werden, so dass der Formgebungsprozess unabhängiger vom Schmelzaggregat ist. Die angedachte industrielle Umsetzung am Ende des Projektes wird erst einmal für eine relativ kleine Einheit (30 bis 50 t/d) ausgelegt werden.

Wenn die Umsetzung der Idee „DisConMelt“ gelingt, wird das Anforderungsprofil 2 für die Glasindustrie in Zukunft ( $\geq 2030$ ) eine weitere nutzbare bzw. zur Verfügung stehende Flexibilisierungsmaßnahme darstellen.

#### **HYBRIDÖFEN ZUR SCHMELZE VON GLAS**

Aktuell werden viele Glasschmelzwannen bei gleichzeitiger Nutzung unterschiedlicher Energieträger betrieben. Der Hauptenergieträger ist meist Erdgas als fossiler Brennstoff und elektrische Energie wird als Elektrozusatzheizung verwendet. Der Anteil der EZH am Gesamtverbrauch des Schmelzaggregates beträgt üblicherweise 5 bis 15 % (im Mittel liegt dieser bei ca. 10 %). Allerdings ist dies kein Hybridansatz im engeren Sinn sondern ein zeitgleicher Einsatz unterschiedlicher Energieträger aus der technologischen Notwendigkeit heraus, um im Schmelzaggregat unterschiedliche Farben schmelzen zu können oder um die Tonnage auf das von den Maschinen verarbeitbare Niveau zu bringen.

Das Potential und die technische Auslegung sowie die technologischen Grenzen „echter“ Hybridöfen, bei denen die Energieträger gegeneinander ausgetauscht werden können bzw. der eine Energieträger durch den anderen substituiert werden kann, soll im weiteren Verlauf der Untersuchungen geklärt werden. Eine Zwischenlösung zw. reiner EZH wie bisher und einem Hybridofen wäre eine formelle Erhöhung der installierten Leistung bei der EZH, um einen größeren Spielraum für Laständerungen im Anforderungsprofil 1 umzusetzen zu können.

### 3.8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Jahresbericht des BV Glas 2015
- [2] Jahresbericht 2016 des BV Glas: [www.bvglas.de/media/user\\_upload/Jahresbericht\\_2016.pdf](http://www.bvglas.de/media/user_upload/Jahresbericht_2016.pdf) (aufgerufen am 18.09.2017)
- [3] Webseite des BV Glas: [www.bvglas.de/ueber-glas/die-branchen/behaelterglas](http://www.bvglas.de/ueber-glas/die-branchen/behaelterglas) (aufgerufen am 18.09.2017)
- [4] Webseite des BV Glas, Karte des BV Glas: [www.bvglas.de/media/Weitere\\_Veroeffentlichungen/Karte\\_Behaelterglashersteller\\_in\\_Deutschland.pdf](http://www.bvglas.de/media/Weitere_Veroeffentlichungen/Karte_Behaelterglashersteller_in_Deutschland.pdf) (aufgerufen am 18.09.2017)
- [5] Webseite der Hornglass-Gruppe: [www.hornglass.com](http://www.hornglass.com) (aufgerufen im November 2013)
- [6] Firmenschrift: Schott Technische Gläser – Physikalische und chemische Eigenschaften. Mai 1999. Seite 11
- [7] Firmenschrift: Schott Technische Gläser – Physikalische und chemische Eigenschaften. Mai 1999. Seite 12
- [8] B. Fleischmann: 150 Jahre Siemens Glasschmelz-Wannenöfen in Deutschland. dgg journal 16 (2017) 3, 9–13
- [9] H. G. Pfaender: Schott Guide to Glass. Chapman & Hall, London, 1996



## KAPITEL 4

# FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Verantwortliche Autoren:

ABSCHNITT 4.1–4.5, 4.7–4.9

Johannes Ruppert, Kevin Treiber,

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

ABSCHNITT 4.6

Johannes Ruppert, Kevin Treiber,

VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

Karin Arnold, Georg Holtz,

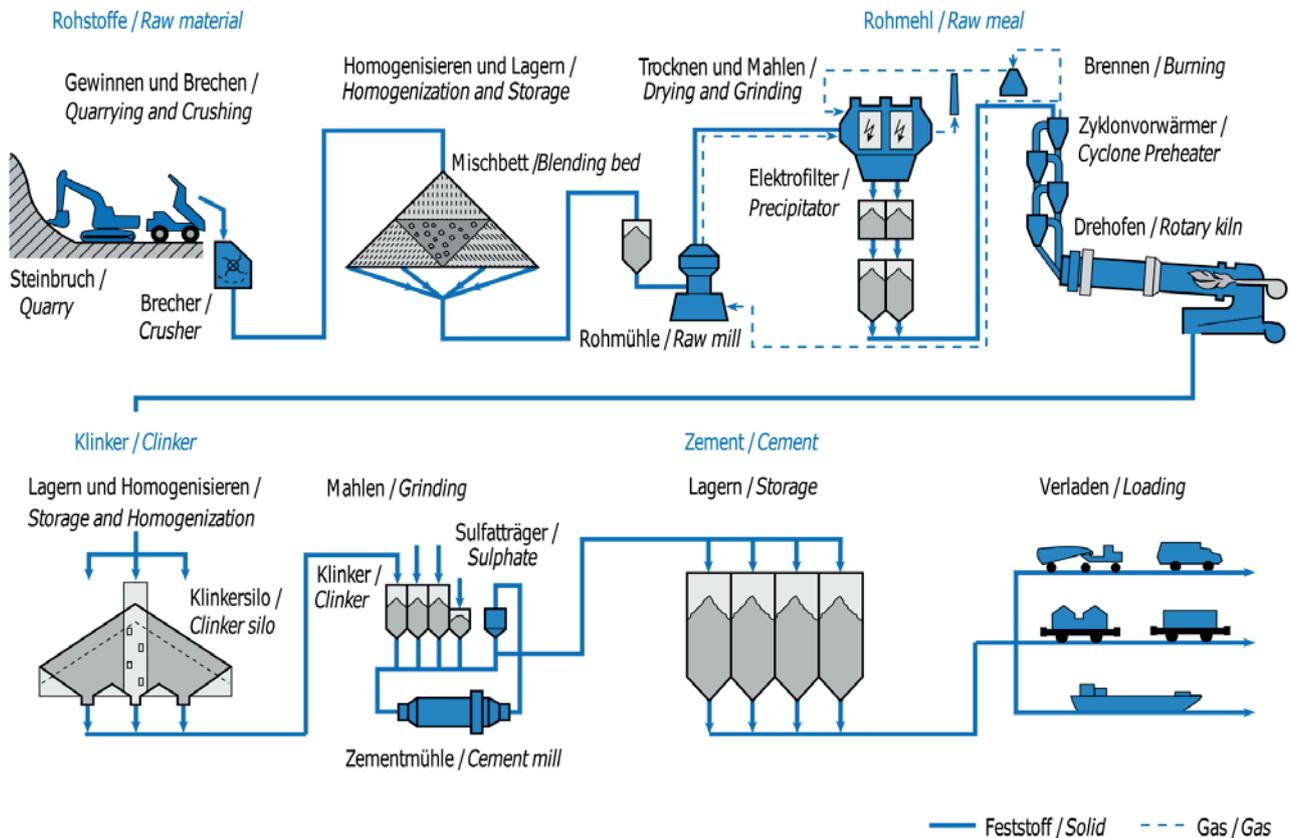
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

Die Zementindustrie stellt mit fein gemahlenen Zementen einen wichtigen Grundstoff für die Bauwirtschaft her. Weltweit handelt es sich bei Zement um den meist eingesetzten Baustoff. Gleichzeitig gehört die Zementindustrie zu den energieintensiven Industriesektoren. Weit überwiegend wird thermische Energie für die Kalzinierung des Rohmehls und den Klinkerbrennprozess benötigt. Diese Prozesse zur Klinkerproduktion sind als kontinuierliche Prozesse und für eine sehr effiziente Nutzung der thermischen Energie ausgelegt. Das Rohmehl wird dabei im Gegenstrom zu den heißen Abgasen in einem Wärmetauscher vorgewärmt. Die Zementwerke sind in der verfügbaren Anlagentechnologie sehr unterschiedlich. Charakteristisch ist jedoch die Unterteilung in Produktionsstufen entsprechend der Teilprozesse Rohmahlung, Klinkerherstellung und Zementproduktion (Abbildung 4.1). Diese Prozesse können durch vor- und nachgeschaltete Lager und Silos unter gewissen Voraussetzungen und zeitlich begrenzt voneinander entkoppelt werden. Dadurch ergeben sich für Teilprozesse der Zementherstellung Potentiale für einen flexiblen Anlagenbetrieb.

Abbildung 4.1: VDZ Schema zum Verfahrensablauf im Zementwerk [1]



Zement wurde im Jahr 2014 in Deutschland an insgesamt 55 Standorten produziert (Abbildung 4.2). Die Standorte werden unterschieden in integrierte Zementwerke mit Klinkerbrennprozess (34 Standorte) und Zementmahlwerke ohne Klinkerproduktion (21 Standorte).



Abbildung 4.2: Zementwerke in Deutschland 2014 [2]

- Zementwerke mit eigener Klinkerherzeugung
- Zementwerke ohne eigene Klinkerherzeugung

Die wichtigsten Zementrohstoffe Kalkstein, Ton und ihr natürliches Gemisch, der Kalksteinmergel, werden in Steinbrüchen hauptsächlich durch Sprengen gewonnen. Die Standorte der integrierten Zementwerke richten sich nach den Rohstoffvorkommen, um den Rohstofftransport zwischen Steinbruch und Zementwerk möglichst kurz zu halten.

Als wesentliche Voraussetzung für die Güte und Gleichmäßigkeit des Zements muss die zur Klinkerherstellung erforderliche Zusammensetzung des ofenfertigen Rohguts genau und gleichbleibend eingehalten werden. Wenn die Lagerstätten größere Schwankungen in ihrer chemischen Zusammensetzung aufweisen, wird vielfach schon der Rohschotter vorhomogenisiert. Die Halden fassen in der Regel den Schottervorrat für eine Woche; das sind je nach Werksgröße zwischen 20.000 t und 80.000 t.

Die Rohmaterialien werden in Deutschland durch Kugel- oder Vertikal-mühlen gemahlen (eine detaillierte Beschreibung des Prozesses findet sich in Kapitel 4.1.1).

Zementklinker wird heute zum überwiegenden Teil (91 % der genehmigten Klinkerkapazität) nach dem Trockenverfahren in Drehrohröfen mit Zyklonvorwärmern hergestellt. Zementklinker entsteht aus einem Rohstoffgemisch, das in einer Drehofenanlage bei einer Temperatur von über 1.400 °C und einer Gastemperatur bis zu 2.000 °C bis zum Sintern erhitzt wird. An den Ofenauslauf schließt sich ein Klinkerkühler an. Zur Klinkerkühlung werden vorwiegend Rostkühler eingesetzt. Moderne Drehofenanlagen zeichnen sich durch eine effiziente Nutzung der eingesetzten Energie aus. Der größte Teil der in den Abgasen enthaltenen Energie wird zur Trocknung der Rohstoffe und der Brennstoffe sowie gegebenenfalls von anderen Einsatzstoffen wie z.B. Hüttensand verwertet. Auf diese Art wird die Abwärme am wirtschaftlichsten und effizientesten [3] genutzt. Energieverluste sind z. B. durch energetische Nutzung von Kühlerabluft und ggf. heißem Bypassgas weitgehend minimiert. Damit erreichen Ofenanlagen der Zementindustrie Anlagenwirkungsgrade von ca. 70 %.

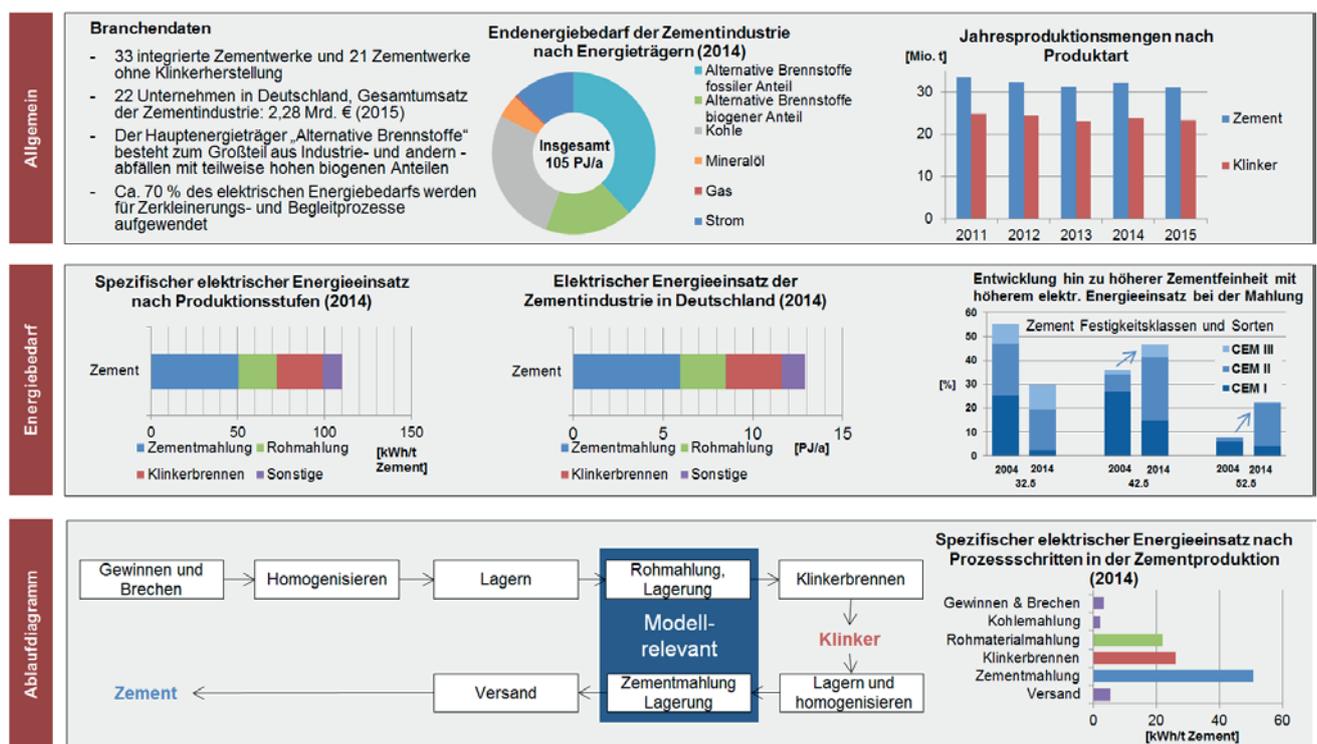
Falls darüber hinausgehende Abwärme zur Verfügung steht, kann es im Einzelfall wirtschaftlich sinnvoll sein, diese zur Erzeugung von Heißwasser oder Prozessdampf zu nutzen. Da in einem Zementwerk kein Dampf oder nur in geringem Umfang Heizleistung benötigt wird, lohnt sich deren Erzeugung nur, wenn eine gesicherte Abgabe, beispielsweise in Form von Fernwärme oder Prozessdampf an einen benachbarten Ort oder Betrieb, möglich ist. Problematisch ist in diesem Fall die Kopplung verschiedener Prozesse, die eine Redundanz der Energieerzeugungsanlagen erfordert. Gerade im Winter, wenn Fernwärme in besonderem Maße benötigt wird, ist der Zementabsatz und die Klinkerproduktion gering. Dementsprechend werden Drehofenanlagen in der Regel über mehrere Wochen oder Monate zur Wartung stillgesetzt. Abgaswärme kann im Einzelfall in elektrische Energie umgewandelt werden. Allerdings werden hierdurch im Vergleich zur direkten thermischen Nutzung geringere Wirkungsgrade [4] erzielt. Nach dem Brennen und Kühlen wird der Klinker in Silos oder geschlossenen Hallen gelagert, um Emissionen von Klinkerstaub zu vermeiden.

Zur Herstellung von Zement wird der Klinker allein oder mit weiteren Hauptbestandteilen gemeinsam feingemahlen (eine detaillierte Beschreibung des Prozesses findet sich in Kapitel 4.1.1). Weitere Hauptbestandteile im Zement können u.a. granuliert Hochofenschlacke, Puzzolane und Kalksteine sein. Diese werden zur Steigerung der Ressourceneffizienz und Reduktion des Anteils an Klinker im Zement (Klinker-Zement-Faktor) eingesetzt, was sich wiederum positiv auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirkt [5]. Da die verschiedenen Einsatzstoffe unterschiedliche Feuchten und Mahlbarkeiten aufweisen können, kann für eine optimale Zementherstellung auch eine getrennte Stoffstromverarbeitung in Betracht kommen. In diesem Fall werden die Zementkomponenten getrennt feingemahlen und die mehlfeinen Zwischenprodukte zu Zement gemischt.

## 4.1 BEDEUTUNG DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Im Klinkerbrennprozess werden sehr hohe thermische Energien eingesetzt. Die bei einer Flexibilisierung des Klinkerbrennprozesses entstehenden Verluste und der Anlagenverschleiß im Heißbereich wären allerdings weder ökonomisch noch energetisch vertretbar. Deshalb besteht aktuell nicht die Möglichkeit oder Perspektive, die hohen thermischen Energien in eine Flexibilisierung mit einzubeziehen.

Der spezifische elektrische Energiebedarf in der deutschen Zementindustrie in den Jahren 2014 und 2015 betrug etwa 110 kWh/t Zement. Etwa 70 % des elektrischen Energiebedarfs für die Zementherstellung entfallen auf Zerkleinerungsprozesse [6]. In der Prozesskette der Zementproduktion bieten die Bereiche der Mahlprozesse Möglichkeiten zur Flexibilisierung des elektrischen Energiebedarfs. Relevant für eine Modellierung und Einschätzung der technischen Potentiale sind hierbei die Rohmahlung und Zementmahlung inklusive der zugehörigen Lagerung von Produkten (Abbildung 4.3).

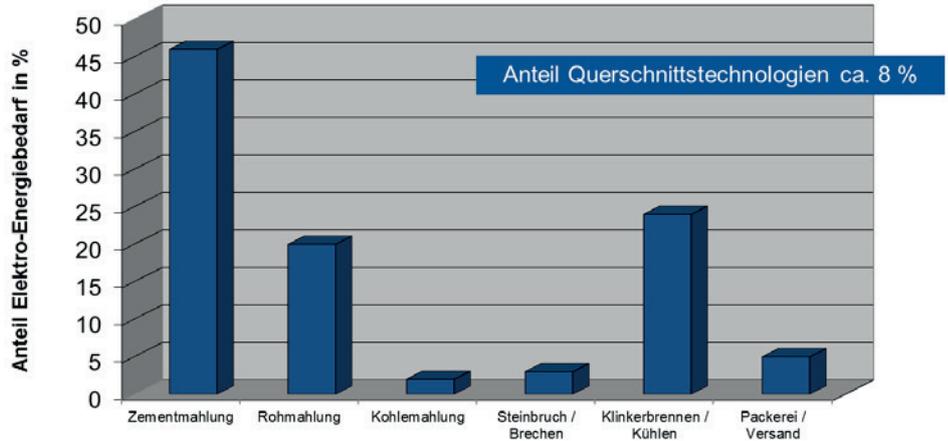


Die Mahlprozesse in der Zementherstellung können in zwei Prozesse unterteilt werden, die Roh- und die Zementmahlung.

Abbildung 4.3: VZD Branchensteckbrief zur Zementindustrie

Etwa 45 % des elektrischen Energiebedarfs entfallen auf die Zementmahlung und etwa 20 % auf die Rohmahlung (Abbildung 4.4). Der überwiegende Teil des elektrischen Energieeinsatzes von 3,57 TWh im Jahr 2014 erfolgt damit in den Zerkleinerungsprozessen. Für die Zementmahlung wird mit durchschnittlich 51 kWh/t Zement [1] der Hauptanteil an elektrischer Energie eingesetzt. Der Klinkerbrennprozess hat ebenfalls einen großen Anteil am elektrischen Energiebedarf von etwa 23 %. Die Kosten für elektrische Energie bezogen auf den gesamten Herstellungsprozess liegen bei etwa 15 bis 20 % [7].

Abbildung 4.4: Spezifischer elektrischer Energiebedarf (Deutschland, 2014): 110 kWh/t Zement [1], [10]

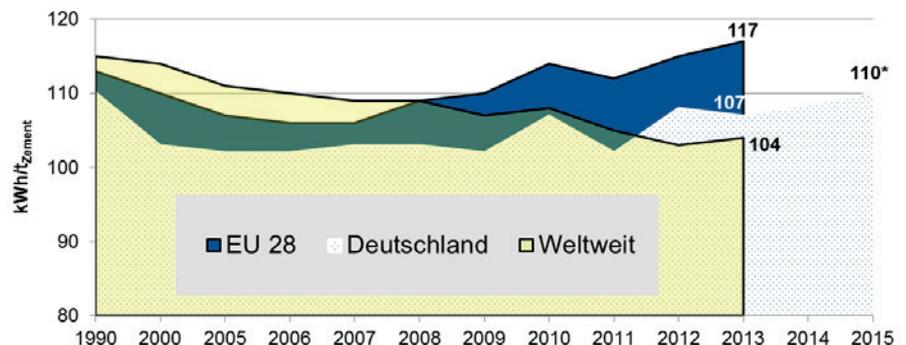


Die trockene Zerkleinerung der Rohmaterialien erfolgt in Vertikal-Wälzmühlen oder Kugelmühlen. Diese bereiten das Rohmaterial für den Klinkerbrennprozess vor. Zur Mahltrocknung werden Ofenabgasen genutzt um die Feuchte aus dem Material auszutreiben, es zu erwärmen und damit das Rohmehl für die Klinkerproduktion vorzubereiten. Zur Produktion des Klinkers wurden 2014 schätzungsweise 39,5 Mt Rohmehl gemahlen [8]. Vertikalmühlen erweisen sich als besonders effizient zur Mahltrocknung der Rohmaterialien. In Deutschland werden aktuell zu etwa 50 % Vertikal-Wälzmühlen und zu 50 % Kugelmühlen zur Rohmahlung eingesetzt. Die meisten integrierten Zementwerke verfügen über eine einzige Rohmühle, wenige über zwei.

Zement wird in Deutschland vorwiegend auf Kugelmühlen und Kombinationen der Kugelmühle mit Gutbett-Walzenmühlen gemahlen. Die Zementmahlung beeinflusst die Zementeigenschaften (z.B. Festigkeiten, Wasseranspruch) wesentlich. Im Jahr 2014 wurden 32,1 Mt Zement hergestellt [8].

In den vergangenen Jahren wurde eine deutliche Veränderung des Produktes Zement wahrgenommen. Es besteht ein Trend zu Zementen höherer Festigkeitsklassen und daher auch höheren Produktfeinheiten. Diese zunehmende Herstellung leistungsstärkerer Zemente führt gleichzeitig zu einer Erhöhung des spezifischen Energiebedarfs der Zementmahlung [9] (Abbildung 4.3 und Abbildung 4.5). Darüber hinaus werden vermehrt weitere Hauptbestandteile neben Klinker eingesetzt. Aus diesen Gründen ist die Zementherstellung heute und absehbar auch zukünftig mit weiter steigenden Anforderungen an die Produktion befasst.

Abbildung 4.5: Entwicklung des spezifischen Energiebedarfs der Zementherstellung [1], [10]



### 4.1.1 FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE FÜR KURZ-, MITTEL- UND LANGFRISTIGE ANFORDERUNGEN

Die Zementindustrie weist im Bereich der Materialzerkleinerung zunächst theoretisch ein hohes Potenzial zur flexiblen Lastabnahme und -bereitstellung durch zeitliche Verschiebung der Produktion auf. Dabei kann die eingesetzte Energie sozusagen in Form der feingemahlten Produkte gespeichert werden. Besonders die Zementmühlen eignen sich hierfür. Ein Teillastbetrieb der Mahlanlagen ist allerdings aufgrund technischer Gegebenheiten des Zerkleinerungsprozesses meist nicht möglich.

Die technischen Potenziale und Kapazitäten zur Lastverschiebung wurden im Rahmen des Projektes durch den VDZ in einem Modell [11] abgebildet (Kapitel 4.4). Bei der Modellbildung sind Rahmenbedingungen der Produktions- und Speicherkapazitäten sowie organisatorische und wirtschaftliche Fragestellungen betrachtet worden.

Unter der Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen sind bei ausreichenden Voraussetzungen kurzfristig An- und Abfahrvorgänge der Zementmühlen technisch realisierbar, wie in Anforderungsprofil 1 für kurze Abrufdauer (15 min) beschrieben. Ein kurzzeitiges Einschalten der Mühle ist allerdings meist nicht in der Lage die für die Produktqualität benötigten stabilen Produktionsbedingungen u.a. eine ausreichende Aufwärmung der Mühle zu erreichen. Ein kurzzeitiges Abschalten der Mühle ist eher möglich. Die Beeinflussung der Produktqualität wird hier geringer eingeschätzt als bei längeren Stillstandzeiten, in denen eine Mühle wieder auskühlt. Eine erhebliche Erhöhung der An- und Abfahrprozesse führt allerdings zu einer Verminderung der Effizienz der Mahlung und ggf. erhöhtem Verschleiß.

Die Bereitstellung von Kapazitäten zur Lastflexibilisierung mit mittlerer Abrufdauer (4–12 Stunden) entsprechend dem Anforderungsprofil 2 scheint technisch durch Lastverschiebung mit einer Garantie zum Nachholen ausgefallener Produktionszeiten möglich. Hierbei bleiben insgesamt ausreichend lange zusammenhängenden Produktionszeiträumen von i.d.R. mehr als 4 Stunden kontinuierlichem Betrieb erforderlich, um negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Eine besondere Herausforderung stellt hierbei die Personalplanung, die zusätzliche Bereitschaft von Personal und daraus entstehende erhöhte Personalkosten dar (Kapitel 4.6.5).

Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit zur Versorgungssicherheit für den Absatz des Produktes Zement in den nachfragstärksten Jahreszeiten und hinsichtlich möglicher kurzfristiger Produktnachfragen. Es sind Situationen bekannt, in denen die Nachfrage nach Zement die Produktionskapazität deutlich überschreitet. Eine exakte Prognose dieser Situationen ist allerdings schwierig. Bei ausreichend vorhandenen Kapazitäten und außerhalb der Hauptsaison für die Zementnachfrage, scheinen Lastverschiebung für längere Zeiträume möglich. Standortspezifisch kann ggf. durch organisatorische Maßnahmen die Koordination der Mühlenlaufzeiten derartige Anforderungen erfüllen. Der langfristigen Lastverschiebung für längere Stromknappheitsperioden wie in Anforderungsprofil 3

rungsprofil 3 beschrieben (bis zu 5 Tage), kann in den meisten Fällen nur mit Anpassung der Silokapazitäten entsprochen werden. Die Kosten für den Neubau und die Vergrößerung der Silos unterliegen standortspezifischen Einflüssen und scheinen aus heutiger Perspektive nicht rentabel. Eine weitere beispielhafte Konkretisierung für ein zukünftiges Szenario scheint erst auf der Grundlage von genaueren Anlagendaten und in Zusammenarbeit mit einem Zementunternehmen möglich und sinnvoll.

## 4.2 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DER REFERENZPROZESSE

### 4.2.1 ROHMAHLUNG

Sowohl der Betrieb als auch die Auslegung der Rohmühle sind in den meisten Fällen stark an den Drehrohrofen im Werk angelehnt. Dennoch schwanken die Kennzahlen der Anlagen standortbedingt stark.

Die Kapazität der Rohmühle wird etwas größer als für den kontinuierlichen Betrieb des Drehrohrofens nötig ausgelegt, um die Verfügbarkeit von Rohmehl in jeden Fall gewährleisten zu können und Produktionsdefizite (z.B. durch Ausfälle und Wartungen der Mühle) nachholen zu können. Der Betrieb der Rohmühle erfolgt aus Emissions- und Effizienzgründen i.d.R. zu über 80 % im sogenannten Verbundbetrieb [1] mit der Klinkerproduktion. Die technische Flexibilisierbarkeit der Rohmehlproduktion ist daher zugunsten der effizienten Nutzung thermischer Energie und effizienter Abgasreinigung eingeschränkt und stark mit den standortabhängigen Gegebenheiten im Werk verknüpft (Kapitel 4.7). Es sind Zementwerke bekannt in denen es dennoch möglicherweise praxisrelevante Potentiale für eine Flexibilisierung der Rohmahlung gibt [3], [12]. Zusammenfassend ist festzuhalten: Die Flexibilisierbarkeit der Rohmahlung ist an viele Faktoren gekoppelt und nur in Einzelfällen praktisch möglich und sinnvoll:

- Die Betriebssicherheit des Drehrohrofens darf nicht gefährdet werden.
- Ausgefallene Produktion muss durch Lastverschiebung nachgeholt werden können.
- Die Qualität, Homogenität und energieeffiziente Trocknung des Rohmehls dürfen nicht beeinträchtigt werden.
- Durch den Direktbetrieb des Drehrohrofens ohne Betrieb der Rohmühle dürfen keine zusätzlichen Emissionen entstehen und die Abgasreinigung darf nicht negativ beeinflusst werden.
- Die ökonomischen Randbedingungen dürfen den vorher genannten Punkten nicht widersprechen und der zusätzliche Aufwand und ein verbleibendes Risiko muss vergütet werden.

Die installierte Leistung von Rohmühlen liegt bei durchschnittlich etwa 3.000 kW und die Kapazität bei 166 t/h [10]. Hiernach kann sich eine Tagesproduktion von bis zu 4.000 t Rohmehl ergeben. Die Verbundbetriebszeiten liegen in der Praxis meist über 80 % der Betriebszeit. Direktbetriebszeiten ohne Betrieb der Rohmühle werden für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten der Rohmühle genutzt. Aus Emissions- und Effizienzgründen versuchen einige Werke die Direktbetriebszeiten weiter zu reduzieren. Zur Darstellung im VDZ Modell (s. Kapitel 4.4) läuft die Rohmühle mit einer durchschnittlichen Betriebszeit von 7.000 h/a. Das entspricht bei 320 Tagen mit Klinkerproduktion pro Jahr einem Anteil von 87 %.

Der Rohmühle vorgeschaltet ist das Rohsteinlager, welche als nicht limitierend für die Flexibilisierung der Rohmahlung angenommen wird. Diese Rohmehlsilos dienen der weiteren Homogenisierung und der Versorgungssicherheit des kontinuierlich betriebenen Drehrohrofens. Aus betrieblichen Gründen liegt der minimale Füllstand der Silos bei ein bis zwei Tagesbedarfen an Rohmehl.

## 4.2.2 ZEMENTMAHLUNG

Zur Zementmahlung werden in Deutschland heute hauptsächlich Kugelmühlen oder Kombinationen der Kugelmühle mit Gutbett-Walzenmühlen eingesetzt. Zur Steigerung der Effizienz und zur Erhöhung der Produktfeinheit werden diese Anlagen im geschlossenen Kreislauf mit einem Sichter betrieben. Diese Mahlsysteme zeichnen sich durch hohe Betriebssicherheit aus. Die Produkteigenschaften des Zementes werden in entscheidendem Maße durch die Mahlung beeinflusst. Neben der Feinheit und Korngrößenverteilung des Produktes Zement ist auch die Entwässerung des Sulfatträgers von entscheidender Bedeutung. Dies gilt ebenfalls für die Trocknung weiterer Zementhauptbestandteile (z. B. Kalkstein und Hüttensand) während des Mahlprozesses (sog. Mahltrocknung). Hier zeigt sich, dass vor allem die Verfügbarkeit ausreichender Betriebswärme und die Verweilzeit entscheidend sind. Bei Kugelmühlen liegt die Betriebstemperatur i. d. R. bei 95 bis 125 °C im Mühlenaustrag [13]. Bei Vertikalmühlen ist die Temperatur etwas geringer. Hier wird für die Zementmahlung meist die Sulfatträgerzusammensetzung angepasst. Aus diesen Gründen scheinen Abschaltungen von bis zu 2 Stunden technisch ohne zu große Auskühlung und Beeinträchtigungen der Produktqualitäten möglich. Seitens der Stromanbieter müsste darauffolgend Stromverfügbarkeit für eine Mindestbetriebszeit der vom Netz genommenen Mühle garantiert werden. Kontinuierliche Betriebszeiten von mindestens 4 Stunden sind in jedem Fall nötig. Wird die Entwässerung des Sulfatträgers nicht durch ausreichende Wärmeenergie in der Mühle gewährleistet kann es zur Vorhydratisierung des Zements im Silo kommen. Die Qualität des Produktes wird hierdurch verringert.

Auf das ganze Jahr gesehen sind Zementmühlen durchschnittlich zu über 50 % in Betrieb. Bisher werden Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten nach Möglichkeit in geplanten Stillstandzeiten der Mühlen durchgeführt. Vor allem in den Sommermonaten kann es zu einer nahezu vollständigen Auslastung der Mahlanlagen kommen. Zement wird in integrierten Zementwerken durch mehrere Zementmühlen gemahlen. Für die einzelnen Zementmühlen sind hierbei unterschiedliche Betriebsstunden in einem weiten Bereich von 1.000 bis 7.000 Stunden pro Jahr üblich. Neben integrierten Zementwerken wird Zement auch in Mahlwerken ohne eigene Klinkerproduktion hergestellt. Die Anzahl der Mühlen und ihre Betriebsstunden fallen im Durchschnitt etwas geringer aus als in integrierten Zementwerken. Standort, markt- und saisonbedingt kann der tatsächliche Mühlenbetrieb allerdings sehr unterschiedlich ausfallen. Die Zementnachfrage bestimmt im Wesentlichen die Auslastung der Mühlen (Abbildung 4.6).

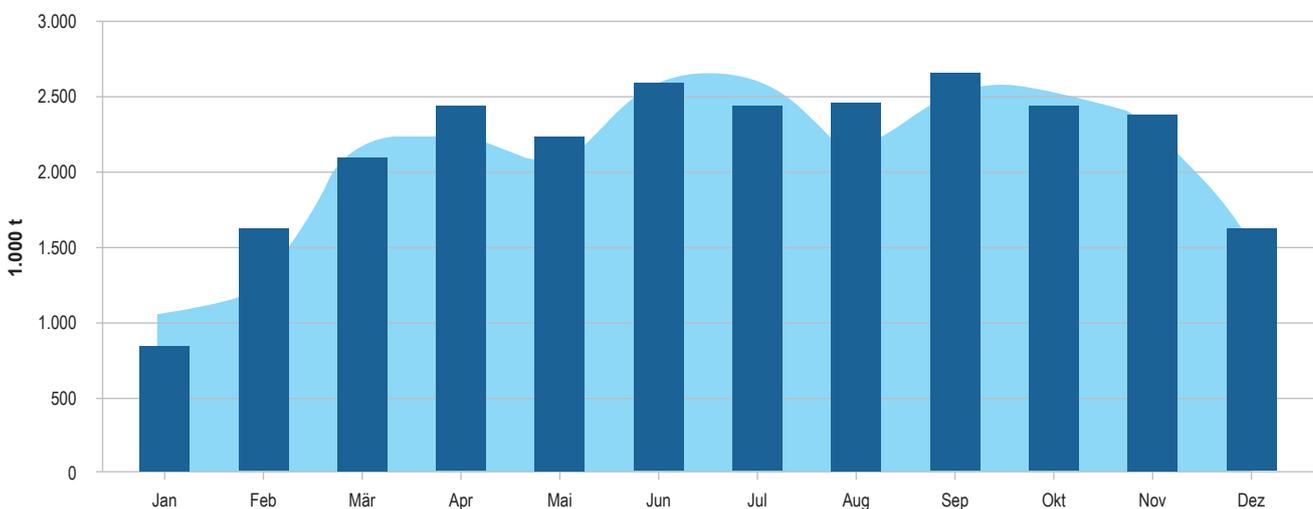


Abbildung 4.6: Zementversand Inland (Monatsdaten) [14] ■ 2015 ■ 2016  
Quelle: VDZ

Anmerkung: 1996–2011 Versand der BDZ-Mitgliedsunternehmen (ab 2004 geänderter Berichtskreis); ab 2012 Versand der VDZ-Mitgliedsunternehmen, Berichtskreisänderungen 2013, 2016

Die installierte Leistung des Hauptantriebs von Zementmühlen liegt bei durchschnittlich 2.250 kW [9]. Tatsächlich abgerufen werden etwa 2.050 kW [8] inklusive Nebenantrieben. Abhängig von der Mühlengröße und -konfiguration sind hierin etwa 17 % Antriebsleistung von Nebengaggregaten [15] beinhaltet. Ein Teillastbetrieb ist in den meisten Fällen nicht möglich. Die Kapazität einer durchschnittlichen Anlage liegt bei 40 t/h [14]. Oft werden mehrere, z. B. vier, verschiedene Zementsorten auf einer Mühle produziert. Aufgrund unterschiedlicher Zementsorten und fluktuierender Materialeigenschaften der Einzelkomponenten die auf der Mühle gemahlen werden kann es zu Schwankungen im Durchsatz kommen.

Im Fall eines Sortenwechsels wird in vielen Fällen der Zement in das Silo des Zementes der geringeren Qualität transportiert, bis die Qualität des höherwertigen Zementes erreicht wurde. In anderen Fällen existieren spezielle Abmahlsilos für die Übergangszeiträume. Materialien aus diesen

Silos werden später i. d. R. vollständig in den Zementherstellungsprozess rezirkuliert und dadurch ein Materialausschuss vermieden. Ein zusätzlicher Arbeitsbedarf von etwa 1 bis 2 kWh/t kann hierdurch entstehen. Die Dauer des Sortenwechsels sollte 30 bis 45 Minuten bis zur Stabilisierung des Betriebs nicht überschreiten.

Der Zementmühle im integrierten Zementwerk vorgeschaltet sind ein oder mehrere Silos für den Hauptbestandteil Klinker, welche als nicht limitierend für die Flexibilisierung der Zementmahlung angenommen werden. Die Größe der Silos für weitere Zementhauptbestandteile ist stark von der jeweiligen Anlagenentwicklung und dem Produktportfolio abhängig. Vor dem Hintergrund fehlender Möglichkeiten zur konkreten Bewertung wurden die Silokapazitäten für weitere Hauptbestandteile zunächst auch als nicht limitierend angenommen. Auf der Produktseite wird die Kapazität der Zementsilos in integrierten Zementwerken im Mittel mit etwa 35.000 t [14] eingeschätzt, wobei besonders bei Neuinstallationen wesentlich höhere Lagerkapazitäten bekannt sind. Mahlwerke verfügen tendenziell über kleinere Silokapazitäten von im Mittel etwa 22.000 t [14] Kapazität. Gerade bei Silokapazitäten sind Zusammenhänge schwer herzustellen und standortabhängige Gegebenheit und Faktoren für die Anlagengestaltung sehr groß.

### 4.3 METHODIK DER DATENERHEBUNG

Für die Bestimmung von Potentialen zum flexiblen Energieeinsatz in der Zementindustrie wurden die Zerkleinerungsprozesse als relevante Referenzprozesse identifiziert. Grundlage hierfür ist einerseits der hohe spezifische Einsatz elektrischer Energie für die Zerkleinerung und andererseits die weitreichende Entkopplung der Mahlprozesse von dem kontinuierlichen und wesentlich energieintensiveren thermischen Prozess der Klinkerherstellung durch vor- und nachgelagerte Materialspeicher in Form von Silos.

Für die Modellierung und Abschätzung der technischen Flexibilitäts-potentiale wurden zunächst die statistischen Daten der deutschen Zementindustrie herangezogen [1], [4] (Tabelle 4.1). Anhand der Daten zur Produktion und zum Energieeinsatz wurde für die beiden unterschiedlichen Arten von Zementwerken (Mahlwerk: Modell 1, integrierte Werke mit Klinkerproduktion: Modell 2) jeweils mittlere Größen bestimmt [14], so dass in Summe mit der Statistik konsistente Einschätzungen möglich werden. Diese sind jedoch im Prinzip nicht in der Lage, die spezifischen Gegebenheiten eines einzelnen Standorts wiederzugeben. Die Berechnung anhand mittlerer Modellwerte kann spezifische Einschränkungen von technischen Potentialen ggf. nur unvollständig darstellen. Insofern müssen die Ergebnisse in Summe prinzipiell als Maximalabschätzung betrachtet werden und vor Anwendung in einem Einzelfall weiter relativiert und u.U. deutlich eingeschränkt werden.

	Einheit	Übersicht Zementindustrie 2014 [4]	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Zementproduktion	Mt	32,1	Zementmahlung	Zementmahlung
Klinkerproduktion	Mt	23,9		Rohmahlung
Anzahl der Werke		55	21	34
Elektrischer Energieeinsatz	MWh	3.570.000		

Tabelle 4.1: Daten der Zementindustrie in Deutschland für die Bestimmung der Referenzprozesse

Als weitere Datenquelle wurden Informationen aus den Expertengremien des VDZ, insbesondere aus dem Arbeitskreis Zerkleinerung [16] genutzt, um spezifische technische Parameter zu den Zerkleinerungsprozessen in Zementwerken zu bestimmen. Dies bezieht sich insbesondere auf die Bestimmung von Anlagengrößen und den Leistungsdaten und Kapazitäten von Mühlen und Silos. Die Verbindung aller Daten und Erfahrungen des VDZ aus Audits zum Energiemanagement in Zementwerken erlaubte eine Einschätzung zur Auslastung und Nutzung von Mühlen und Silos. Als Vereinfachung wurde angenommen, dass die Flexibilität im Wesentlichen durch das Zusammenwirken von Produktionskapazität und Produktspeicherkapazität bestimmt wird. Wesentlich sind demnach die Größe und Kapazität folgenden Anlagenteile:

- Rohmühle, Rohmehlsilos und spezifischer Energieeinsatz für den Rohmahlprozess
- Zementmühlen, Zementsilos und spezifischer Energieeinsatz für den Zementmahlprozess

Alle Eingangsdaten für die Modellierung wurden weiterhin in den vom VDZ durchgeführten Expertengesprächen [7] durch spezielle Interviewfragen und durch Diskussion der Modellannahmen überprüft und bei Bedarf weiter angepasst. Ein erstes informelles Expertengespräch diente der Überprüfung des Modellansatzes. Im weiteren Projektverlauf wurden drei je mindestens einstündige Gespräche mit Unternehmensexperten aus dem Fachgremium des VDZ durchgeführt und in Protokollen vom VDZ ausgewertet. Grundlagen der Expertengespräche waren insbesondere:

- Beschreibung der Referenzprozesse in der Zementindustrie (VDZ)
- Eingangsdaten und erste Ergebnisse der Auswertung des VDZ-Modells
- Eine für die Gespräche konkretisierte Beschreibung und durch Beispiele ergänzte Darstellung der drei Anforderungsprofile für kurz-, mittel- und langfristige Lastanpassungen (FFE, VDZ)
- Ein mit den Projektpartnern branchenspezifisch zugeschnittener Katalog an Fragen zu technischen, praktischen, organisatorischen und ökonomischen Voraussetzungen und Hemmnissen des flexiblen Energieeinsatzes (VDZ, FFE, WI)

In dem angepassten VDZ-Modell wurde eine quantitative Auswertung zur Einschätzung der technischen Flexibilitätspotentiale für das Modell 1: Mahlwerk und das Modell 2: Integriertes Zementwerk und für die Anforderungsprofile 1 und 2 durchgeführt (Kapitel 4.5). Die Ergebnisse wurden anhand der protokollierten Informationen der Experteninterviews [7] auf Plausibilität überprüft.

Eine ergänzende Auswertung für das langfristige Anforderungsprofil 3 und die Anwendung eines einfachen Batteriemodells haben gezeigt, dass die Einschätzung langfristiger Flexibilitätspotential zusätzliche technische Einschränkungen berücksichtigen muss. Diese ergeben sich aus der saisonal unterschiedlichen Nutzung und Auslastung der Produktions- und Speicherkapazitäten, und aus der differenzierten Produktion und Lagerung einzelner Zementsorten. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Untersuchungen wurden qualitativ zusammengefasst (Kapitel 4.5.3). Eine genauere Untersuchung anhand von konkreten Unternehmensdaten und Zeitreihen ist für die geplante Weiterführung des Projekts vorgesehen.

Die Identifikation wesentlicher Hemmnisse (Kapitel 4.6) wurde vor allem anhand der Expertengespräche unter Federführung des VDZ und mit Beteiligung der wissenschaftlichen Partner vorgenommen.

#### 4.4 VDZ MODELL ZUR EINSCHÄTZUNG DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENTIALE

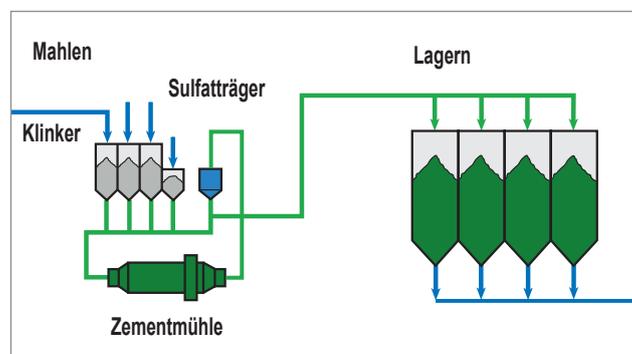
Zur übergreifenden Beschreibung des technischen Flexibilitätspotentials der Mahlanlagen in Zementwerken in Deutschland wurden vom VDZ zwei Modellansätze entwickelt. Hierbei wurden für alle 34 Zementwerke mit eigener Klinkererzeugung der Betrieb beider Referenzprozesse, d. h. Rohmahlung und Zementmahlung, angenommen. Werke mit Klinkerproduktion werden in dieser Studie als integrierte Zementwerke bezeichnet (Abbildung 4.2 blaue Punkte, Modell 2). Bei den 21 Zementwerken ohne eigene Klinkererzeugung handelt es sich um Mahlwerke (Abbildung 4.2 weiße Punkte, Modell 1). Diese erhalten die Mahlgüter meist aus anderen Werken und von externen Zulieferern. In der Regel wird Klinker mit weiteren Bestandteilen wie in integrierten Zementwerken zu Zementen vermahlen oder bereits fertige Zemente werden vor Ort mit weiteren gemahlten Hauptbestandteilen zu Kompositzementen gemischt. Im Modell wird für Mahlwerke nur der Referenzprozess Zementmahlung angenommen. Hierbei wird im Vergleich mit den integrierten Werken im Mittel von einer etwas niedrigeren Zementproduktion und geringeren Anzahl an Zementmühlen ausgegangen. Beim Zementwerk in Rostock handelt es sich um ein Zementmischwerk und Versandterminal ohne Mühlenbetrieb. Die im Modell für das Jahr 2014 und 21 Werke ohne Klinkerproduktion gemittelte Zementproduktion kann für die Zementproduktion in Rostock hinsichtlich der Zementmahlung und des hierfür nötigen Einsatzes elektrischer Energie statt am Standort Rostock ersatzweise bei den Standorten Lägerdorf und Höver des gleichen Zementunternehmens verortet werden.

Im Modell werden die Annahmen zur Produktion und Nachfrage des Produktes mit den effektiv nutzbaren Silokapazitäten in Beziehung gesetzt. Dieses Vorgehen entspricht einem einfachen Batteriemodell [17], in dem die Silokapazität und ihre Füllung mit Produkt als Speicher genutzt wird. Für drei unterschiedliche Betriebssystemen (Hauptsaison, Nebensaison, Revisionszeit) ergeben sich so unterschiedliche technische Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz. Insgesamt können die modellierten mittleren Werte nicht die standortspezifischen Gegebenheiten und Betriebsweisen der einzelnen Werke wiedergeben. Dennoch erlauben Sie eine erste Einschätzung der technischen Potentiale für gemittelte modellhafte Annahmen für die beiden unterschiedlichen Arten von Zementwerken und eine grobe räumliche Verortung von möglicherweise umsetzbaren technischen Potentialen zum flexiblen elektrischen Energieeinsatz. Eine erste Einschränkung des technischen Potentials erfolgt durch die Fokussierung auf den flexiblen Betrieb einer großen Mühle je Werk. Hierdurch wird der spezifische organisatorische Aufwand in der Betriebspraxis klein gehalten. Dieser Ansatz wird durch Erfahrungen mit ersten Projekten in der Zementindustrie bestätigt [7]. Soweit möglich sind Voraussetzungen und Hemmnisse, die das eingeschätzte technische Flexibilitätspotential praktisch und ökonomisch weiter einschränken, in den Kapiteln 4.5 bis 4.7 beschrieben. Tatsächlich in der Betriebspraxis nutzbare und ökonomisch realisierbare Potentiale sind grundsätzlich geringer als die modellierten und technischen Potentiale einzuschätzen. Insbesondere muss auch eine theoretische Hochrechnung von technischen Potentialen eines Werkes auf die Summe der Werke in Deutschland zur Einschätzung eines maximalen technischen Potentials (Kapitel 4.5.4 und 4.5.5) durch erforderliche werksspezifische Voraussetzungen sowie praktische und ökonomische Hemmnisse weiter eingeschränkt werden.

#### 4.4.1 PRODUKTIONSKAPAZITÄT

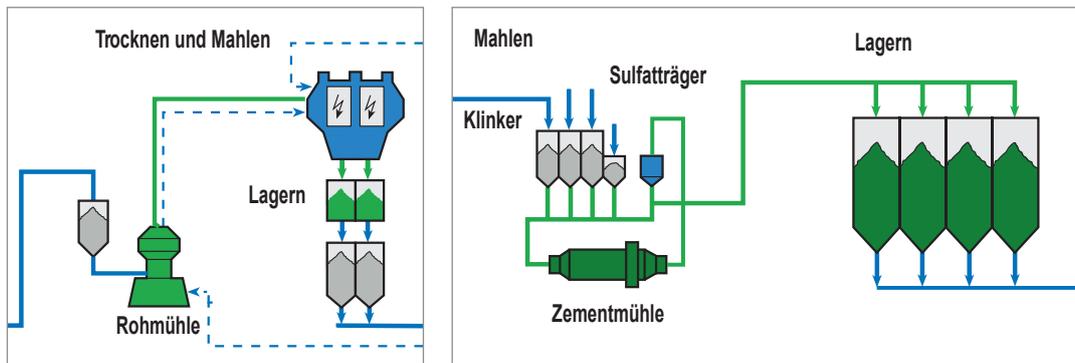
Im Modell 1 wird für ein Mahlwerk in Deutschland angenommen, dass dieses im Mittel über 2,4 Mühlen verfügt, welche im Modell vereinfacht zu einer Mühle entsprechender Kapazität zusammengefasst wurden (Abbildung 4.7). Die Produktionskapazität wurde mit 97 t/h Zement abgeschätzt.

Abbildung 4.7: Schematische Darstellung  
Modell 1: Mahlwerk mit Zementmahlprozess



Im Modell 2 verfügt ein durchschnittliches integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion in Deutschland über eine Rohmühle und 3,8 Zementmühlen. Die Rohmühle hat eine Kapazität von etwa 166 t/h zur Herstellung von Rohmehl für die Klinkerproduktion. Auch im Modell 2

wird zunächst davon ausgegangen, dass die Zementmühlen als Einheit auf Lasterhöhungen und -reduktionen reagieren. In der Praxis zeigt sich, dass Aufgrund gegebener Anlagenkonfigurationen einige Mühlen gewisse Anlagenkomponenten teilen. Die Flexibilisierung dieser Mahlanlagen wäre in diesen Fällen nur im Verbund möglich. Die Zementmühlen werden im Modell 2 zusammengefasst als eine Mühle mit einer Produktion von im Mittel etwa 151 t/h Zement dargestellt (Abbildung 4.8).



In Modell 1 und 2 werden die Speicherkapazitäten der Ausgangsstoffe im Klinkerlager bzw. Rohsteinlager als nicht limitierend angenommen. Die wesentlichen Modellparameter der Referenzprozesse für den flexiblen elektrischen Energieeinsatz wurden anhand der im VDZ verfügbaren statistischen und technischen Daten als Mittelwerte abgeschätzt und sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Abbildung 4.8: Schematische Darstellung Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Rohmahlprozess und Zementmahlprozess

	Einheit	Modell 1: Mahlwerk	Modell 2: Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Referenzprozesse für flexiblen elektrischen Energieeinsatz		Zementmahlung	Rohmahlung, Zementmahlung
Zementmühlen	Anzahl	2,4	3,8
Rohmühlen	Anzahl		1
Spez. Energiebedarf Zementmahlung	kWh/t Zement	51	51
Spez. Energiebedarf Rohmahlung	kWh/t Rohmehl		18
Installierte Leistung Hauptmotoren	MW	5,5	11,4
Abgerufene Leistung inkl. Nebenaggregaten	MW	5,0	10,7

Tabelle 4.2: Beschreibung der Mühlen in den VDZ Modellen 1 und 2

### 4.4.2 SAISONALE NUTZUNG DER PRODUKTIONSKAPAZITÄT

Die Zementproduktion zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Saisonalität der Baubranche (siehe Abbildung 4.9). Der Betrieb der Zementmühlen wird dieser Saisonalität angepasst. Im Sommer wird die Produktionskapazität der Zementmühlen zur Herstellung absatzstarker Produkte oft vollständig ausgenutzt. Hierbei müssen möglicherweise notwendige Wartungsarbeiten, z.B. während einer Schicht pro Woche, berücksichtigt werden.

Die Rohmahlung zeigt keine starke saisonale Abhängigkeit, da die Rohmahlung direkt mit der kontinuierlichen Klinkerproduktion im Drehrohrofen verknüpft ist. I.d.R. wird ein ca. einmonatiger Stillstand der Klinkerproduktion für eine Revision innerhalb der Saison mit schwacher Nachfrage im Winter eingeplant. Vereinzelt wurde die Verschiebung der Winterreperatur diskutiert, allerdings ist die Terminfindung nicht flexibel, u.a. da sie von externen Dienstleistern, der Urlaubs- und Schichtplanung sowie der Zementnachfrage abhängig ist. Darüber hinaus gibt es nur selten z.B. in Phasen schwacher Konjunktur langfristig geplante Stillstände des Drehrohrofens.

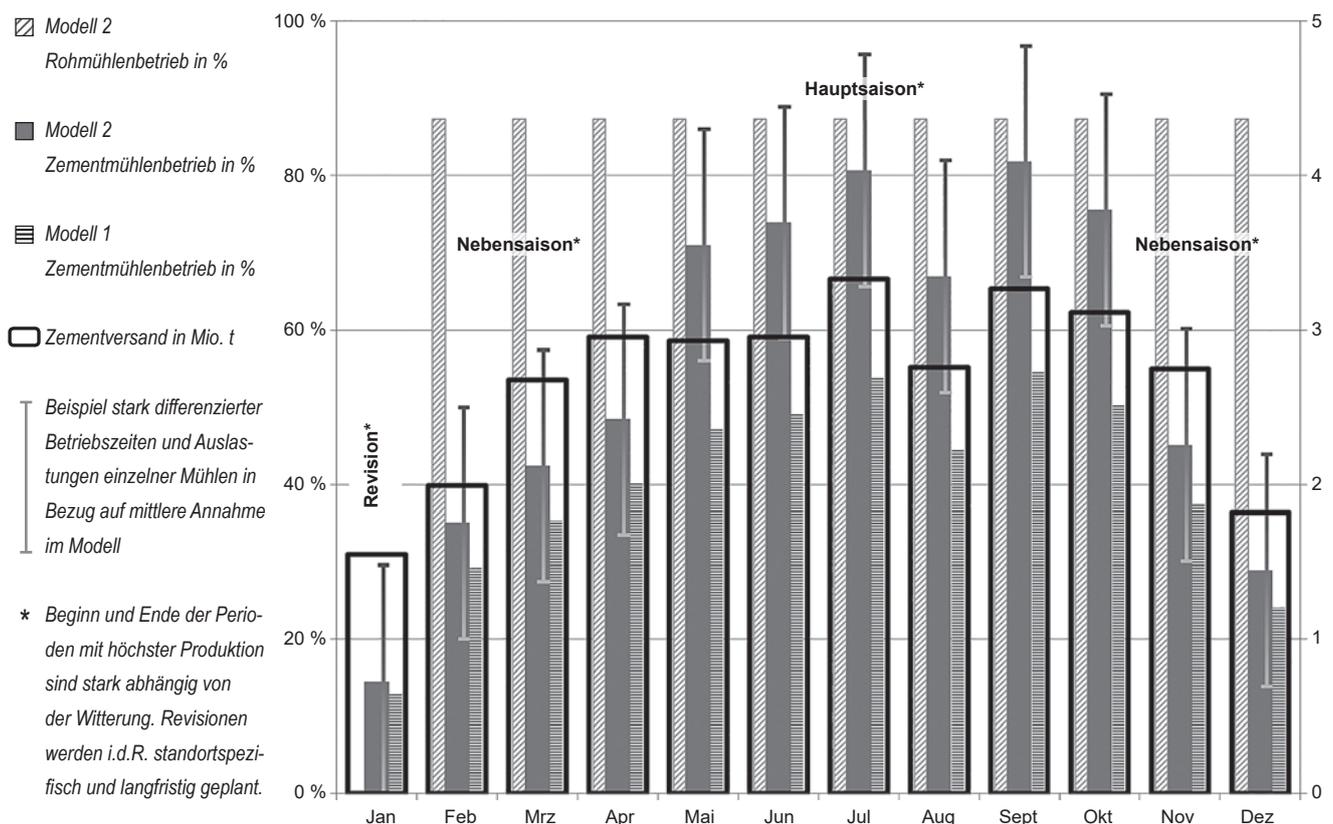


Abbildung 4.9: Geschätzter Verlauf des Mühlenbetriebs für Modell 1 und 2 und des Zementversands von Zementwerken in Deutschland

Die in Abbildung 4.9 dargestellten anteiligen Betriebszeiten sind als mittlere Modellannahmen zu verstehen. Standort- und marktbedingt können deutliche Abweichungen ergeben. Auch innerhalb eines Werkes kann sich die Auslastung einzelner Mühlen je nach Produktnachfrage stark unterscheiden. Dementsprechend wurde für die Auswertung der saisonal variierenden Mühlennutzung ein weiter Schwankungsbereich abgeschätzt. Dieser ist exemplarisch für Modell 2 und den Zementmüh-

lenbetrieb in Abbildung 4.9 dargestellt. Zur weiteren Berücksichtigung der Variation zwischen einzelnen Werken wurden außerdem für Modell 1 und 2 z. T. unterschiedliche Annahmen getroffen (Kapitel 4.2.2, Tabelle 4.3), ohne dass diese eindeutig einem unterschiedlichen Betrieb von Mahlwerken und integrierten Zementwerken zuzuordnen sind.

Tabelle 4.3: Geschätzte Mühlennutzung in Deutschland, 2014

	<b>Modell 1: Zementmühlen</b>	<b>Modell 2: Zementmühlen</b>	<b>Modell 2: Rohmühle</b>
<b>Hauptsaison</b>	30–70 %	50–100 %	75–100 %
<b>Nebensaison</b>	10–55 %	15–65 %	65–100 %
<b>Revisionszeit</b>	0–35 %	0–35 %	0 %

#### 4.4.3 PRODUKTSPEICHERKAPAZITÄT IN SILOS

Als weitere Voraussetzung für eine flexible Nutzung der Produktionskapazität wurden für die Modellierung mittlerer Speicherkapazitäten und die technischen Möglichkeiten zu ihrer Nutzung abgeschätzt. Einschätzungen zu regelmäßig möglichen Minimalbeständen ergeben sich aus den technischen Voraussetzungen zur sicheren Entleerung und der erforderlichen Produktverfügbarkeit. Diese sollte in der Hauptsaison höher liegen. Für die Rohmehlsilos ergeben sie sich weiterhin aus der notwendigen Betriebssicherheit für einen Neustart des Drehofens zur Klinkerherstellung im Fall eines Ofenstillstands, weil die Rohmehlproduktion hinsichtlich der Rohmaterialtrocknung selbst vom Ofenbetrieb abhängig ist (Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Geschätzte Silogrößen und -nutzung

	<b>Modell 1:</b>	<b>Modell 2:</b>	
	<b>Zementsilos</b>	<b>Zementsilos</b>	<b>Rohmehlsilos</b>
<b>Anzahl der Zement- oder Rohmehlsorten</b>	5 bis 10	5 bis 20	1 bis 3
<b>Summe der Silogröße im Modell in t</b>	22.900	35.500	10.500
<b>Maximalbestand</b>	90 %	90 %	90 %
<b>Minimalbestand, - technisch</b>	25 %	25 %	35 %
<b>- in der Hauptsaison</b>	50 %	50 %	50 %
<b>- in der Revisionszeit</b>	25 %	25 %	75 %

## 4.5 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

### 4.5.1 KURZFRISTIGE FLEXIBILITÄT NACH ANFORDERUNGSPROFIL 1

<sup>1</sup> Die Begriffe „positive Regelleistung und -energie“ werden in Kapitel 4 in Bezug auf eine Flexibilität zur Lastminderung und entgegengesetzt die Begriffe „negative Regelleistung und -energie“ in Bezug auf eine Flexibilität zur Lasterhöhung verwendet. Im Glossar des Synergieprojekts (V6) [18] werden entsprechend hierfür die Begriffe Leistungspotential und Energiepotential verwendet, um eine Verwechslung mit eng gefassten Begriffen der Primär- und Sekundärregelung im Bereich des Strommarktes zu vermeiden. Hierbei bezeichnet ein „positives Leistungspotenzial“ eine Flexibilität zur Lastminderung, und ein „negatives Leistungspotenzial“ eine Flexibilität zur Lasterhöhung. Daran angelehnt könnten die Möglichkeiten für flexibel eingesparte/eingesetzte Energie auch als „positives/negatives Energiepotential“ einer Lastreduktion/Lasterhöhung bezeichnet werden.

Tabelle 4.5: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 1

Für die kurzfristige Flexibilität der Roh- und Zementmahlung ergibt sich technisch ein unterschiedliches Bild für eine positive Regelleistung (Lastminderung) und eine negative Regelleistung (Lasterhöhung)<sup>1</sup>. Während eine kurzzeitige Abschaltung der Mühlen technisch möglich ist, benötigt der Start des Mühlenbetriebs insbesondere bei den Zementmühlen eine Aufwärmphase und ausreichend lange Betriebsdauer, damit sich ein stabiler Produktionsbetrieb einstellt und die Materialien ausreichend getrocknet werden. Zusätzlich ist ein ungeplanter Mühlenstart mit erheblichem organisatorischen Aufwand verbunden und benötigt i.d.R. zusätzliches Personal in Bereitschaft (Kapitel 4.6.5). Für einen effektiven und stabilen Mühlenbetrieb mit gesicherter Produktqualität werden auch im Nachgang zu einer kurzfristigen Abschaltung mindestens 4 Stunden andauernder Betrieb angesetzt. Gleichzeitig sollte eine kurzfristige Abschaltung auf ca. 1 bis 2 Stunden begrenzt werden, um ein weitreichendes Auskühlen der Mühlen und Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden.

Für Modell 1 und 2 ergibt sich entsprechend nur für die positive Regelleistung ein kurzfristiges technisches Flexibilitätspotential (Tabelle 8.5, Tabelle 8.6). Die Produktspeicherkapazität ist ausreichend groß um kurzfristige Abschaltungen der Mühlen überbrücken zu können, wenn wie im Produktionsbetrieb eines Zementwerks üblich, möglichst volle Silosstände angestrebt werden. Die Einschätzung der maximalen Regelenergie ergibt sich aus der maximalen Dauer der kurzfristigen Lastminderung und entsprechend der Beschreibung des Anforderungsprofils 1.

Positive Regelleistung durch kurzfristige Lastminderung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale positive Regelleistung (Volllast)	MW	5,0	7,7	3,0	10,7
Einschätzung zur Dauer der Lastminderung entsprechend Anforderungsprofil 1	Stunden	0,25 bis 2	0,25 bis 2	0,25 bis 2	0,25 bis 2
Einschätzung zum minimalen zeitlichen Abstand zwischen Lastanpassungen	Stunden	> 4	> 4	> 4	> 4
Maximale positive Regelenergie (Volllast)	MWh	1,25 bis 10	1,9 bis 15	0,75 bis 6	2,7 bis 21

Negative Regelleistung durch kurzfristige Lasterhöhung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale negative Regelleistung (Volllast)	MW	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar, erforderliche Betriebszeit > 4 Stunden	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar, erforderliche Betriebszeit > 4 Stunden	i.d.R. nicht verfügbar	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar, erforderliche Betriebszeit > 4 Stunden
Einschätzung zur Dauer der Lasterhöhung	Stunden				

Tabelle 4.6: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für kurzfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 1

## 4.5.2 MITTELFRISTIGEN FLEXIBILITÄT NACH ANFORDERUNGSPROFIL 2

Die Einschätzung der technischen Potentiale zur mittelfristigen Flexibilität nach Anforderungsprofil 2 erfordern eine weitere Untersuchung der Speicherkapazitäten in Silos und der produktionstechnischen und organisatorischen Voraussetzungen. Der maximale Speicherinhalt beschreibt rein theoretisch den Regelenergieinhalt der Produktmenge zwischen technisch möglichem minimalem und maximalen Silofüllstand. Um gleichzeitig positive und negative Regelleistung einzurichten, sollten mittlere Silostände zwischen einem praktikablen Minimal- und Maximalbestand angestrebt werden. Füllung und Leerung der Silokapazitäten erlauben dann eine mittelfristige Lastminderung oder -erhöhung in der Zementmahlung nach Anforderungsprofil 2 über 3 bis 12 Stunden (Tabelle 4.7, Tabelle 4.8). Durch die dauerhafte Speicherung im Produkt Zement können Produktionszeiten theoretisch über sehr lange Zeiträume verschoben werden. Praktisch und organisatorisch wird die Einhaltung von Produktionsplänen ein Nachholen innerhalb weniger Tage erforderlich machen.

Eine gleichzeitige Laständerung an allen Zementmühlen scheint als Maximalszenario zwar theoretisch möglich, wäre allerdings mit großem organisatorischen Aufwand und starken Einschränkungen und Eingriffen in die Produktionsplanung und diesbezügliche Schichtplanung verbunden. Praktikabler und hinsichtlich des organisatorischen Aufwands sehr viel effizienter erscheint deshalb die Nutzung des Flexibilitätspotentials und der Regelleistung einer großen Mühle. Oft wird eine Mühle mit hoher Produktionskapazität für die Produktion der Hauptsorte(n) der Produkte eines Zementwerkes genutzt. Für die Lagerung der Hauptsorte(n) sind meist große oder mehrere Silos eingerichtet. Der regelmäßige eingeplante Produktionsbetrieb für die Hauptsorte(n) lässt einen geringeren Aufwand zur organisatorischen Anpassung und bessere Verfügbarkeit zur Flexibilität vermuten. Voraussetzung ist, dass die Mühle unabhängig von anderen Anlagenteilen ein und ausgeschaltet werden kann. Wenn lediglich die größte Mühle für den flexiblen Betrieb eingesetzt wird, reduzieren sich Regelleistung und Regelenergie entsprechend (Tabelle 4.7, Tabelle 4.8). Die Mühlen sind technisch i.d.R. auf die Produktion bestimmter Zementsorten ausgelegt und optimiert. Es stehen also für die Produkte einer Mühle i.d.R. nicht alle Silos mit ihrer Speicherkapazität zur Verfügung. Es kann in erster Näherung davon ausgegangen werden, dass in Bezug auf die Produktionskapazität einer große Mühle

die für ihre Produkte verfügbare Silokapazität verhältnismäßig ähnlich groß ist, wie im Verhältnis für alle Mühlen und alle Zementsilos angenommen.

Im normalen Betrieb eines Zementwerks ist es vorteilhaft Materiallager in Silos möglichst gut gefüllt zu haben. Dann können etwaige Störungen im Produktionsbetrieb durch ausreichende Vorräten gut überbrückt werden. Auch deshalb muss ein Produktionsausfall durch Lastverschiebung innerhalb weniger Tage (nach Möglichkeit ein bis drei Tage) wieder ausgeglichen werden. Dies gilt besonders für die Bevorratung von Rohmehl, dessen ausreichende Verfügbarkeit (mindestens eine Tagesproduktion) eine wichtige Voraussetzung für den kontinuierlichen Klinkbrennprozess darstellt. Für die Rohmahlung muss das Potential zur Lastreduktion weniger entsprechend der Bevorratung (z.B. 12 Stunden) sondern eher anhand der beschränkten Möglichkeit zum Nachholen der Produktion bei hoher Kapazitätsauslastung der Rohmühle eingeschätzt werden (geringes bzw. ggf. fehlendes Potential, 0 Stunden, Tabelle 4.7). Aufgrund dieser Bedingung scheint weiterhin eine Beendigung der Lastverschiebung nach 24 Stunden erforderlich. Die oft einmonatige Revision der Ofenanlage bedingt gleichzeitig den geplanten Stillstand der Rohmühle, so dass bei der Rohmahlung während der Revisionszeit kein Flexibilitätpotential verfügbar ist. Entsprechend der möglichst vollständigen Füllung der Rohmehlsilos ist bei der Rohmahlung auch mittelfristig i.d.R. kein negative Regelleistung durch Lasterhöhung verfügbar (Tabelle 4.8).

Im Gegensatz hierzu wird für die Zementmahlung außerhalb der Hauptsaison ein Potential für mittelfristige negative Regelleistung eingeschätzt. Als Voraussetzung für eine effiziente Zementproduktion wird allerdings eine ununterbrochene Mühlenlaufzeit von mindestens vier Stunden erwartet (Tabelle 4.8).

Die beste Verfügbarkeit der technischen Flexibilitätpotentiale kann in Zeiten mittlerer Produktionsauslastung erwartet werden. Aus den geplanten Mühlenbetriebszeiten ergibt sich zudem eine höhere Wahrscheinlichkeit für die Möglichkeit zur Lasterniedrigung bei guter (zeitlich überwiegender) Auslastung und zur Lasterhöhung bei mäßiger Auslastung.

In Phasen besonders starker Produktnachfrage stellen aber auch bei der Zementmahlung einerseits die fast vollständig eingeplanten Mühlenlaufzeiten und andererseits die fehlenden Möglichkeiten zum Nachholen ausgesetzter Produktion bei unveränderter Produktionskapazität eine wesentliche Einschränkung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz dar.

Während der für die Zementmühlen vorgesehenen Revision ist oft ein Stillstand der Mühlen für schätzungsweise 1 bis 2 Wochen eingeplant und deshalb ggf. kein Potential zum flexiblen Stromeinsatz vorhanden. Unmittelbar vor und nach der Revision wird von einem eingeschränkten Potential ausgegangen, da der geplante Stillstand ggf. durch vor- und nachläufig festgelegte Produktionszeiten überbrückt werden muss.

Positive Regelleistung durch mittelfristige Lastminderung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale positive Regelleistung (Volllast)	MW	5,0	7,7	3,0	10,7
Positive Regelleistung (eine große Mühle je Werk)	MW	ca. 2,5	ca. 3,5	ca. 3,0	ca. 3,5
Einschätzung zur Dauer der Lastminderung entsprechend Anforderungsprofil 2	Stunden	3 bis 12	3 bis 12	0 bis 12	3 bis 12
Einschätzung zur möglichen zeitlichen Lastverschiebung	Stunden	ca. 48 bis 72	ca. 48 bis 72	ca. 24	ca. 24 bis 48
Theoretisch maximaler Speicherinhalt (alle Silos)*	MWh	610	950	100	1.030
Maximale positive Regelernergie (Volllast)	MWh	15 bis 60	23 bis 93	0 bis 36	32 bis 128
Positive Regelernergie (eine große Mühle je Werk)	MWh	ca. 8 bis 30	ca. 11 bis 42	ca. 0 bis 36	ca. 11 bis 42

#### Einschätzung der saisonalen Verfügbarkeit

Hauptsaison		bei sehr starker Auslastung ggf. nur eingeschränkt verfügbar (lange Nachholzeiten)			
Nebensaison		beste Verfügbarkeit bei guter Auslastung			
Revisionszeit		Potential eingeschränkt, bei geplanter Revision nicht verfügbar	Potential eingeschränkt, bei geplanter Revision nicht verfügbar	nicht verfügbar	Potential eingeschränkt, bei geplanter Revision nicht verfügbar

Tabelle 4.7: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lastminderung nach Anforderungsprofil 2

\* Für eine Abschätzung des Potentials zur angfristigen Lastanpassung nach Anforderungsprofil 3 sind eine sortenspezifische Nutzung der Mühlen und Belegung der Silos sowie der jeweils tatsächlich erreichte Füllstand einschränkend zu berücksichtigen.

Negative Regelleistung durch mittelfristige Lasterhöhung	Einheit	Modell 1:	Modell 2:		
		Mahlwerk	nur Zementmahlung	nur Rohmahlung	Integriertes Zementwerk mit Klinkerproduktion
Maximale negative Regelleistung (Volllast)	MW	-5,0	-7,7	i.d.R. nicht verfügbar	-7,7
Negative Regelleistung (eine große Mühle je Werk)	MW	ca. -2,5	ca. -3,5		ca. -3,5
Einschätzung zur Dauer der Lastminderung entsprechend Anforderungsprofil 2	Stunden	4 bis 12	4 bis 12		4 bis 12
Einschätzung zur möglichen zeitlichen Lastverschiebung	Stunden	ca. 48 bis 72	ca. 48 bis 72		ca. 48 bis 72
Maximale negative Regelenergie (Volllast)	MWh	-20 bis -60	-31 bis -93		-31 bis -93
Negative Regelenergie (eine große Mühle je Werk)	MWh	ca. -8 bis -30	ca. -11 bis -42		ca. -11 bis -42

**Einschätzung der saisonalen Verfügbarkeit**

<b>Hauptsaison</b>		bei sehr starker Auslastung i.d.R. nicht verfügbar (wenige geplante Zeiten ohne Betrieb/Last)			
<b>Nebensaison</b>		beste Verfügbarkeit bei mäßiger Auslastung	beste Verfügbarkeit bei mäßiger Auslastung	i.d.R. nicht verfügbar	beste Verfügbarkeit bei mäßiger Auslastung
<b>Revisionszeit</b>		bei geplanter Revision nicht verfügbar	bei geplanter Revision nicht verfügbar	nicht verfügbar	bei geplanter Revision nicht verfügbar

Tabelle 4.8: Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für mittelfristige Lasterhöhung nach Anforderungsprofil 2

### 4.5.3 EINSCHÄTZUNG DER TECHNISCHEN POTENTIALE ZUM FLEXIBLEN ENERGIEEINSATZ FÜR LANGFRISTIGE LASTANPASSUNGEN NACH ANFORDERUNGSPROFIL 3

Erste Ansätze zur Einschätzung der technischen Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz für langfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 3 wurden auf der Grundlage der Modelle 1 und 2 unternommen. Hierfür wurde unter anderem ein einfaches Batteriemodell angesetzt [17]. Die Analyse der Ergebnisse haben allerdings vielfältige Einflüsse der tatsächlichen Mühlennutzung auf das technische Potential gezeigt, die nicht ausreichend durch das Batteriemodell wiedergegeben werden. Eine weitere Untersuchung ist in der geplanten folgenden Projektphase vorgesehen. Vorläufig lassen sich folgende Erkenntnisse aus den ersten Ergebnissen zusammenfassen:

- Für eine Abschätzung des technischen Flexibilitätpotentials zur langfristigen Lastanpassung nach Anforderungsprofil 3 sind neben der Regelleistung gemäß des theoretisch maximal möglichen Speichergehalts aller Silos (Tabelle 4.7) die sortenspezifische Nutzung der Mühlen und Belegung der Silos sowie der jeweils tatsächlich erreichte Füllstand einschränkend zu berücksichtigen.
- Technische Potentiale für eine positive Regelleistung durch langfristige Lastminderung sind bei starker Auslastung (Hochsaison) im Prinzip am höchsten aber aufgrund der starken Produktnachfrage und der begrenzten Kapazitäten und Zeiten zur Nachholung ausgefallener Produktion i.d.R. nicht verfügbar oder stark eingeschränkt. Ähnliche Einschränkungen wurden für den flexiblen Rohmühlbetrieb und das Nachholen der Produktion bei hoher Kapazitätsauslastung der Rohmühle beschrieben (Kapitel 4.5.2).
- Die beste Verfügbarkeit ist bei einer mittleren Auslastung der Anlagen zur Zementproduktion zu erwarten.
- Die Verfügbarkeit positiver Regelleistung ist eingeschränkt in Zeiten mit geringer planmäßiger Produktion (Nebensaison) möglich. In der Hauptsaison sind lange Abrufungsdauern i.d.R. nicht möglich.
- In Zeiten der geplanten Revision sind durch den Anlagenstillstand keine Potentiale zur Lastanpassung verfügbar, bzw. der Einsatz elektrischer Energie ist nach Planung bereits minimal zu erwarten.
- Die Planung der Revisionszeiten in Abstimmung mit der längerfristigen Personalplanung des Werkes und Beauftragung externen Dienstleistern lässt i.d.R. keine zeitliche Verschiebung der Revisionszeiten im Zusammenhang mit dem Anforderungsprofil 3 und nach einer Ankündigungszeit von weniger als einer Woche zu. Eine strategische Planung der Revisionszeiten könnte allerdings die sehr langfristige erwartbare Nachfrage nach flexiblem Energieeinsatz nach Anforderungsprofil 3 neben vielen weiteren ausschlaggebenden Faktoren mit in Betracht ziehen.
- Aufgrund der nötigen Produktbevorratung und damit einhergehend geringer freier Silokapazitäten zur Aufnahme zusätzlicher Produkte werden zunächst keine Potentiale für eine langfristige negative Regelleistung durch andauernde Lasterhöhung in Zementwerken gesehen.

#### 4.5.4 EINSCHÄTZUNG MAXIMALER TECHNISCHER POTENTIALE ZUM FLEXIBLEN ENERGIEEINSATZ IN DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG IN DEUTSCHLAND

Die VDZ-Modelle 1 und 2 erlauben eine theoretische Hochrechnung zur Bestimmung maximaler technischer Flexibilitätspotentiale der beiden Referenzprozesse Rohmahlung und Zementmahlung für die Zementindustrie in Deutschland. Zu betonen bleibt, dass viele standortspezifische Einschränkungen des technischen Potentials für eine genauere Einschätzung notwendig wären.

Erfahrungen, die in benachbarten Ländern gemacht wurden, können hier als konkrete Beispiele fungieren. Dem VDZ ist ein Zementwerk bekannt, das die größte am Standort vorhandene Zementmühle bereits mit einem Flexibilisierungskonzept ausgerüstet hat, um nötigen Nachfragen seitens des Energieversorgers zur Lastreduktionen zu entsprechen. Im gegebenen Beispiel gab es kein starres Stromtarifmodell mit Hoch- und Niedertarifen (HT-/NT-Regelung). Vielmehr wurde eine vertragliche Vereinbarung mit dem Anbieter geschlossen, um Lastreduktionen bereitstellen zu können. Die Rahmenbedingungen wurden im Vorfeld festgelegt, hierzu zählen u.a.

- Ein Vetorecht seitens des Betreibers, d.h. der Betrieb bleibt garantiert.
- Mögliche Abschaltzeiträume werden eine Woche im Voraus gemeldet.
- Mögliche Abschaltzeiten von max. 4 Stunden wurden festgelegt, wobei diese i.d.R. auf 30 bis 90 min begrenzt blieben.
- Bei Nichterfüllung der Reduktionsforderung ist keine Strafe zu entrichten, was die Einführung eines derartigen Systems für die Zementhersteller wesentlich attraktiver macht.

Dearartig klare Rahmenbedingungen ohne erhebliche Nachteile für den Produktionsbetrieb erlauben eine Einschätzung der Risiken und sind für die Attraktivität und die Bereitschaft der Grundstoffindustrie zur Bereitstellung von Flexibilität besonders wichtig.

Vor diesem Hintergrund wurde die Einschätzung für die Regelleistung bei mittelfristigen Lastanpassungen nach Anforderungsprofil 1 und 2 auf das Potential einer großen Mühle pro Werk eingeschränkt (Tabelle 4.9). Weiterhin bleiben Hemmnisse und Voraussetzungen zur praktischen Umsetzung und hinsichtlich der ökonomischen Voraussetzungen, d.h. der ggf. nötigen Investitionen und der Kompensation des zusätzlichen Betriebsaufwands zu berücksichtigen (siehe auch Kapitel 4.4, 4.5 und 4.6).

	positive Regelleistung durch Lastminderung	negative Regelleistung durch Lasterhöhung	Zeiträumen der Lastanpassung
Einheit	MW	MW	Stunden
<b>Kurzfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofile 1 (eine große Mühle je Werk)</b>	ca. +172	i.d.R. nicht kurzfristig verfügbar	0,25 bis 2 Stunden, nachfolgend > 4 Stunden garantierter Betrieb und nachholen der Lastmin- derung
<b>Mittelfristige Lastanpassungen nach Anforderungsprofile 2 (eine große Mühle je Werk)</b>	ca. +172	ca. -172	4 bis 12 Stunden, Lastver- schiebung: ca. 48 Stunden

*Tabelle 4.9: Einschätzung maximaler technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für alle Werke entsprechend Modell 1 für Mahlwerke & Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.*

#### 4.5.5 ERGEBNISÜBERSICHT

Tatsächlich in der Betriebspraxis nutzbare und ökonomisch realisierbare Potentiale sind grundsätzlich geringer als die modellierten und technischen Potentiale einzuschätzen (Kapitel 4.4). Somit müssen die hier dargestellten technischen Potentiale und ihre theoretische Hochrechnung in Tabelle 4.10 durch erforderliche werksspezifische Voraussetzungen sowie praktische und ökonomische Hemmnisse weiter eingeschränkt werden. Soweit möglich sind Voraussetzungen und Hemmnisse, die das technische Flexibilitätspotential praktisch und ökonomisch weitere einschränken, in den Kapiteln 4.5 bis 4.7 beschrieben.

Referenzprozess, Modell	Branche, Werke	Regelleistung	Maximales Technisches Potential (Volllast)	mittlere Auslastung, Betriebsstunden pro Jahr
			MW	%, Stunden
Zementmahlung, Modell 1	Zementmahlwerke	Lasterhöhung (negativ)	-105	40 %, 3.500 Stunden
		Lastreduktion (positiv)	+105	40 %, 3.500 Stunden
Zementmahlung, Modell 2	integrierte Zementwerke	Lasterhöhung (negativ)	-263	57 %, 5.000 Stunden
		Lastreduktion (positiv)	+263	57 %, 5.000 Stunden
Rohmahlung, Modell 2	integrierte Zementwerke	Lasterhöhung (negativ)	0	80 %, 7.000 Stunden
		Lastreduktion (positiv)	+100	80 %, 7.000 Stunden
Zementmahlung, Modelle 1+2: alle Zementwerke	Zementindustrie	Lasterhöhung (negativ)	-470	
		Lastreduktion (positiv)	+470	

*Tabelle 4.10: Einschätzung technischer Potentiale zum flexiblen Energieeinsatz in der Roh- und Zementmahlung in Deutschland. Hochrechnung als Summe für Zementwerke in Deutschland entsprechend Modell 1 für Mahlwerke & Modell 2 für integrierte Zementwerke mit Klinkerproduktion.*

Technisches Potential (Lastverschiebung für eine große Mühle je Werk bei mittlerer Auslastung)			Eingeschränktes technisches Potenzial unter Berücksichtigung von 50 % Verfügbarkeit <sup>2</sup>	
MW	MW	MW	MW	MW
Anforderungsprofil 1 <sup>3</sup>	Anforderungsprofil 2 <sup>4</sup>	Anforderungsprofil 3 <sup>5</sup>	Anforderungsprofil 1	Anforderungsprofil 2
i.d.R. kein Potential	-52	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential
+52	+52	eingeschränkt <52	+26	+26
i.d.R. kein Potential	-120	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	-60
+120	+120	eingeschränkt <120	+60	+60
i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential
+100	+100	eingeschränkt <100	+50	+50
i.d.R. kein Potential	-172	derzeit i.d.R. kein Potential	i.d.R. kein Potential	-86
+172	+172	eingeschränkt <172	+86	+86

<sup>2</sup> unter der Annahme, dass zum Zeitpunkt der Abfrage die Hälfte der Anlagen für eine Lastanpassung zur Verfügung steht.

<sup>3</sup> i.d.R. keine kurzfristige Lasterhöhung möglich, Lastminderung 0,25 bis 2 Stunden, nachfolgend > 4 Stunden garantierter Betrieb und nachholen der Lastminderung

<sup>4</sup> nachholen bei Lastminderung erforderlich

<sup>5</sup> derzeit i.d.R. kein langfristige Lasterhöhung möglich, Potential zur Lastminderung ist anlagen-spezifisch und nach Lagerbestandssituation eingeschränkt

## 4.6 HEMMNISSE UND EINSCHRÄNKUNGEN DES TECHNISCHEN POTENTIALS

Die im Kapitel 4.5 ausgewiesenen technischen Potentiale stehen nicht an jedem Standort, nicht zu jeder Zeit und nur unter Voraussetzung entsprechender ökonomischer Rahmenbedingungen zur Verfügung. Des Weiteren erfordert ihre Hebung teilweise organisatorische Umstellungen. Hinweise auf die speziellen Voraussetzungen in Bezug auf die Anforderungsprofile 1 bis 3 finden sich bereits in Kapitel 4.5. Im Folgenden werden auf der Grundlage der Expertengespräche [7] wichtige Hemmnisse und Einschränkungen für die Nutzung der technischen Potentiale bezogen auf technische, organisatorische und ökonomische Aspekte zusammengefasst.

### 4.6.1 TECHNISCHE HEMMNISSE ZUR FLEXIBILISIERUNG DER ROHMÜHLEN

Der Betrieb der Rohmühle eines integrierten Zementwerkes unterliegt besonderen Anforderungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit des Drehrohrofens mit Rohmehl. In der Regel handelt es sich um Mahltrocknungsanlagen die weit überwiegend im sogenannten Verbundbetrieb mit dem Drehofen betrieben werden. Es ergeben sich hohe jährliche Einsatzstunden von oft ca. 7.000 Stunden/Jahr und – bezogen auf die Laufzeit des Drehrohrofens – oft mehr als 90 % Auslastung der Rohmühlen. Da die Rohmühlen demnach i.d.R. kontinuierlich in Betrieb sind, ist eine Bereitstellung von negativer Regelleistung durch Anschalten der Mühle in den meisten Werken nicht möglich.

Die Abschaltung dieser Mahlanlagen ist kritisch hinsichtlich einer optimalen Energienutzung im Verbundbetrieb der Rohmahlung mit der Klinkerproduktion und der Absicherung der nachgelagerten Klinkerproduktion. Dies gilt insbesondere, wenn die zwischengeschalteten Silos vergleichsweise geringe Kapazitäten oder geringen aktuellen Füllstand haben. Technische Probleme beim Wiedereinschalten der Mahlanlagen und Rohmehlproduktion können nicht vollständig ausgeschlossen werden. Deshalb ist ein ausreichend großer Vorrat an Rohmehl erforderlich, um jederzeit Material für einen Neustart des Drehrohrofens vorzuhalten. Rohmühlen verfügen i.d.R. nur über geringe Überkapazitäten und sind daher nur in den wenigsten Fällen in der Lage nicht stattgefundenen Produktion kurzfristig wieder nachzuholen. Das Potenzial zur regelmäßigen Bereitstellung von Regelenergie durch die Rohmühle(n) beschränkt sich daher auf wenige Standorte mit ausreichend großer Kapazität der Rohmühle(n) im Vergleich zur Kapazität des Drehrohrofens. Lediglich in Einzelfällen kann ein Teil der Mahltrocknung, beispielsweise bei einer vorhandenen externen Vor-Trocknung, flexibilisiert werden.

Der sogenannte Direktbetrieb des Drehrohrofens ohne Rohmühle ist auch im Hinblick auf Energieeffizienz und Emissionsreduktion ungünstiger, da im Verbundbetrieb bei der Mahltrocknung heiße Ofenabgase besonders energieeffizient zur Trocknung der Rohmaterialien verwendet

werden, und die hohe spezifische Oberfläche des Rohmehls gleichzeitig die Abgasreinigung unterstützt. Somit sprechen sowohl energetische wie auch emissionschutztechnische Gründe gegen eine häufige Abschaltung der Rohmühle.

#### 4.6.2 TECHNISCHE HEMMNISSE ZUR FLEXIBILISIERUNG DER ZEMENTMAHLUNG

Die Qualität des Zementes als Produkt ist von übergeordnetem Interesse für den erfolgreichen Betrieb eines Zementwerks. Eine Beeinträchtigung der Qualität ist daher technisch und ökonomisch nicht tolerierbar. Die Flexibilisierung der Zementmühlen kann unter Umständen diverse Probleme hinsichtlich der Zementqualität verursachen:

Die Entwässerung des bei der Zementmahlung beigefügten Sulfatträgers (z.B. Gips) ist entscheidend für die Qualität des Produkts Zement. Da die für die Entwässerung nötige thermische Energie durch den Mahlvorgang selbst erzeugt wird ist bei Stillständen die zeitliche Begrenzung thermischer Verluste in der Mahlanlage besonders wichtig. Ein starkes Auskühlen der Mühle sollte verhindert werden. Hierbei zeigen sich auch sortenabhängige Einflüsse. Werden sehr feuchte Hauptbestandteile (z.B. Hüttensand) mit vermahlen könnten längere Abschaltdauern (1 bis 4 Stunden) problematisch werden.

Bei Wiederanfahrvorgängen und Sortenwechseln stellt sich unter Umständen nicht direkt die gewünschte Produktqualität ein. In Übergangsphasen könnten sehr geringe Mengen des beim Anfahren erzeugten, unfertigen Produkts zwischengelagert werden. In begrenztem Umfang können diese durch erneute Verarbeitung später in ein verkaufsfertiges Produkt überführt werden, das dann die erforderlichen Qualitätsstandards sicher einhält. Dabei entstehen jedoch Mehraufwände für die Lagerung und die zumindest teilweise erneute Verarbeitung mit einem zusätzlichen Energieeinsatz von ca. 2 %.

#### 4.6.3 EINFLUSS DER SILOKAPAZITÄT

Die Entkopplung der Teilprozesse in der Zementproduktion durch Materiallager und Silos ermöglicht technisch eine teilweise Flexibilisierung. Pauschale Bewertungen der Lagerkapazitäten sind jedoch vor dem Hintergrund standortabhängiger Gegebenheiten und Einflüsse schwierig. Silos werden nach ihrer Gesamtkapazität ausgewiesen, allerdings zeigen sich statische Einschränkungen besonders bei älteren Silos, die zur Minimierung des Risikos einer Rissbildung ggf. nicht vollständig gefüllt werden können. Hierbei spielen auch Änderungen in der Normierung von Silobauwerken und den Bemessungsgrundlagen eine Rolle.

Besonders bei der Rohmehlproduktion ist die Lagerkapazität für eine kontinuierliche Klinkerproduktion im Drehrohrofen als kritische Größe zu betrachten. Der Füllstand der Silos ist entscheidend für die Betriebs-

sicherheit. Im normalen Betrieb wird der maximale Füllstand der Silos anvisiert. Um die Klinkerproduktion nicht zu gefährden, muss in jedem Fall genügend Rohmehl für 1 bis 2 Tage Klinkerproduktion zur Verfügung stehen. Entsprechend kann nur ein Teil der Silokapazität zur Flexibilisierung der Rohmühle genutzt werden (vgl. Tabelle 4.4). An einigen Standorten werden die Rohmehlsilos gleichzeitig als Homogenisierungssilos genutzt. In diesen Fällen ist eine Nutzung der Silokapazität zur Flexibilisierung meist nicht möglich.

Im Zementsilo muss eine Mindestmenge Material vorgehalten werden um einen sicheren Betrieb für die Entnahme zu gewährleisten. Durch die Hitze im Silo kann es zur Nachentwässerung des im Zement enthaltenen Gipses zu Halbhydrat kommen. Ist kein ausreichender Füllstand vorhanden, kann es dabei aufgrund unzureichender Dehydrierung zu Klumpenbildung (Vorhydratation des Zements) kommen. In einem durchschnittlichen Zementwerk werden etwa 10 bis 12 verschiedene Zementsorten in einer Vielzahl von Zementsilos gelagert. Die Größen der einzelnen Silos orientieren sich dabei üblicherweise an den Abnahmezahlen der Produkte, d.h. stark nachgefragter Zement (z.B. die Hauptsorte) wird oft im größten Silo gelagert. Es kann aber bedingt durch Großprojekte zu starker Nachfrage von anderen Zementen kommen. Die Produktion und Lagerhaltung wird dann dementsprechend angepasst. Ein großer Teil der Silokapazitäten werden für diesen flexiblen Betrieb zwischen Produktion und Abnahme und für eine hohe Lieferbereitschaft benötigt. Generell sind größere Silokapazitäten zur Steigerung der Flexibilität der Mahlanlagen vorteilhaft.

#### 4.6.4 ÖKONOMISCHE HEMMNISSE UND TARIFSYSTEME

Die Zementunternehmen in Deutschland sind seit langem durch eine langfristige und genaue kurzfristige Planung von Stromeinsätzen (Stromfahrplänen) ein klassischer Anbieter von Flexibilität im Strommarkt (Demand Side Management). Hierbei werden Zementmühlen vorwiegend im Niedertarif (NT) in der Nacht betrieben und Stillstandszeiten nach Möglichkeit im Hochtarif (HT) am Tag angesiedelt. Weiterhin werden Lastspitzen durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten von Maschinen mit großer Last vermieden.

In Deutschland sind momentan die ökonomischen Vorteile für die Zementbetriebe, die aus einer weiterführenden Flexibilisierung der Fahrweise gezogen werden könnten, nach Expertenmeinungen [7] zu gering, um eine entsprechende Entwicklung zu befördern. Dies wird durch aktuelle Erfahrungen in Zementunternehmen in Deutschland untermauert, die gezeigt haben, dass im HT/NT-Tarifsystem zusätzliche Vereinbarungen zur Nutzung von Flexibilitäten im Vergleich zum ökonomischen, organisatorischen und technischen Mehraufwand für den Betreiber eines Zementwerks meist nicht wirtschaftlich sind. Individuelle Lösungen z. B. durch direkte Beteiligungen an Kraftwerken sowie eigene Kraftwerke zum Ausgleich von Hochtarifzeiten sind jedoch in einigen Fällen bereits jetzt ökonomisch tragfähig. Erfahrungen aus Nachbarländern haben gezeigt, dass bei entsprechender Kompensation des ökonomischen Mehraufwands durch geeignete und zuverlässige Vertragsgestaltung die Flexibilisierung wirtschaftliche Potentiale aufweisen kann, und daher

auch entsprechenden Zuspruch bei Zementunternehmen findet. Alternativ sind in Deutschland einzelne Zementunternehmen regelmäßig an der Strombörse aktiv. Hierbei werden in Zeiten mäßiger Auslastung freie Produktionskapazitäten punktuell zur Flexibilisierung eingesetzt. Die hierbei oft nur für kurze Zeiträume erzielten Gewinne und Verluste durch niedrigere oder höhere Strombeschaffungskosten scheinen größere und langfristige Investitionen für eine Steigerung der Flexibilität nicht zur rechtfertigen.

Die Flexibilisierung der Roh- und Zementmahlung kann sich negativ auf den Verschleiß der Anlagen auswirken. Aus aktuellen Betriebserfahrungen ist aufgrund der relativ niedrigen Häufigkeit zusätzlicher Ein- und Abschaltvorgänge jedoch keine generelle Aussage möglich. Besonders die in Anforderungsprofil 1 aufgezeigte Perspektive kann die Häufigkeit der Ein- und Abschaltvorgänge jedoch stark vergrößern und könnte damit den Verschleiß stark erhöhen. Entsprechen müsste mit höheren Reparatur und Wartungskosten gerechnet werden. Eine praxisbezogene Bestimmung der Auswirkung flexibler bzw. häufigerer Anlagenschaltungen auf den Verschleiß wäre die nötige Grundlage für eine genauere Kostenschätzung und darauf aufbauende Wirtschaftlichkeitsrechnung.

Ein wichtiges ökonomisches Hemmnis stellen große Ungewissheiten bei der Entwicklung am Strommarkt dar. Um Flexibilität im Stromeinsatz zu ermöglichen sind i. d. R. langfristig zu amortisierende Investitionen seitens des Zementwerksbetreibers nötig. Entsprechend muss eine ausreichende Planungssicherheit bestehen, dass diese Investitionen ökonomisch langfristig tragfähig sind. Dies gilt insbesondere falls Silokapazitäten erweitert werden müssten, was sehr hohe Investitionen erfordern würde. Aus heutiger Sicht sind diese Investitionen nicht amortisierbar.

Ein weiteres ökonomisches Risiko ergibt sich aus möglichen Lastspitzen, die einen höheren Leistungspreis<sup>6</sup> nach sich ziehen. Wie oben beschrieben werden durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten großer Stromverbraucher Lastspitzen nach Möglichkeit vermieden. Eine Flexibilisierung erhöht hier den Abstimmungsbedarf zwischen Zementwerksbetrieb und Stromanbieter und damit die Wahrscheinlichkeit von Abstimmungsproblemen, die Möglichkeit für gravierende Fehler [20] und hierbei entstehende ökonomische Risiken. Um diese Risiken für die Zementwerkbetreiber zu reduzieren, könnten z. B. vertragliche Garantien gegeben oder Ausnahmeregelungen beim Leistungspreis berücksichtigt werden.

Besonders wichtig für den Zementhersteller sind ausreichende vertragliche Sicherheiten. Hierzu zählen unter anderem:

- Das Nachholen nicht stattgefundener Produktion während einer zuvor geplanten Abschaltzeit und Aufholen des Produktionsdefizits zur Sollproduktion muss gewährleistet werden.
- Nach Abschaltungen der Mahlanlagen muss i. d. R. eine kontinuierliche Betriebsdauer von mindestens 4 Stunden gewährleistet sein. Nur so kann ein stabiler Mühlenbetrieb und eine hohe gleichbleibende Qualität der Zementprodukte sichergestellt werden.
- Die Zwangsabschaltung der Anlagen gegen den Willen des Betreibers muss ausgeschlossen sein. Der Schutz der Anlagen und die Einhaltung von Lieferverpflichtungen sind von übergeordnetem Interesse.

<sup>6</sup> Der Leistungspreis ist Teil des Strompreises gewerblicher und industrieller Großverbraucher und ergibt sich nach der in einem bestimmten Zeitraum (z. B. ein Jahr oder ein Monat) maximal angeforderten Leistung (gemittelt über 15 Minuten).

### 4.6.5 PERSONALPLANUNG

Die Flexibilisierung der Zementmühlen hängt stark von den Möglichkeiten der Personal- und Schichtplanung ab. Die Personalplanung ist aktuell an die Bedingungen im Werk und das jeweilig verwendete Tarifmodell gekoppelt. Ein voll integriertes Werk wird von einer Besetzung von nur ca. 5 bis 6 Personen mit unterschiedlichen Kompetenzen und Möglichkeiten der wechselseitigen Vertretung betrieben. Je nach Standort und Auslastung läuft der Zementmühlenbetrieb häufig nur in einer oder zwei (von insgesamt 3) Schichten. Nach Angaben eines Experten [7] wird für diese Schichten – entsprechend dem Stromfahrplan üblicherweise Spät- bzw. Nachtschichten – eine zusätzliche Person zur Produktion eingeplant. In der Tagschicht wäre daher häufig kein Mitarbeiter eingeplant, der die Zementmühle betreiben könnte. Für eine regelmäßige kurzfristige Reaktion auf Änderungen im Strompreis müsste daher ggf. die Personaldecke erhöht werden („Springer“, Personal in Bereitschaft, Beispiel in Kapitel 4.7.1). Ein anderer Experte berichtete hingegen, dass in der Tagschicht generell mehr Personal im Werk ist, als in der Nachtschicht. Entsprechend wäre in der Tagschicht nicht mit einem Personalengpass zu rechnen, wenn im Bedarfsfall geeignet qualifiziertes Personal kurzfristig verfügbar ist.

Besonders um kurzfristigen Lastwechseln nach Anforderungsprofil 1 zu entsprechen wäre das Vorhalten entsprechenden Personals zur Bereitschaft nötig. In den meisten Werken wäre dies nur durch zusätzliches Personal und eine Erweiterung des aktuellen Schichtmodells für den Zementproduktionsbetrieb möglich. Höhere Personalkosten bei gleichzeitig steigenden Leerlaufzeiten des Personals wären als Konsequenz zu erwarten. Auch die Vorankündigungszeiten nach Anforderungsprofil 2 von einem Tag wären in der Regel nicht ausreichend um eine wöchentliche Personalplanung ohne zusätzlichen Aufwand und zusätzliches Personal in Bereitschaft umzustellen. Dies wurde unter anderem an einem konkreten Beispiel mit stark erhöhtem Stromangebot und negativen Börsenstrompreisen am 1. Mai 2017 deutlich. Eine Bereitschaft müsste auch an einem Feiertag und während üblicher Urlaubszeiten mit begrenzter Zeit der Vorankündigung verfügbar gehalten werden.

### 4.6.6 MARKTANFORDERUNGEN UND SAISONALITÄT DER PRODUKTION

Der Zementabsatz und damit indirekt auch die Produktion innerhalb der Zementwerke ist direkt von der Baunachfrage und -konjunktur abhängig. Insbesondere unterliegen diese einer starken Saisonalität. Es zeigt sich, dass ein höherer Zementabsatz in den Monaten April bis Oktober zu erwarten ist. Witterungsbedingt können einzelne Monate oder Wochen in, vor und nach dieser Zeit aber erhebliche Nachfragespitzen oder -kurzfristige Rückgänge aufzeigen. In Zeiten starker Nachfrage kann die Abnahme des gelagerten Zementes die verfügbare Produktionskapazität überschreiten. Insbesondere im Rahmen von Großprojekten wird in sehr kurzer Zeit sehr viel Material einer oder mehrerer bestimmter Sorten abgenommen. Die exakte Prognose des Abnahmezeitpunktes ist schwie-

rig. Vor diesem Hintergrund werden Lagerkapazitäten für eine flexible Lieferfähigkeit ausgelegt und möglichst volle Lagerstände angestrebt. In Zeiten starker Nachfrage kann entsprechend die Produktion nur in einem geringen Maße flexibilisiert werden. Die Lieferverpflichtungen müssen erfüllt werden.

In den Übergangszeiten (Frühjahr/Herbst) laufen die Zementmühlen i.d.R. nur im Ein- oder Zweischichtbetrieb (i. d. R. Spät-/Nachtschicht). Ein Potenzial für positive Regelenergie ist entsprechend (nur) in diesen Betriebszeiten verfügbar. Ein Potential zur Verlagerung der Produktion in die Tagschicht wie in Anforderungsprofil 2 vorgesehen ist nur in dem Umfang vorhanden wie es die Personalplanung ermöglicht (s.o.). Die Möglichkeit und die mögliche Länge eines Stillstands entsprechend Anforderungsprofil 3 sind abhängig von Auftragslage und den Silofüllständen abzuwägen. In den Zeiten besonders niedrigerer Nachfrage wird meist im Zeitraum Dezember bis März eine mehrwöchige Winterrevision im Zementwerk durchgeführt. Hierdurch trägt die Zementindustrie insgesamt bereits heute dazu bei, den elektrischen Energieeinsatz in der Winterzeit zu vermindern, in der das Angebot erneuerbarer Energien eingeschränkt ist. Die regelmäßige Abschaltung großer Verbraucher während der Winterrevision kann als mehrwöchige positive Regelenergie allerdings mit geringer Flexibilität verstanden werden. Die Verschiebung der Revision wurde bereits an verschiedenen Stellen diskutiert. Die Terminierung der Winterreparatur wird u. a. durch die Terminfindung mit vielen externen Unternehmen langfristig vorgenommen, so dass kurzfristig eine Verschiebung kaum möglich erscheint.

In den Wintermonaten besteht (außerhalb der Revisionszeit) ein Potential für längere geplante Stillstände der Zementmühlen entsprechend Anforderungsprofil 3. Da die Zementmühlen in dieser Zeit teilweise mehrere Tage still stehen, könnten diese Stillstände mit entsprechendem Vorlauf für die Personalplanung so geplant werden, dass zu Zeiten eines geringen Stromangebots nicht produziert wird. Bzgl. der Relevanz dieses Potentials für das Stromsystem ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich das Potential für Lastreduktion während einer Dunkelflaute auf diejenigen Standorte beschränkt, die zum fraglichen Zeitpunkt überhaupt eine Zementmahlung geplant haben.

## 4.7 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Die Zementproduktion ist als weitgehend kontinuierlicher Prozess ausgelegt. Durch die Speicherkapazitäten in Form von Silos vor und nach den Zerkleinerungsprozessen kann allerdings eine Entkopplung und in gewissem Umfang Flexibilisierung dieser Teilprozesse mit dem größten Einsatz elektrischer Energie erreicht werden.

Zerkleinerungsverfahren haben einen relativ niedrigen energetischen Wirkungsgrad, der nicht mit anderen elektrischen Wirkungsgraden vergleichbar ist. Die kontinuierliche Überprüfung der Effizienz und ggf. möglicherer Optimierungen gehören zu den täglichen Aufgaben der Mitarbeiter der Werke und sind das Ziel von speziellen Projekten, die z. T. durch externe Dienstleister unterstützt werden. Vor dem Hintergrund

weitgehend optimierter Produktionsabläufe ist durch eine flexible Produktionsweise bei der Zementmahlung zunächst von einem begrenzten Verlust der bisher erzielten Effizienz auszugehen.

Flexibler Mühlenbetrieb wäre in der Regel mit häufigeren An- und Abschaltvorgängen in der Zementproduktion verbunden. Während der Übergangs- oder Aufwärmphasen entstehen ggf. nicht-sortengerechte Produkte. Diese können i. d. R. durch Rezyklierung in den Produktionsprozess vollständig wieder genutzt werden. Der zusätzliche Energieaufwand in der Zementmahlung durch die Produktion und Rezirkulierung von nicht-sortengerechten Produkten wird mit etwa 2 % abgeschätzt. Werden allerdings durch die Flexibilisierung der Mühlen thermische Verluste hervorgerufen, kann die Zementqualität stärker beeinträchtigt werden. In diesem Fall wäre von einem höherer zusätzlicher Energiebedarf bei der Rezirkulierung des Materials auszugehen. In jedem Fall muss ein noch nicht fertig produziertes Material zwischengelagert werden, was zu steigendem Lagerbedarf und damit zu hohen Investitionskosten führt.

Die Rohmahlung wird zum einen zur Zerkleinerung aber auch zur Trocknung der Rohmaterialien verwendet. Hier ist die Effizienz der Anlage besonders von den effizienten Nutzung der thermischen Energie der Gasströme abhängig. Darüber hinaus werden für einen effizienten Emissionsschutz gewisse Synergien zwischen Rohmahlung und Brennprozess genutzt (z. B. Abgasreinigung durch die hohe Oberfläche des Rohmehls im Verbundbetrieb). Unter anderem hieraus resultiert die in Kapitel 4.2.1 dargestellte hohe mittlere Verbundbetriebszeit. Eine Flexibilisierung der Rohmahlung kann zu höheren thermischen Energiebedarfen führen und damit zu Wechselwirkungen zwischen elektrischer und thermischer Energieeffizienz führen. Der Einsatz thermischer Energie im Klinkerbrennprozess und die Nutzung restlicher thermischer Energie zur Rohmaterialtrocknung übersteigen den Einsatz elektrischer Energie deutlich. Höhere thermische Energieverluste zugunsten von Flexibilität im Einsatz elektrischer Energie erscheinen deshalb im Sinne der Energieeffizienz insgesamt kaum akzeptabel.

#### 4.7.1 ERFAHRUNGEN AUS EINEM BETRIEBSVERSUCH IM ZEMENTWERK

In einem Werk wurde ein Langzeit-Betriebsversuch zur Flexibilisierung der Rohmahlung durchgeführt. In diesem Einzelfall waren keine zusätzlichen Investitionen in Neuanlagen nötig und die Gegebenheiten im Werk waren bestmöglich. Dennoch wurde aufgrund fehlender ökonomischer Anreize seitens der Stromanbieter und Netzbetreiber dieses Versuchsvorhaben beendet [7]. Es handelt sich um ein integriertes Zementwerk mit hoher Kapazität von Rohmühle und Silos. Überwiegend liegt am Standort ein trockenes Rohmaterial mit etwa 5 % Feuchte vor. Es ergeben sich dadurch im Mittel etwas geringere Anforderungen an den Verbundbetrieb zwischen Mahltrocknung und kontinuierlicher Klinkerproduktion. Die Feuchte des Rohmaterials unterlag allerdings starken Schwankungen bei Maximalfeuchtegehalten von 12 %. Das Rohmaterial konnte in einen separaten Trommeltrockner, der bereits im Werk vorhanden war, durch zusätzlichen thermischen Energieeinsatz auf eine

niedrige Restfeuchte vorgetrocknet werden. Aufgrund der Überkapazität der Rohmühle war es dann möglich angeforderten Lasterhöhungen zu entsprechen. Neben den fehlenden ökonomischen Anreizen zeigten sich besonders große praktische Einschränkungen und Aufwendungen in der Personal- und Wartungsplanung. Etwa eine Fachkraft war zusätzlich nötig um den Tagschichtbetrieb und die Bereitschaft zum flexiblen Betrieb zu ermöglichen.

## 4.8 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER ROH- UND ZEMENTMAHLUNG

Die praktische Nutzung von Flexibilitätspotentialen in den Mahlprozessen bei der Zementherstellung erfordert eine Schaffung geeigneter Voraussetzungen und die Beseitigung von bestehenden Hemmnissen (siehe Kapitel 4.4 bis 4.7). Aus heutiger Perspektive sind dabei die stark eingeschränkten wirtschaftlichen Voraussetzungen und ungeeignete Vertragsbedingungen für den flexiblen Stromeinsatz in Industriebetrieben in Deutschland zu nennen. Insbesondere der direkte personelle und arbeitsorganisatorische Mehraufwand müsste durch die Vergütung für die zusätzliche Flexibilität kompensiert werden. Gleichartige Schlussfolgerungen zum wirtschaftlich nutzbaren Potential wurden auch für die Zementindustrie in Österreich [19] und in Untersuchungen eines Industriebetriebes [20] gemacht. Neben der Kompensation von direktem Mehraufwand und betriebliche Risiken ist als Voraussetzung auch die tatsächliche Verfügbarkeit von Personal, deren Weiterqualifikation und Ausbildung zu berücksichtigen.

Technisch könnte die Erweiterung der Silo- und Mühlenkapazität unter Umständen zur Steigerung der Flexibilität bei der Mahlung in einem Werk beitragen. Allerdings sind derartige Investitionen mit sehr hohen Kosten verbunden. Sie erscheinen aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich. Andauernde Entwicklungen auf dem deutschen Zementmarkt zeigen einen zunehmenden Trend zu Zementen hoher Festigkeitsklassen. Die Steigerung der Festigkeitsklasse des Zementes resultiert maßgeblich aus der Steigerung der Zementfeinheit. Hoch-feine Zementsorten werden voraussichtlich auch in Zukunft steigende Absatzzahlen verzeichnen. Besonders die Mahlung hoch-feiner Produkte ist sehr energie- und zeitintensiv. Obwohl die Feinstfraktion nur einen kleinen Massenanteil des Zements ausmacht, weist ihre Herstellung einen überproportional hohen elektrischen Energiebedarf auf. Der Energieaufwand steigt exponentiell mit der Feinheit. Demnach könnte die Auskopplung der Feinstmahlung als energieintensivster Anteil innerhalb der Zementmahlung die Effizienz von Investitionen zur Flexibilisierung steigern.

Eine Entkopplung der Feinstmahlung bietet somit perspektivisch ein großes Potential zur sinnvollen Nutzung von zeitlich begrenzten Überkapazitäten in der Stromproduktion. Der Großteil der Produkte kann dabei weiter auf herkömmlichen Mahlanlagen zerkleinert werden. Hierbei entstehen relativ grobe Zwischenprodukte, von denen Teilmassenströme entnommen und nachgemahlen werden können. Diese Nachmahlung würde auf geeigneten Mahlanlagen geringer Baugröße durchgeführt. Die Zwischenprodukte würde anschließend mit den nachgemahlten Anteilen zu den fertigen Produkten gemischt werden. Die parallel geschalteten

Feinstmahlaggregate können dabei einzeln auf Anforderungen seitens des Strommarktes reagieren. Die hohe Diskretisierung der Potentiale zur Flexibilisierung seitens der großen Mahlanlagen wird reduziert und Produkte mit einem neuen Freiheitsgrad würden geschaffen.

Zu den technischen Potentialen dieser Technologie wird im weiteren Verlauf des Projektes eine Studie durchgeführt und in die bestehende Modellstruktur implementiert. Weitere Untersuchungen am praktischen Beispiel und eine Demonstration der Technologie in einer Pilotanlage sind nötig, um die tatsächlichen Flexibilitätsgewinne und die Auswirkungen auf den Prozess und die Produkte praxisrelevant bewerten zu können.

## 4.9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2015: Environmental data of the German cement industry 2015. Düsseldorf, 2016
- [2] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2015; Stand April 2015. Düsseldorf, 2015
- [3] Hoenig, V.; Koring, K.; Fleiger, P.; Müller, Ch.; Palm, S.; Reiners, J.: Energy efficiency in cement production. Cement International. 2013, 11(3/4), pp.50-67/pp.46–65
- [4] European Cement Research Academy; Cement Sustainability Initiative, Ed. Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA-Technology Papers 2017. Duesseldorf, Geneva, 2017 Available at: <http://www.wbcscement.org/technology>
- [5] Wagener, Carina; Ruppert, Johannes; Hoenig, Volker. Prozesskettenorientierte Ermittlung der Material- und Energieeffizienzpotentiale in der Zementindustrie; Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl [3716 36 320 0]. Düsseldorf, 2017
- [6] European Cement Research Academy GmbH (2015): ECRA Future Grinding Technologies Project – Report about Phase I. Düsseldorf
- [7] VDZ Expertengespräche zu Flexibilitätspotentialen und -perspektiven in der Zementindustrie (2017-08), Projektdokumente SynErgie
- [8] Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2017; Stand August 2017. Düsseldorf, 2017
- [9] Fleiger, Philipp M.; Schneider, Martin; Treiber, Kevin. Future grinding technologies – ECRA’s new research project. In: Chalmers University of Technology, Ed. 14th European Symposium on Commitment and Classification (Göteborg 07.10.09.2015). Göteborg, 2015

- [10] WBCSD GNR, Cement plant power consumption - Weighted average Grey and white cement, [https://www.wbcscement.org/GNR-2014/world/GNR-Indicator\\_33AGW-world.html](https://www.wbcscement.org/GNR-2014/world/GNR-Indicator_33AGW-world.html) (02.05.2017)
- [11] VDZ Modell Flexible Zementmahlung (2017–09), Version 2, Projektdokumente SynErgie
- [12] Lidbetter, Raine T.; Liebenberg, Leon. Load-shifting opportunities for typical cement plants. *Journal of Energy in Southern Africa*. 2013, 24(1), S.35–45
- [13] Müller-Pfeiffer, M.; Fleiger, P.; Treiber, K., State of the art in cement grinding: First results form VDZ working-group „Comminution“, Präsentation ECRA-Seminar Comminution, Luxemburg 2017
- [14] Verein Deutscher Zementwerke, Zementversand Inland (Monatsdaten). <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/branchen-ueberblick/zementversand-monatsdaten/> (19.06.2017)
- [15] Duda, Walter H. Internationale Verfahrenstechniken der Zementindustrie: Rechenverfahren, Formeln, Diagramme, Tabellen. 2. Aufl. Wiesbaden, 1977 (Cement-data-book 1) S. 130
- [16] Verfahrenstechnisches Merkblatt, VDZ Arbeitskreis Zerkleinerung, bislang unveröffentlicht
- [17] Innovative business models for market uptake of renewable electricity unlocking the potential for flexibility in the industrial electricity use (2016): Simplified assessment methodology for optimal valorization of Flexible Industrial Electricity Demand. Project report, Available at: [www.industrie.eu/downloads/category/project-results](http://www.industrie.eu/downloads/category/project-results)
- [18] SynErgie Glossar 2017
- [19] Kollmann, Andrea; Schmidthaler, Michael; Elbe, Christian; Schmutzner, Ernst; Kraussler, Alois; Steinmüller, Horst; Frank, Fabian; Rebhandl, Lukas. LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids: Lastverschiebung in der Industrie Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids. Wien, 2014 (e7/2015)
- [20] Brockmann, Bärbel. Flexibilität ist Trumpf. ThyssenKrupp techforum. 2017, (1), S.24–27



## KAPITEL 5

# **FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND – PERSPEKTIVEN DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE**

Florian Ausfelder, Hanna Ewa Dura,  
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,  
Frankfurt am Main

Karin Arnold, Georg Holtz,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

## 5.1 CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE – VERFAHREN

Die Chlor-Alkali Elektrolyse (CAE) ist ein zentrales Verfahren der chemischen Grundstoffindustrie. Sie wandelt eine wässrige Kochsalzlösung mit elektrischem Strom zu Chlor, Wasserstoff und Natronlauge (die sogenannte Electrochemical Unit, ECU, im Folgenden bezogen auf die Produktion von 1 t Cl<sub>2</sub> mit den stöchiometrischen Nebenprodukten) um. Chlor und Wasserstoff fallen als Gase an, während das Natriumhydroxid als Natronlauge in wässriger Lösung mit einer Konzentration abhängig vom verwendeten Verfahren produziert wird. Die Verteilung der Produkte ist stöchiometrisch durch die Reaktionsgleichung 1 festgelegt:



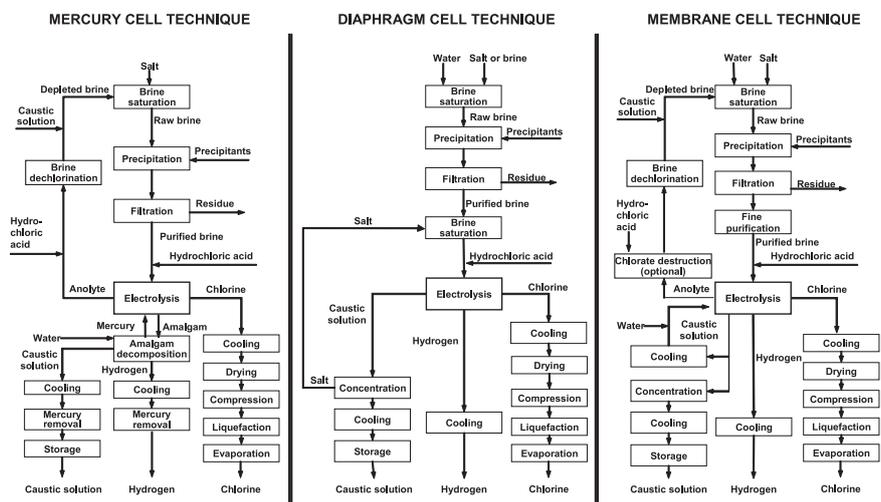
Für die Produktion von 1.000 kg Chlor fallen entsprechend 28,43 kg Wasserstoff und 1.128 kg Natronlauge (Trockengewicht) an.

Alle Verfahren setzen eine gesättigte wässrige Natriumchlorid-Lösung (Sole) mit ca. 26 Gew.-% NaCl ein. Die unterschiedlichen Verfahren führen zu unterschiedlichen Anforderungen an die Vorbereitung der Einsatzstoffe und die Aufarbeitung der Produkte. Die sich daraus ergebenden Verfahrensketten sind schematisch in Abbildung 5.1 dargestellt.

In der industriellen Nutzung der Chlor-Alkali Elektrolyse haben sich drei Hauptverfahren (Membran-, Diaphragma- und Amalgam-Verfahren) durchgesetzt. Für das Membran- und das Diaphragma-Verfahren sind zwei verschiedene Verschaltungen üblich. Im Fall einer bipolaren Verschaltung der Zellen, sind die Zellen in Reihe geschaltet, d.h. die Kathode einer Zelle ist direkt mit Anode der nächsten Zelle verbunden. Dies führt zu einer relativ geringen Stromstärke und einer relativ hohen Spannung. Im Gegensatz dazu werden im Fall der heute eher unüblichen monopolen Parallelschaltung die Zellen parallel zueinander verschaltet. Dies führt zu einer relativ hohen elektrischen Stromstärke und einer relativ geringen angelegten Spannung.

Der Branchensteckbrief für die Chlor-Alkali Elektrolyse ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Die einzelnen Verfahren werden im Folgenden kurz beschrieben.

Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der verschiedenen Verfahrensketten der Chlor-Alkali Elektrolyse [1]



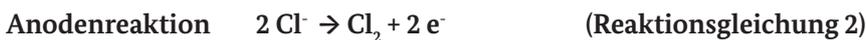
Source: Adapted from [1, Ullmann's 2006] [10, Kirk-Othmer 2002]

Allgemein	Branchendaten	Energieverbrauch der chemischen Industrie	Prozessbeschreibung									
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Größter Stromverbraucher der chem. Industrie</li> <li>1308 GW (ohne Nebenaggregate), ≈11 TWh/a Strombedarf (ca. 2% des dt. Stromverbrauchs)</li> <li>Jährliche Produktionsmenge: 4 Mio. t Cl<sub>2</sub></li> <li>21 Anlagen an 17 Standorten</li> <li>Kontinuierlicher Prozess, Auslastung ≥95%</li> <li>Anorganische Grundchemikalie mit standort-spezifischer Einbindung in Folgeprozesse</li> </ul>		<p><b>Allgemeine Reaktionsgleichung:</b></p> $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2 \text{ NaOH}$ <p>Verfahren (% der installierten Kapazität):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Membran-Verfahren (70%)</li> <li>Diaphragma-Verfahren (23%)</li> <li>Amalgam-Verfahren (8%)</li> </ol>									
Auslastung und Effizienz			<p><b>Das Wichtigste in Kürze</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Die CAE ist ein kontinuierlicher Prozess, verknüpft mit Folgeprozessen im Verbundstandort</li> <li>→ Flexibilitätsoptionen standortspezifisch</li> <li>Über- oder Unterproduktion muss sehr zeitnah kompensiert werden</li> <li>Begrenzung der Flexibilitätsoptionen durch Bedingungen des §19.2 StromNEV</li> <li>PVC Produktion verläuft über EDC als speicherbares Zwischenprodukt → eröffnet Flexibilitätsperspektiven</li> </ul>									
			<p><b>Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität</b></p> <p>Spezifische Effizienz der Elektrolyse nimmt mit abnehmender Stromstärke zu</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>bei geringerer Leistung ist Elektrolyse spezifisch effizienter</li> <li>Nachholung der Produktion erfordert mehr Strom für die gleiche Menge Chlor</li> <li>Lasterniedrigung schneller möglich als -erhöhung</li> </ul>									
Flexibilitätspotenziale und -perspektiven	<p><b>Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses</b></p>		<p><b>Flexibilitätspotenziale und -perspektiven</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Teillastbetrieb</li> <li>Nutzung von Ethylendichlorid (EDC) als speicherbares Zwischenprodukt für Polyvinylchlorid (PVC) Standorte</li> <li>Schaltbare Sauerstoffverzehrkathoden (SVK) erlauben kontinuierliche Chlorproduktion unter Variation der Wasserstoffproduktion → bis zu 20% Lastreduktion, abhängig vom Wasserstoffbedarf des Standortes</li> </ul>									
			<p><b>Teillastpotenzial</b></p> <table border="1"> <tr> <td>Typische Anlagengröße in MW</td> <td colspan="2">30 – 150</td> </tr> <tr> <td><b>Technisches Potenzial</b></td> <td><b>Negativ</b></td> <td><b>Positiv</b></td> </tr> <tr> <td>Potenzial in MW oder %</td> <td>-10-50% bedingt Nachholung der Produktion</td> <td>≤+5%, abhängig von Auslastung</td> </tr> </table>		Typische Anlagengröße in MW	30 – 150		<b>Technisches Potenzial</b>	<b>Negativ</b>	<b>Positiv</b>	Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion
Typische Anlagengröße in MW	30 – 150											
<b>Technisches Potenzial</b>	<b>Negativ</b>	<b>Positiv</b>										
Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion	≤+5%, abhängig von Auslastung										

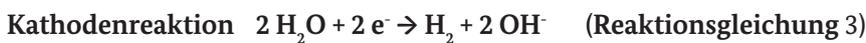
### 5.1.1 MEMBRAN-VERFAHREN

Abbildung 5.2: Branchensteckbrief Chemische Industrie Chlor-Alkali Elektrolyse

Im Membran-Verfahren werden Kathode und Anode durch eine ionendurchlässige komplexe Membran auf Basis von Per-fluorierten Polymeren getrennt, die es den Natrium-Ionen und Wassermolekülen ermöglichen, von der Kathodenseite zur Anodenseite zu wandern. Im Anodenbereich wird das Chlorid zum Chlor gemäß Reaktionsgleichung 2 oxidiert,



während im Kathodenbereich Wasser zu Wasserstoff und OH<sup>-</sup> Ionen gemäß Reaktionsgleichung 3 reduziert wird.



Die Vorteile des Membran-Verfahrens sind, dass bis zu 30 % weniger elektrische Energie für die Herstellung von Chlor benötigt wird und keine giftigen oder kanzerogenen Hilfsstoffe im Verfahren zum Einsatz kommen. Als Nachteile des Verfahrens sind anzuführen, dass eine relativ hohe Reinheit der eingesetzten Sole benötigt wird und die entstehende Natronlauge mit einer Konzentration von ca. 32 Gew-% anfällt. Sie muss daher unter zusätzlichem Energieeinsatz (Dampf) aufkonzentriert werden, um die handelsübliche Konzentration von 50 Gew-% zu erreichen.

Das Membran-Verfahren wird je nach Anlagengröße mit bis zu 200 einzelnen Elektrolysezellen zu einem Modul verschaltet. Die aktive Fläche beträgt pro Zelle bis zu 5 m<sup>2</sup> und wird mit einer elektrischen Stromdichte zwischen 3,0 bis 7 kA/m<sup>2</sup> beaufschlagt, im Mittelwert ca. 4–5 kA/m<sup>2</sup> [2,3,4]. Man versucht eher den Elektrolyseur mit einer möglichst hohen Stromdichte zu betreiben, da dann die erzeugte Lauge eine höhere Produktqualität aufweist (geringerer NaCl-Gehalt). Dies limitiert auch einen

hier angedachten Lastwechsel. Das Membran-Verfahren ist prinzipiell sehr robust gegenüber Lastabwürfen. Diese können laut [5] innerhalb von Sekunden erfolgen. An- und Abfahrprozesse im Teillastbereich sind nach eigenen Erhebungen technisch innerhalb von ca. 15 Minuten möglich, wohingegen ein Hochfahren nach vorherigem vollständigem Lastabwurf einen trägeren Verlauf aufweist [5]. Limitierend für die Leistungserhöhung ist die Leistungsfähigkeit der Nebenaggregate. Dazu zählt unter anderem das Wärmemanagement, welches die Zelltemperatur im Temperaturbereich zwischen 80–90 °C einregelt.

### 5.1.2 DIAPHRAGMA-VERFAHREN

Beim Diaphragma-Verfahren werden Anode und Kathode durch ein Diaphragma getrennt. Die Reaktionen verlaufen gemäß der Reaktionsgleichungen 2 und 3. Die Salzsole tritt in den Anodenraum ein und sickert aufgrund des dort eingestellten höheren hydrostatischen Drucks durch das Diaphragma in den Kathodenraum. Diese Druckdifferenz vermindert die unerwünschte Rückvermischung von  $\text{OH}^-$  Ionen aus dem Kathoden- in den Anodenraum und erhöht somit die Produktausbeute für Natronlauge. Die resultierende Lösung muss aufgearbeitet werden, wobei einerseits die Natronlauge, die in Konzentrationen von rund 10 % anfällt, aufkonzentriert werden muss, andererseits das verbleibende Salz größtenteils ausgefällt wird. Letzteres wird wieder gelöst als Salzsole in das Verfahren eingebracht. Das Diaphragma-Verfahren zeichnet sich durch einen niedrigen spezifischen Strombedarf und einen guten Umsatz pro Durchsatz aus<sup>1</sup>. Die Konzentration der resultierenden Natronlauge ist deutlich geringer als im Membran- oder Amalgam-Verfahren. Die Zellen heizen sich bis auf 80–90°C auf und müssen aktiv gekühlt werden. In der Vergangenheit wurden Diaphragmen auf Asbestbasis eingesetzt. Neue Anlagen verfügen über asbestfreie Diaphragmen. Die Firma DOW, die die letzten Anlagen in Deutschland mit asbesthaltigen Diaphragmen betreibt, wird die Anlagen bis Ende des Jahres 2024 endgültig auf asbestfreie Diaphragmen umgerüstet haben.

<sup>1</sup> Unter Berücksichtigung des Energiebedarfs für Aufkonzentration der Natronlauge auf handelsübliche Konzentration ist der Energiebedarf höher als für das Membran-Verfahren. Die Diaphragma-Verfahren werden in Deutschland in Kombination mit dem Epichlorhydrin-Verfahren eingesetzt, was ohne weitere Aufkonzentration der Natronlauge auskommt.

### 5.1.3 AMALGAM-VERFAHREN

Das Amalgam-Verfahren basiert auf einer flüssigen Quecksilber-Kathode, welche ein hohes Spannungspotential gegenüber der Wasserstoffbildung hat und daher mit Natrium ein Amalgam bildet, vgl. Reaktionsgleichung 4.



Das Amalgam wird mit dem flüssigen Quecksilber aus der Zelle ausgezogen und in einem Zersetzer mit Wasser an einem Graphitkatalysator zersetzt, wobei das reine Quecksilber zurückgewonnen wird und Natronlauge und Wasserstoff gemäß Reaktionsgleichung 5 gebildet werden.



Beim Amalgam-Verfahren wird die eingesetzte Sole in einem Durchlauf auf ungefähr 23 bis 24 Gew.-% abgereichert. Das Amalgam-Verfahren ist sehr empfindlich gegenüber Schwermetallen, die ebenfalls mit Quecksilber Verbindungen eingehen und die Überspannung für die in der Elektrolysezelle unerwünschte Wasserstoffbildung reduzieren. Diese notwendige hohe kathodische Überspannung ist auch der Grund für die relativ hohe Spannung und den daraus resultierenden relativ hohen spezifischen elektrischen Energiebedarfs des Verfahrens gegenüber dem Diaphragma- oder Membran-Verfahren.

Die Vorteile des Verfahrens liegen einerseits in der hohen Reinheit des produzierten Chlors und der Produktion von konzentrierter Natronlauge, die bereits den Marktspezifikationen entspricht. Dafür lässt sich ein gewisser Austrag von Quecksilber aus der Anlage in die Umwelt nicht vollständig vermeiden. Die Chlor-Alkali Betreiber in Europa haben sich gegenüber der Europäischen Union verpflichtet, die Anlagen auf Basis des Amalgam-Verfahren freiwillig bis Ende 2017 auf andere BAT (Best Available Technology) Verfahren umzurüsten oder abzuschalten. Im Dezember 2013 hat die Europäische Kommission auf Basis der EU Richtlinie 2010/75/EU festgelegt [6], dass die Quecksilbertechnologie nicht mehr der besten verfügbaren Technologie (BAT) entspricht. Dieser Beschluss ist von den Mitgliedsstaaten innerhalb von 4 Jahren nach Veröffentlichung umzusetzen (bis spätestens 11.12.2017). In Deutschland gibt es noch zwei Betreiber von Anlagen zur Herstellung von Alkoholaten nach dem Amalgam-Verfahren. Da es derzeit kein Alternativverfahren für die gemeinsame Herstellung aller Alkoholate (Natriummethylat, Natriumethylat und Kaliummethylat) gibt, ist der Betrieb dieser Anlagen für weitere 10 Jahre bis Ende 2027 erlaubt. (s. Verordnung (EU) 2017/852 über Quecksilber zur Umsetzung der Minamata Convention [6],[7]).

## 5.2 CHLOR-ALKALI BETREIBER IN DEUTSCHLAND

Die Chlor-Alkali Elektrolyse produziert wesentliche anorganische Grundstoffe, die im Rahmen der Folgeprozesse eine der Säulen der chemischen Industrie darstellen. Da Chlor in der Regel vor Ort produziert und nur in Ausnahmefällen transportiert wird, sind viele der Chemie-Standorte in Deutschland mit Chlor-Alkali Elektrolysen ausgestattet. Die chemische Industrie hat in den letzten 20 Jahren tiefgreifende Veränderungen durchgemacht. Während ursprünglich die Standorte in der Hand einzelner Unternehmen lagen, ist heute die gesamte Bandbreite zu finden: Standorte, bei denen Standortbetrieb und Anlagenbetrieb in den Händen von verschiedenen Unternehmen liegen, bis hin zu Standorten, die auch heute noch dem ursprünglichen Modell folgen oder zumindest stark von einem Unternehmen dominiert werden. Für die Zusammenarbeit der unterschiedlichen Anlagenbetreiber an einem Standort ergeben sich, entsprechend der standortspezifischen Situation, verschiedenste Herausforderungen und ein hoher Abstimmungsbedarf entlang der Wertschöpfungskette. Daher ist die Betrachtung des einzelnen Prozesses, in diesem Fall der Chlor-Alkali Elektrolyse, auch nicht ausreichend, sondern es muss die standortspezifische Einbindung der Wertschöpfungskette berücksichtigt werden.

Tabelle 5.1: Übersicht der Chlor Elektrolysen in Deutschland. Orange eingefärbt sind die Standorte, die Chlor für die PVC Produktion produzieren [8]

Aktuell werden an folgenden Standorten in Deutschland Chlor-Alkali Elektrolysen betrieben, Tabelle 5.1:

Betreiber	Standort	Verfahren	Nennkapazität <sup>2</sup>
			kt/a
AkzoNobel	Bitterfeld	Membran	99
AkzoNobel	Frankfurt	Membran	250
AkzoNobel/Evonik	Ibbenbüren	Membran	125
BASF	Ludwigshafen	Membran	215
BASF	Ludwigshafen	Amalgam	170
CABB	Gersthofen	Membran	52
Covestro	Dormagen	Membran	400
Covestro	Dormagen	Salzsäure-Diaphragma	80
Covestro	Leverkusen	Membran	390
Covestro	Uerdingen	Membran	240
Covestro	Uerdingen	Membran (SVK)	20
Covestro	Brunsbüttel	Salzsäure-Diaphragma	190
Covestro	Brunsbüttel	Salzsäure (SVK)	20
<b>DOW</b>	<b>Schkopau</b>	<b>Membran</b>	<b>250</b>
DOW	Stade	Membran	555
DOW	Stade	Diaphragma	1030
Evonik	Lülsdorf	Amalgam	137
<b>Inovyn</b>	<b>Rheinberg</b>	<b>Membran</b>	<b>110</b>
Inovyn	Rheinberg	Diaphragma	110
Leuna-Tenside	Leuna	Membran	15
<b>Vestolit</b>	<b>Marl</b>	<b>Membran</b>	<b>260</b>
<b>Vinnolit</b>	<b>Knapsack</b>	<b>Membran</b>	<b>250</b>
<b>Vinnolit</b>	<b>Gendorf</b>	<b>Membran</b>	<b>180</b>
Wacker	Burghausen	Membran	50

<sup>2</sup> Kapazität gemäß den Angaben von Eurochlor [8]. Die Nennkapazität kann von der realen Kapazität am Standort abweichen.

Der spezifische elektrische Energiebedarf der einzelnen Anlagen hängt von der individuellen Konfiguration am Standort ab. Dennoch ergeben sich, abhängig vom Verfahren, insgesamt sehr ähnliche Werte, wie in Abbildung 5.3 dargestellt. Rote Rauten stellen Diaphragma-Anlagen, gelbe Rauten Amalgam-Anlagen und blaue Rauten Membran-Anlagen dar. Grüne Rauten stellen Membran-Anlagen dar, zu denen aktuell keine Aussagen vorliegen und denen ein Wert von 2,5 MWh/ECU (tCl<sub>2</sub>) zugeordnet wurde. Der letzte Eintrag stellt den elektrischen Energiebedarf für eine Sauerstoffverzehrkathode dar, die im normalen Modus als Membran-Elektrolyse (blauer Punkt) oder im Sauerstoffverzehrmodus (grauer Punkt), ohne Wasserstoffherzeugung betrieben wird<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Vgl. Kap. 5.4.2.

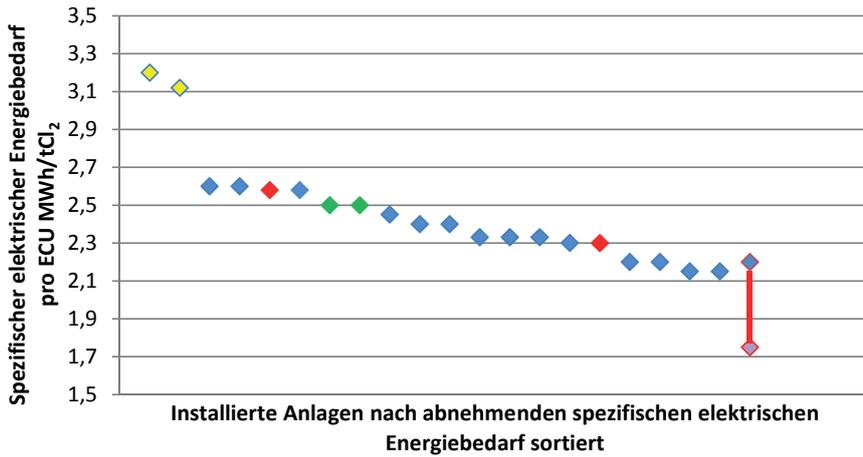


Abbildung 5.3: Benchmarking des elektrischen Energiebedarfs der Chlor-Alkali Elektrolyse<sup>4</sup> ohne Nebenaggregate und Hilfsenergie in Deutschland

<sup>4</sup> Der zusätzliche Bedarf an Hilfsenergie, insbesondere für die Aufkonzentration der Natronlauge beträgt 0,86 MWh/tCl<sub>2</sub> pro ECU für das Diaphragma-Verfahren und 0,32 MWh/tCl<sub>2</sub> pro ECU für das Membran-Verfahren.

### 5.2.1 WERTSCHÖPFUNGSKETTEN FÜR DIE PRODUKTE DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Die Wertschöpfungsketten, die auf den Produkten der Chlor-Alkali Elektrolyse beruhen sind extrem vielfältig. Chlor ist ein zentrales Produkt, welches in der chemischen und pharmazeutischen Industrie für viele chemische Umwandlungen benötigt wird. Es wird geschätzt, dass ca. 55 % der chemischen und 85 % der pharmazeutischen Endprodukte im Verlauf ihrer Herstellung über Zwischenstufen verlaufen, die auf die Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse zurückzuführen sind [9]. Die Produktion vieler Endprodukte verläuft über chlorhaltigen Zwischenstufen, auch wenn im Endprodukt kein Chlor mehr enthalten ist, wie in Abbildung 5.4 schematisch dargestellt.

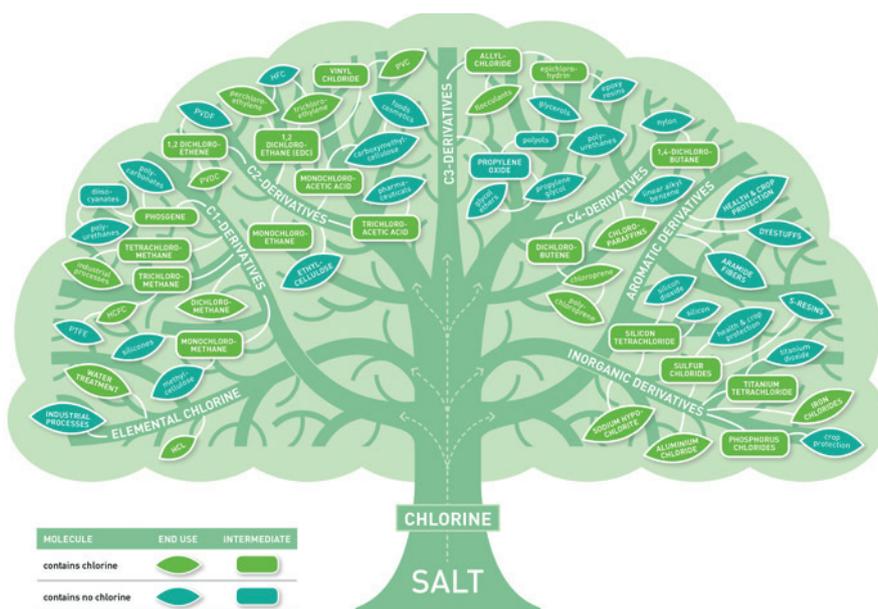


Abbildung 5.4: Übersicht über die Verknüpfungen und Produkte, bei denen Chlor in der Umsetzung beteiligt ist [10]

## 5.3 ROLLE UND EINBINDUNG DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE IN CHEMIESTANDORTEN

### 5.3.1 VERKNÜPFUNG ZU FOLGEPROZESSEN UND CHLORSPEICHER

Die meisten Standorte der chemischen Industrie sind hochvernetzte Verbundstandorte, in denen die Eingangsstoffe, Zwischenprodukte und die Prozesse untereinander so verknüpft sind, dass möglichst geringe Inventare, insbesondere an potenziell gefährlichen Stoffen bestehen. Dies ist die Implementierung der „just-in-time production“ in der chemischen Industrie.

Kritisch ist vor allen Dingen die Versorgung mit Chlor. Die Produktion von Chlor wird normalerweise in Abhängigkeit des Bedarfs der Folgeprozesse gesteuert. Ist die Reinheit des elektrolytisch produzierten Chlors nicht ausreichend für die Folgeprozesse, wird es abgekühlt, getrocknet, kondensiert und in einem Chlorspeicher zwischengelagert. Bei ausreichender Reinheit wird es direkt in die Folgeprozesse überführt. In diesem Fall ist ein Chlorspeicher nicht zwingend notwendig. Dementsprechend verfügen auch nicht alle Standorte über einen Chlorspeicher.

Aus dem Chlorspeicher wird Chlor verdampft und den Folgeprozessen über Pipelines zur Verfügung gestellt. Im Idealfall erfolgt eine konstante Chlorproduktion, die dem Speicher zugeführt wird und von dort direkt in die Folgeprozesse gespeist wird. Der Stand des Chlorspeichers wäre dann über den Zeitverlauf konstant, da immer so viel Chlor für die Folgeprozesse entnommen wird, wie durch die Chlor-Alkali Elektrolyse zugeführt wird.

Der Chlorspeicher erfüllt neben der Reinigung des Chlors primär die Funktion, im Falle einer Funktionsstörung der Chlor-Alkali Elektrolyse die Folgeprozesse kontrolliert herunterfahren zu können. Da Chlor ein extrem giftiges Gas ist, ist der Speicher aus sicherheitstechnischen Erwägungen so ausgelegt, dass das Chlor-Inventar möglichst klein ist. Seine Größe variiert von Standort zu Standort, von wenigen Stunden bis zu ungefähr ein bis zwei Tagesproduktionen Chlor.

Eine Vergrößerung des Speichers, mit dem Ziel, diesen verstärkt für eine Flexibilisierung der Chlor-Alkali Elektrolyse zu nutzen, ist weder im Interesse der Unternehmen, die versuchen ihre Inventare gefährlicher Stoffe zu minimieren, noch im Interesse der Regulierungsbehörden, die ebenfalls versuchen Risiken und Auswirkungen zu minimieren. Diese Speicher können dennoch prinzipiell für eine Flexibilisierung der Chlor-Alkali Elektrolyse genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit einer Speicherung tritt erst dann in der Wertschöpfungskette auf, wenn ein speicherbares Zwischenprodukt hergestellt wird. Unter der Perspektive der Flexibilität ist dann die Chlor-Alkali Elektrolyse gemeinsam mit der Prozesskette bis zur Produktion des speicherbaren Zwischenproduktes die Bilanzgrenze. Daher ist die Möglichkeit zum Anbieten von Flexibilität stark abhängig von der spezifischen Verbundstruktur eines jeden Standortes und kann nicht auf die Chlor-Alkali Elektrolyse alleine beschränkt werden.

### 5.3.2 FOLGEPROZESS DES MEMBRAN-VERFAHRENS: PVC-PRODUKTION

Ein für die Potenziale der Flexibilisierung bedeutender Fall der Chlor-Folgeprozesse ist die Polyvinylchlorid (PVC)-Produktion.

Chlor wird mit Ethylen, welches aus einem Ethan/Naphtha-Cracker über eine Pipeline zur Verfügung gestellt wird, katalytisch zu Ethylendichlorid (EDC) umgewandelt.



Im Gegensatz zu vielen anderen Folgeprozessen der Chlor-Alkali Elektrolyse, wird mit EDC eine gut speicherbare Substanz hergestellt, deren Speicherung ein mögliches Flexibilisierungspotenzial darstellt. In einem nächsten Schritt wird HCl aus EDC in einem Cracker abgespalten und Vinylchlorid Monomer (VCM) produziert. Je nach Standortkonfiguration wird der EDC-Cracker teilweise mit dem Wasserstoff aus der Chlor-Alkali Elektrolyse betrieben.



HCl kann durch Elektrolyse in Chlor und Wasserstoff zerlegt werden:



Chlor wird in den Prozess zurückgeführt, während Wasserstoff gemeinsam mit dem ursprünglichen Elektrolysewasserstoff weiterverarbeitet wird.

Alternativ kann unter Zuführung von Sauerstoff eine Oxychlorierung von Ethylen erfolgen, um erneut Ethylendichlorid zu erzeugen.



Nach Abtrennung des Wassers, kann das EDC wieder zur Umwandlung in Vinylchlorid eingesetzt werden. Vinylchlorid hingegen wird katalytisch zu PVC, dem gewünschten Endprodukt polymerisiert.



Dieses wird nach Aufarbeitung und Reinigung ausgetragen. Da PVC erhebliche Mengen (57 Gew.-%) an Chlor enthält, wird dieses ebenfalls mit dem Endprodukt ausgetragen und die entsprechenden Mengen müssen als NaCl der Elektrolyse wieder zugeführt werden. Die Verfahrenskette bis zur Produktion von VCM ist schematisch anhand des Vinnolit-Prozesses in Abbildung 5.5 dargestellt.

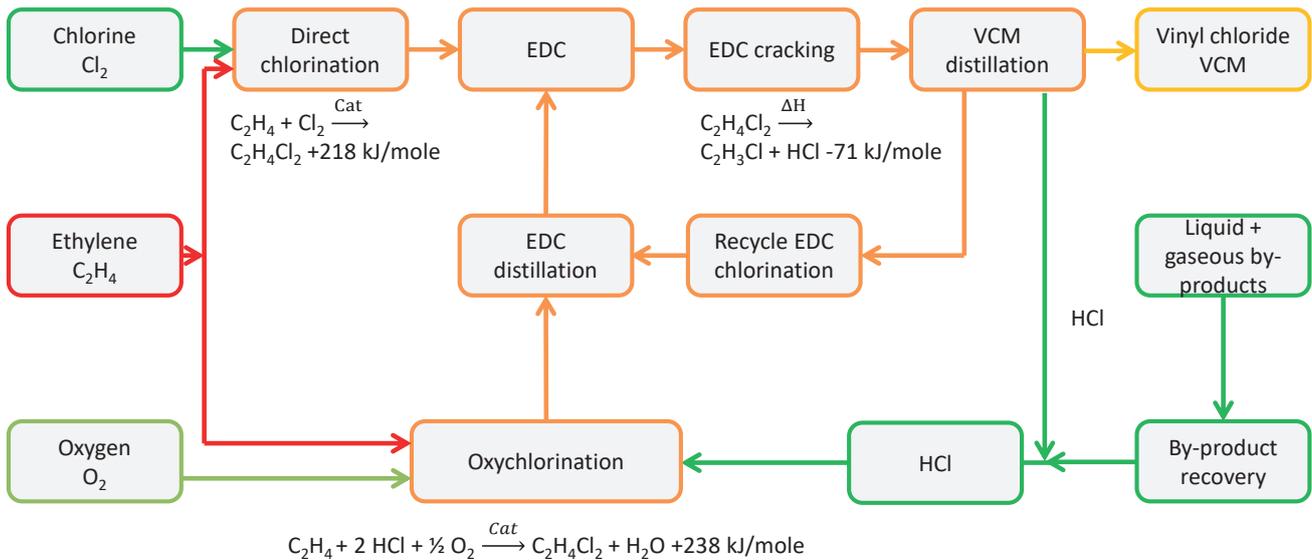


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses [11]

### 5.3.3 FOLGEPROZESS DES DIAPHRAGMA-VERFAHRENS: EPICHLORHYDRIN HERSTELLUNG

Der Diaphragma-Prozess wird in Deutschland von DOW und Inovyn betrieben. In beiden Fällen ist er an die Epichlorhydrin-Herstellung gekoppelt. Dabei wird in einem ersten Schritt Chlor mit Propylen zu Allylchlorid umgewandelt. Das Allylchlorid reagiert mit *in-situ* entstehender hypochloriger Säure zu Dichlorpropanol, welches anschließend mit der Natronlauge zu Epichlorhydrin verseift wird. Durch Abspaltung von HCl entsteht Propylenoxid, ein wichtiger Grundstoff für die Herstellung von Propylenglykol und Polyurethanen. In dieser Verfahrenskette kommt neben dem Chlor auch die Natronlauge, die für diese Anwendung nicht mehr aufkonzentriert werden muss, aus der Chlor-Alkali Elektrolyse zum Einsatz. Als finale Produkte fallen Propylenoxid und eine NaCl-Lösung an, die wieder in die Elektrolyse als Ausgangsstoff zurückgeführt werden kann, so dass die Chlor-Alkali Elektrolyse formal ihre Ausgangsstoffe mit Ausnahme von Wasser und Propylen vollständig recyceln kann.

### 5.4 ABSEHBARE ENTWICKLUNGEN FÜR DIE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Der Anteil der Kosten für elektrische Energie an den Produktionskosten von Chlor beträgt zwischen 50–60 %. Obwohl es sich bei den verschiedenen Varianten der Chlor-Alkali Elektrolyse um ausgereifte Technologien mit jahrzehntelanger betrieblichen Praxis handelt, werden die einzelnen Elektrolyse-Zellen immer noch weiter entwickelt, mit dem Ziel, eine möglichst effiziente Elektrolyse und damit kostengünstige Chlorproduktion zu ermöglichen. Einige dieser Entwicklungen können bereits implementiert werden, während andere sich noch in einem Entwicklungsstadium befinden.

### 5.4.1 ZERO-GAP TECHNOLOGIE

Die Größe der aktiven Membrane im Membran-Verfahren wird durch ihre Halterung begrenzt. Die Zero-Gap Technologie von thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers, bzw. von Asahi Kasei (Japan) ermöglichen es mit einem speziellen Zelldesign, den Abstand zwischen Membrane und Elektroden auf null zu minimieren und die Zellspannung zu reduzieren, da keine Spannungsverluste durch den Elektrolyt mehr auftreten. Ein Austausch aktueller, sich im Betrieb befindlicher Zellen gegen ZeroGap Zellen reduziert den spezifischen elektrischen Energiebedarf um bis zu 5–10 %.

### 5.4.2 SAUERSTOFFVERZEHRELEKTRODE (SVK)

Die Sauerstoffverzehrkathode ersetzt die gängige Kathodenreaktion (Reaktionsgleichung 3) durch die Reaktion mit Sauerstoff gemäß Reaktionsgleichung 11.



Damit wird die Wasserstoffherzeugung vermieden. Diese Technologie ist daher nur für jene Standorte geeignet, die nicht auf den Wasserstoff aus der Elektrolyse angewiesen sind. Der Kathode muss elementarer Sauerstoff in Reinform nach einer Luftzerlegung zugeführt werden. Insgesamt reduziert sich der spezifische elektrische Energiebedarf der Elektrolyse um bis zu 25–30 %. Unter Berücksichtigung des zusätzlichen Energiebedarfes für die Sauerstoffherzeugung ist eine Reduktion des spezifischen elektrischen Energiebedarfs für die Chlorherstellung um 15–20 % realistisch<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Je nach Standort liegt ggfs. ein Überschuss von Sauerstoff aus der Luftzerlegung vor.

### 5.4.3 SCHALTBARE SAUERSTOFFVERZEHRELEKTRODE

Diese Entwicklung zielt auf eine Kathode ab, die entweder im Sauerstoffverzehrmodus betrieben, mit einem ca. 15–20 % geringeren spezifischen elektrischen Energiebedarf pro t Cl<sub>2</sub> und keinen Wasserstoff produziert oder als eine „normale“ Elektrode betrieben werden kann, d.h. mit Wasserstoffproduktion und einem entsprechendem erhöhtem spezifischem elektrischem Energiebedarf. Falls an dem Standort die Wasserstoffversorgung nicht kritisch oder nicht in hohem Umfang von der Chlor-Alkali Elektrolyse abhängt, so ermöglicht diese Entwicklung theoretisch eine beachtliche, kurzzeitige Flexibilität von rund 20 %. Die Flexibilität hängt von dem Betriebszustand der Elektrode ab. Im Sauerstoffverzehrmodus kann sie zusätzliche Last aufnehmen und in den „normalen“ Elektrodenmodus unter Produktion von Wasserstoff wechseln, falls sie sich im „normalen“ Betriebsmodus unter Wasserstoffproduktion befindet, kann sie in dem Sauerstoffverzehrmodus wechseln und damit die Last reduzieren. Die Technologie einer Chlorproduktion mit schaltbarer Sauerstoffverzehrelektrode mit dem dafür benötigten Zellkonzept wird im Rahmen des SynErgie-Projektes aktiv erforscht.

## 5.5 BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE HEMMNISSE UND PRIORITÄTEN

Die Chlor-Alkali Elektrolyse stellt für die chemische Industrie wesentliche Grundstoffe her, die im Anschluss zum größten Teil direkt weiterverarbeitet werden. Die deutsche chemische Industrie hat in den letzten 20 Jahren einen Wandel durchlaufen, in dem sich die großen Unternehmen, die die gesamte Wertschöpfungskette von den Rohstoffen bis zu den Endprodukten inklusive der Infrastruktur in einem Unternehmen abbildeten, teilweise aufgespalten haben. Es haben sich viele kleinere Spezialunternehmen herausgebildet, die nur einen bestimmten Teil dieser Wertschöpfungskette abbilden, bzw. spezielle Chemieparksbetreiber ausgegründet, die die Infrastruktur des Chemieparks betreiben. Dennoch bleiben die Anlagen und ihre Betreiber durch die jeweilige Standortstruktur sehr eng miteinander verwoben und aufeinander angewiesen.

### 5.5.1 STANDORTEINBINDUNG

Die entsprechende Optimierung der Prozess- und Wertschöpfungsketten findet nun nicht mehr ausschließlich innerhalb eines zentral gesteuerten Unternehmens statt, sondern übergreifend mit allen beteiligten Partnern an einem Standort unter Berücksichtigung der jeweiligen Interessenslagen aller Unternehmen. Dieser Prozess wird unterstützt durch die Tatsache, dass viele der Personen an einem Standort zwar unter neuem Namen firmieren, sich aber aus der Zusammenarbeit in der Vergangenheit gut kennen. Im Idealfall läuft der Standort wie ein gut geöltes Uhrwerk, in dem ein Zahnrad (Zwischenprodukt) in das andere greift (reibungslös in den nächsten Prozess überführt wird). Dieser Prozess beruht im Wesentlichen auf Vertrauen, was sich über einen langen Zeitraum erfolgreicher Zusammenarbeit aufbaut.

Ein Anlagenbetreiber in der chemischen Industrie betreibt seine Anlage, um ein Produkt für seine Kunden herzustellen. Die Belieferung der Kunden mit dem Produkt in der vereinbarten Menge und der spezifizierten Qualität hat die höchste Priorität. Der Anlagenbetreiber versucht diesen Verpflichtungen möglichst kostengünstig und ressourceneffizient nachzukommen. Aus technischer Sicht bedeutet dies, dass die Anlagen möglichst vollständig ausgelastet betrieben werden sollten.

Der eventuelle wirtschaftliche Vorteil eines flexiblen Betriebs im Sinne von reduzierten Stromkosten muss abgewogen werden gegen die gesicherte Belieferung der Kunden in vereinbarter Menge und Qualität, der möglicherweise reduzierten Lebensdauer von Anlagenkomponenten durch erhöhte Abnutzung, zusätzlichen Aufwendungen für die Implementierung von Flexibilitätsvoraussetzungen, Fixkosten der Anlage, ggfs. zusätzlicher Ressourcenverbrauch, ggfs. Investition in zusätzliche Speicherkapazitäten sowie technische Durchführbarkeit der Flexibilität.

Da in einem vernetzten Produktionssystem keine Anlage unabhängig von den vor- oder nachgelagerten Prozessketten gedacht werden kann, ist auch das Konzept der Flexibilität in einem integrierten Standort nicht auf einen einzigen Prozess reduzierbar. Die Bilanzgrenze zur Betrachtung

der Flexibilitätsoptionen erweitert sich um die vor- und nachgelagerten Prozessketten bis hin zu speicherbaren Zwischenprodukten. Die dafür vorhandene oder ausbaufähige Speicherkapazität beschränkt unter Umständen die verfügbaren Flexibilitätsoptionen.

## 5.5.2 VERSORGUNG MIT ELEKTRISCHER ENERGIE

Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist der Prozess der chemischen Industrie mit dem höchsten Bedarf an elektrischer Energie in der chemischen Industrie und die Kosten für die elektrische Energie machen zwischen 50–60 % der Produktionskosten der Betreiber aus. Jeder weitere Prozessschritt, der zu der Bilanzgrenze hinzugedacht werden muss, führt zu einer weiteren Wertschöpfung und damit zu einer Reduzierung des Anteils der Stromkosten in der Prozesskette. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Strompreisdifferenz zwischen Normalbetrieb und der Flexibilitätsmaßnahme, die notwendig ist, um das Anbieten von Flexibilität an einem Standort für den Betreiber attraktiv zu gestalten. Generell muss die Strompreisdifferenz höher ausfallen, je länger die Prozesskette ist, um die vermiedene Wertschöpfung (z.B. im Fall von Lastreduktion) und entgangene Marge zu kompensieren.

Die Versorgung mit elektrischer Energie wird an den Standorten unterschiedlich gehandhabt. In den meisten Fällen tritt die Chlor-Alkali Elektrolyse als eigener Großverbraucher auf. Häufig wird ein Teil der absehbaren Energiemenge über langfristige Verträge gesichert und der fehlende Anteil kurzfristig an der Börse über den day-ahead Markt eingekauft. In diesem Umfeld gelten für die Betreiber der Chlor-Alkali Elektrolysen unterschiedliche Ausnahmefälle in den relevanten Regularien.

Die Kosten für elektrische Energie der Unternehmen setzen sich aus Commodity-Kosten, Netzentgelten und Umlagen zusammen. Wenn eine höhere Last als vereinbart abgerufen wird, wird ein deutlich erhöhter zusätzlicher Leistungspreis fällig. Dieser liegt in der Größenordnung von 100 €/kW im Jahr, so dass Unternehmen aktives Lastspitzenmanagement betreiben, um Lastspitzen zu vermeiden. Aus Sicht des Unternehmens sollte die Auslegung des Leistungspreises möglichst im Einklang zu der ständig benötigten Leistung stehen. Um einen weiteren Ausbau des Anschlusses um damit gegebenenfalls höhere Spitzenlasten zu ermöglichen, müssen sich der Energieversorger und das zu versorgende Unternehmen die Kosten teilen.

Für den Strompreis gelten bei Erreichung bestimmter Kriterien (Mindestverbrauch, Mindestanteil von Stromkosten an der Bruttowertschöpfung) die Besonderen Ausgleichsregelungen gemäß EEG §64 Stromkostenintensive Unternehmen. Für die erste verbrauchte Gigawattstunde fällt die reguläre EEG-Umlage an [12]. Für die darüberhinausgehende Stromabnahme fallen 15 % der regulären Abgabe an (§64.2 (2 a)), maximal jedoch 0,5 % der Bruttowertschöpfung gemäß (§64.2 (3 a)) solange die Grenzwerte in (§64.2 (4 b)), Strompreis maximal 0,1 €/ct/kWh eingehalten werden.

Gemäß §19 Abs. 2 Satz 2 der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) [13] ersetzen individuelle Netzentgelte die allgemein üblichen für Großverbraucher mit einem besonders einheitlichen Abnahmeprofil. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass eine besonders konstante

Stromentnahme netz-/systemdienlich ist und die allgemeine Netzentgeltsystematik zu überhöhten Netzentgelten führen würde. Für eine konstante Abnahme zwischen 7.000 h und 7.500 h im Jahr reduzieren sich die Netzentgelte für Abnahmen von über 10 GWh, (also eine Anlage über 1,5 MW Leistung, de-facto alle Chlor-Alkali Elektrolysen in Deutschland) – abhängig von den Kosten des sog. physikalischen Pfads – auf bis zu 20 % der üblichen Netzentgelte. Für eine konstante Abnahme zwischen 7.500 h und 8.000 h reduzieren sich die Netzentgelte auf bis zu 15 % und für eine Abnahme über 8.000 h auf bis zu 10 %. Die Höhe der Netzentgelte variiert regional, da diese die Kosten des Verteilnetz- und Übertragungsnetzunterhalts und -ausbaus widerspiegeln. Abhängig von der Region beträgt der erzielte Kostenvorteil leicht eine einstellige Millionensumme im Jahr. Das Anbieten von Flexibilität ist derzeit nur dann denkbar, wenn die Erfordernisse einer gleichmäßigen Abnahme gemäß §19 Abs. 2 (StromNEV) dadurch nicht gefährdet werden [13]. Eine Ausnahme davon bildet die sog. Abschaltbare Lasten Verordnung – AbLaV, bei der die erbrachte Flexibilität bei der Ermittlung der Kriterien gem. § 19 Abs. 2 StromNEV herausgerechnet wird [13, 14].

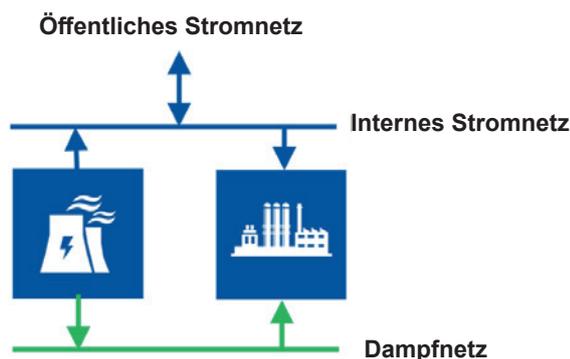
Die Rationale dieser Regelung ist die Tatsache, dass die Kosten für die Netzstabilisierung im Verteilnetz, bei einer durch grundlastfähige Kraftwerke dominierten Erzeugung, durch sehr kurzfristige Änderungen, in der Last dominiert werden. Ein konstanter Verbraucher, wie die Chlor-Alkali Elektrolyse, stabilisiert das Netz und ist nicht ursächlich für den kurzfristigen Netzstabilisierungsbedarf.

Vor dem Hintergrund des aktuell geltenden Strompreisdesigns werden die Unternehmen für eine möglichst konstante Abnahme bei der vereinbarten Leistung belohnt. Zu berücksichtigen sind hierbei auch die Ausfälle durch Wartung und unvorhergesehene Ereignisse. Während eine Reduzierung der Last innerhalb dieses Zeitrahmens prinzipiell möglich wäre, wird die notwendige Lasterhöhung durch die zusätzlichen Kosten für die Spitzenlast verteuert. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ergeben sich aus der aktuellen Regulationsstruktur wenig Anreize für das Anbieten von Flexibilität.

### 5.5.3 NUTZUNG VON KWK-EIGENERZEUGUNG

Bei Konstellationen mit hocheffizienter KWK-Eigenerzeugung, die Strom für die Elektrolyse und Prozessdampf für die Natronlaugeneindampfung gekoppelt erzeugt, sind andere Aspekte zu betrachten.

Abbildung 5.6: Energieversorgung durch interne KWK Strom- und Wärmeerzeugung [15]



Durch die Vorgabe der Viertelstundenbilanzierung (EEG §61h) wird die EEG-Umlage nur dann begrenzt, wenn die Eigenerzeugung in jeder Viertelstunde auch den Verbrauch abdeckt [12].

Wird der Strombedarf durch KWK-Eigenerzeugung gedeckt, hat der Marktpreis keinen Einfluss, da lediglich die Eigenerzeugungskosten relevant sind.

Wird zusätzlich Strom aus dem öffentlichen Netz entnommen, wird dieser mit den üblichen Abgaben belastet, sodass das Marktpreissignal bei hohem EE-Aufkommen mit den zusätzlichen Abgaben und Umlagen belastet, und damit der Anreiz niedriger Strompreise konterkariert wird.

Lediglich in Konstellationen, in denen mehr Strom erzeugt als verbraucht wird, und der Strom am Markt verkauft werden kann, kann mit einem Speicher ein zusätzlicher Deckungsbeitrag erwirtschaftet werden, wenn die Marktstrompreise höher sind als die Eigenerzeugungskosten.

Die Nutzung von flexiblen Lasten in Kombination mit KWK-Eigenerzeugung kann demnach funktionieren, wenn die KWK-Eigenerzeugung auch in gewissen Grenzen flexibilisiert werden kann.

#### 5.5.4 TECHNISCHE LIMITIERUNGEN FÜR DIE BEREITSTELLUNG VON FLEXIBILITÄT

Letztendlich reduzieren technische Aspekte die Flexibilisierungsmöglichkeiten der Chlor-Alkali Elektrolyse. Neben der Randbedingung der Belieferung der Folgeprozesse, lassen sich die Elektrolyseure des Membran-Verfahrens, bzw. des Diaphragma-Verfahrens relativ gut dynamisch zwischen 50–100 % der Maximallast betreiben. Als ungefährender Wert für die Dynamik können 15–30 min für die Variation zwischen halber Last und Volllast angenommen werden.

Eine Reduktion der Teillast auf unter 50 % ist im Falle des Diaphragma-Verfahrens durch die minimale Stromdichte für den Prozess beschränkt, während im Falle des Membran-Verfahrens zunehmend Chlorid-Verunreinigungen in der produzierten Natronlauge auftreten und die geforderten Spezifikationen nicht mehr erfüllt werden können.

#### 5.5.5 AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Die Chlor-Alkali Elektrolyse wird durchgehend („24/7“, also 24 h 7 Tage in der Woche) im 3-Schicht-Betrieb betrieben. Es wird angenommen, dass die Schichtplanung industrie-üblich wöchentlich geschieht mit übergeordneten länger laufenden Plänen. Auf die Auswirkungen einer Flexibilisierung auf den Schichtbetrieb und die Mitarbeiter wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen; es wird nicht erwartet, dass für das Beispiel Chlor-Alkali Elektrolyse der chemischen Industrie Besonderheiten vorliegen, die prohibitiv sind.

Die Produktionsplanung richtet sich an der Nachfrage der Folgeprozesse aus. Schwankungen in der Produktion der Folgeprozesse haben daher direkte Auswirkungen auf die Produktion der vorgelagerten Chlor-Alkali Elektrolyse, da nur so viel Chlor produziert wird, wie die Folgeprozesse benötigen.

### 5.5.6 WARTUNG UND REPARATUREN

Die Wartung der Chlor-Alkali Elektrolyse ist an den Standorten unterschiedlich organisiert. Da die Chlor-Alkali Elektrolyse modular aufgebaut ist, können einzelne Elektrolyseure gewartet werden, während der Rest der Anlage den Betrieb aufrechterhält, so dass eine leicht reduzierte Produktionskapazität in der Produktion gehalten wird und es zu keinen Stillstandszeiten kommt.

Die Membranen unterliegen einer ständigen Degradation, so dass sie turnusmäßig ausgetauscht werden. Der Zeitpunkt wird in der Regel durch einen langfristigen Plan vorgegeben. Darüber hinaus werden in einzelnen Fällen Membranen ausgetauscht, wenn diese nicht mehr voll funktionstüchtig ist, was an einer erhöhten Zellspannung ablesbar ist.

Am Beispiel eines Standortes steht der Wechsel der Membranen rund zweimal im Monat an rund 10 % der Elemente durchgeführt und nimmt rund 12–14 Stunden in Anspruch. Für das An- und Abfahren der Elektrolyseure wird nochmal je eine Stunde benötigt. Die Wartung wird nur in der Tag-Schicht durchgeführt; das benötigte Material wie Membrane wird vor Ort gelagert, die Elemente, also einzelne ganze Elektrolyse-Zellen, allerdings nicht.

In einigen Fällen werden ganze Standorte für 1–2 Wochen heruntergefahren und sämtliche Prozesse am Standort werden parallel gewartet, umgerüstet, ertüchtigt und auch wieder parallel hochgefahren. Diese logistischen Herausforderungen können nicht als Flexibilitätsoptionen gewertet werden, da sie im Vorhinein dem Stromversorger angezeigt und entsprechend berücksichtigt werden. Unter Berücksichtigung eines 2-wöchigen Reparatur- und Wartungsintervalls oder der entsprechenden kontinuierlichen Reparatur und Wartung reduziert sich die maximal mögliche Anlagenauslastung bezogen auf die Nominalkapazität auf 94–96 %.

### 5.5.7 BISHERIGE ERFAHRUNGEN MIT FLEXIBILITÄT

Verschiedene Betreiber der Chlor-Alkali Elektrolyse (Membran-Verfahren) haben in der Vergangenheit an den Regelenergiemärkten teilgenommen und für die Minutenreserve Regelleistung angeboten. Die für die Präqualifizierung notwendigen Parameter konnten von der Chlor-Alkali Elektrolyse gut erfüllt werden, wenn auch die Präqualifizierung aus Sicht der Unternehmen als relativ aufwendig bewertet wurde. Einige Unternehmen haben von der Bereitstellung von Regelenergie wieder Abstand genommen, da der organisatorische Aufwand für

die relativ geringe Anzahl an Abrufen zu hoch war. Der Preisverfall auf den Regelenergiemärkten hat die betriebswirtschaftliche Berechnungsgrundlage für das Anbieten von Regelenergie aus Sicht der Betreiber entzogen. Einige Unternehmen bieten auch abschaltbare Leistung im Sinne der Verordnung zu abschaltbaren Lasten – AbLaV an [14]. Dies war jedoch aufgrund der restriktiven Präqualifikationsanforderungen der Übertragungsnetzbetreiber insbesondere bei der Lastcharakteristik bisher nur schwer möglich. Insgesamt wurde die AbLaV bisher von den Chemie-Unternehmen nur zögerlich angenommen [6].

Das Vermarkten von Regelenergie erfolgt über Aggregatoren, die verschiedene Beiträge zusammenführen und diese als Paket vermarkten. Der wesentliche Vorteil aus Sicht der Unternehmen ist, dass diese Bündelung zu Freiheitsgraden für die beteiligten Unternehmen führt. Sie müssen nicht jeden Abruf bedienen, sondern können ihr Flexibilitätsangebot in Abhängigkeit von den betrieblichen Erfordernissen anbieten. Generell wird die Priorität der betrieblichen Erfordernisse als wesentliche Bedingung für die Teilnahme an der Vermarktung von Flexibilität gesehen. Die Rolle der Aggregatoren stellt einen Schwerpunkt der folgenden Projektarbeiten dar.

## 5.6 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE RAHMENBEDINGUNGEN FÜR EINE FLEXIBILISIERUNG

### 5.6.1 ABHÄNGIGKEIT DES SPEZIFISCHEN ENERGIEBEDARFS VON DER STROMSTÄRKE

Eine Besonderheit der Elektrolyse-Verfahren ist die Tatsache, dass der spezifische Energiebedarf für die Produktion des Elektrolyseproduktes (hier die ECU) aufgrund von Überspannungseffekten und den erhöhten Ohm'schen Verlusten speziell am Separator mit der Stromdichte zunimmt. Im Umkehrschluss heißt dies, eine Reduzierung der Last reduziert proportional die Produktion der ECU. Für eine höhere Last, d.h. höhere Stromdichte kommt der umgekehrte Effekt zum Tragen: Es wird mehr elektrische Energie pro ECU benötigt um die zusätzliche Produktion zu ermöglichen. Die Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs für die Chlorproduktion im Membran-Verfahren ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

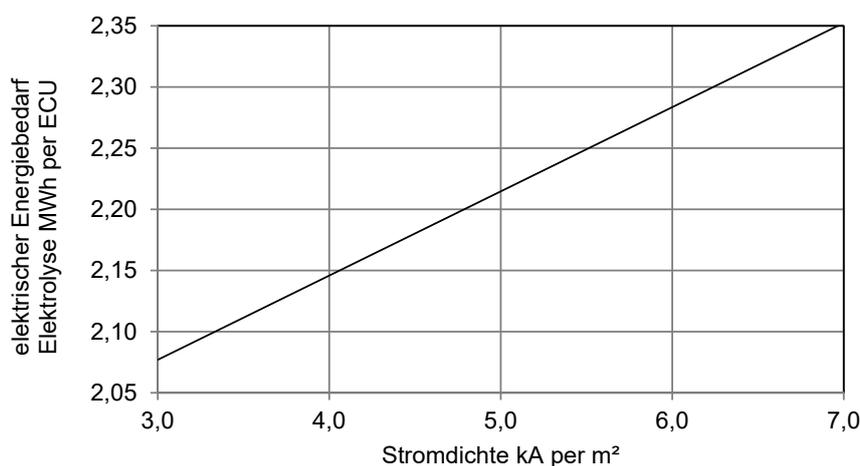


Abbildung 5.7: Beispielhafter Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs als Funktion der Stromdichte für das Membran-Verfahren [4]

### 5.6.2 RANDBEDINGUNGEN FÜR LASTVERSCHIEBUNGEN

Aus Sicht eines Industrieunternehmens stehen die möglichst störungsfreie Produktion und die reibungslose Belieferung der Kunden und Folgeprozesse im Mittelpunkt. In diesem Sinne kann Flexibilität nur angeboten werden, wenn die damit verbundene Produktionsänderung im Laufe des betrachteten Zeitintervalls wieder ausgeglichen werden kann, d.h. eine Lastverschiebung erfolgt. Da der Ausgleich erfolgen muss, kann die Änderung der Produktionsbedingungen in eine Richtung maximal solange erfolgen, wie sie von der Änderung in die andere Richtung im Zeitintervall noch ausgeglichen werden kann.

Die Produktion ist gegeben als das Produkt der durchschnittlichen Auslastung (X) der Anlage mit der Nennkapazität und dem Betrachtungszeitraum (t). Daher muss gelten:

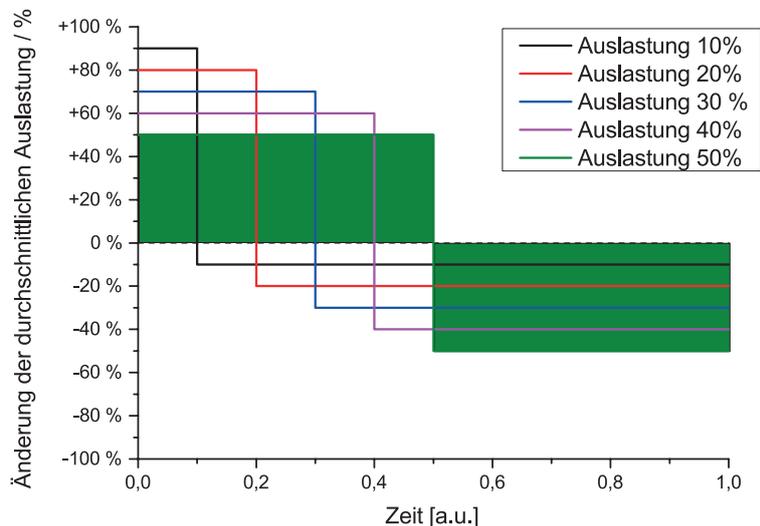
$$X \cdot t \cdot \text{Kap} = \text{Kap} \cdot (x_1 \cdot t_1 + x_2 \cdot t_2)$$

Mit  $t = t_1 + t_2$  und  $\Delta x_1 = x_1 - X$  (Erhöhung) und  $\Delta x_2 = X - x_2$  (Reduzierung) folgt daraus

$$\Delta x_1 \cdot t_1 = \Delta x_2 \cdot t_2$$

Das Produkt von Zeit ( $t_1$ ) und der Änderung der temporären Auslastung ( $\Delta x_1$ ) in der einen Richtung (z.B. erhöhte Produktion) muss dem Produkt von Zeit ( $t_2$ ) und Änderung der temporären Auslastung ( $\Delta x_2$ ) (z.B. niedrigere Produktion) entsprechen, um im Durchschnitt die gewünschte Produktionsmenge ( $Xt$ ) zu erreichen. Durch diese Bedingung sind die maximal möglichen Zeiten  $t_1$  und  $t_2$  ebenfalls eine Funktion der durchschnittlichen Auslastung, wobei die Flächen der erhöhten und reduzierten Auslastungsänderung gleich sein müssen. Dies ist schematisch in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Linien geben durchschnittliche Auslastung der Anlage an. Erhöhung und Reduzierung verhalten sich spiegelverkehrt und das Diagramm kann entsprechend für die durchschnittlichen Auslastungen von 50–90 % interpretiert werden. Die Rechtecke markieren die Möglichkeit für eine durchschnittliche Auslastung von 50 % mit +/- 50 % Änderung.

Abbildung 5.8: Flexibilität bei gegebener durchschnittlicher Produktion



### 5.6.3 FLEXIBILITÄT ALS FUNKTION DER ANLAGENAUSLASTUNG

Die mögliche maximale Flexibilität als Lastverschiebung ist durch die Größe der Flächen gegeben. Sie wird dann erreicht, wenn die durchschnittliche Auslastung 50 % der Anlagenkapazität bei Vollausslastung entspricht. Diese maximal mögliche Flexibilität beträgt  $\Delta x_1 \cdot t_1 = 50 \% \times 0,5 = 25 \%$  der Nennkapazität multipliziert mit dem Zeitintervall  $t$ . Die Anlage kann für die halbe Zeit ihre Produktion verdoppeln oder auf null reduzieren, muss dies aber in der zweiten Hälfte entsprechend kompensieren. Dabei spielt es keine Rolle, wie häufig in dem betrachteten Zeitintervall zwischen einer Produktionserhöhung und -verringerung hin- und her gewechselt wird, solange die Summe der Zeiten, d.h. die entsprechenden Produktionsmengen, eingehalten wird.

Eine reale Anlage kann von ihrer durchschnittlichen Auslastung auf 100 % hochgefahren werden oder auf 0 % reduziert werden. Durch die Lastverschiebung wird sichergestellt, dass die Änderung der Produktion im betrachteten Zeitintervall kompensiert wird. Damit ist die maximal mögliche Flexibilität eine Funktion der Anlagenauslastung, deren Verlauf in Abbildung 5.9 dargestellt ist.

In Gesprächen mit den Betreibern wurde bestätigt, dass die Chlor-Alkali Elektrolyse, sowohl im Membran- als auch im Diaphragma-Verfahren, die Bereiche zwischen halber Last (50 %) und Volllast (100 %) mit guter Dynamik abfahren kann.

Unter diesen Randbedingungen ist die maximale mögliche Flexibilität bei einer durchschnittlichen Anlagenauslastung von 75 % gegeben. Diese beträgt dann nur  $(\Delta x_1) \cdot t_1 = 25 \% \times 0,5 = 12,5 \%$ . Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

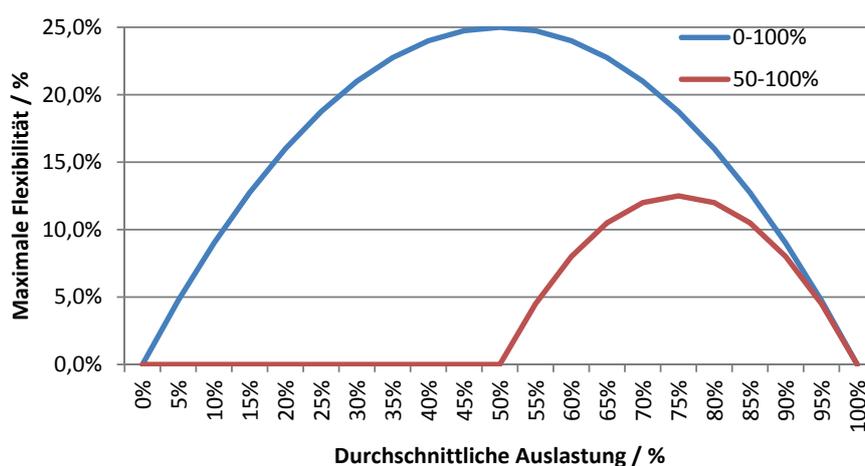


Abbildung 5.9: Zusammenhang von Auslastung und Flexibilität

## 5.6.4 WECHSELWIRKUNG ENERGIEEFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

Generell werden Produktionsanlagen nach Möglichkeit an ihrem optimalen Betriebspunkt betrieben. Daher führt jede Abweichung von diesen Parametern, also auch die Erhöhung oder Erniedrigung der Last, zu einem Verlassen des optimalen Betriebspunktes und damit zu einer geringeren Effizienz des Prozesses.

Elektrolyse-Prozesse stellen, aufgrund der linearen Abhängigkeit des spezifischen Energiebedarfs der Produktherstellung von der Stromstärke, eine Ausnahme dar. Dennoch führt auch hier eine Flexibilität um einen Betriebspunkt, wenn die durchschnittliche Produktion im Betrachtungszeitraum unverändert bleiben soll, zu einer Abnahme der Effizienz. Dies hängt damit zusammen, dass der Anstieg des spezifischen elektrischen Energiebedarfs mit der Stromstärke (erhöhte Last) größer ist als Minderung für geringere Stromstärke (reduzierte Last), wie in Abbildung 5.7 dargestellt.

Beispiel: Angenommen, die Anlage verfügt im betrachteten Betriebspunkt über eine Leistung von 2,5 MW und der spezifische elektrische Energiebedarf für die Produktion von einer Tonne Chlor beträgt 2,5 MWh, womit die Anlage an dem Betriebspunkt 1 t Chlor pro Stunde produziert. Angenommen, eine Produktionsabweichung von 20 % nach oben und unten, d.h. eine Produktion von 1,2 t  $\text{Cl}_2/\text{h}$  bzw. 0,8 t  $\text{Cl}_2/\text{h}$ , führt zu einer relativen Änderung der spezifischen Energiebedarfs von 4 % bzw. -4 %, dann würde für die erhöhte Produktion eine Leistung von 3,12 MW (2,6 MWh/t $\text{Cl}_2$ ) abgerufen und für die reduzierte Produktion eine Leistung von 1,92 MW (2,4 MWh/t $\text{Cl}_2$ ). Wenn die Produktion im betrachteten Zeitintervall unverändert im Durchschnitt dem Normalbetrieb entsprechen soll, dann muss die reduzierte Produktion wieder durch eine erhöhte Produktion ausgeglichen werden. Im Normalbetrieb würde also eine Tonne Chlor mit einem elektrischen Energiebedarf von 2,5 MWh produziert werden. In einem flexiblen Wechselbetrieb werden in dem halben Zeitintervall 0,6 t Chlor mit 1,56 MWh und in der anderen Hälfte des Zeitintervalls 0,4 t Chlor mit 0,96 MWh produziert. Der energetische Gesamtbedarf für den Wechselbetrieb liegt damit bei 2,52 MWh/t $\text{Cl}_2$  und damit um 0,8 % höher als im Normalbetrieb. Das heißt, Flexibilität und Effizienz des Verfahrens verhalten sich auch im Falle der Chlor-Alkali Elektrolyse direkt gegenläufig.

## 5.6.5 EFFIZIENZ DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE ALS STROMSPEICHER

Aus Sicht des Stromsystems kann ein flexibler Betrieb der Chlor-Alkali Elektrolyse wie ein Stromspeicher aufgefasst werden. Dem Einspeichern des Stroms, d.h. der Abnahme von elektrischer Energie aus dem Stromnetz, z.B. das Hochpumpen in einem Pumpspeicherwerk entspricht einer Erhöhung der Produktion der Chlor-Alkali Elektrolyse, dem Auspeichern, d.h. dem Zuführen von elektrischer Energie in das Stromnetz, also dem Abfließen des Wassers durch die Turbinen im Pumpspeicher-

werk, entspricht die Drosselung der Produktion. Im Vergleich zu einem klassischen Stromspeicher (z.B. das Pumpspeicherwerk) erfolgt die Speicherung nicht durch Aufnahme und Abgabe elektrischer Energie von und an das Stromnetz, sondern durch erhöhte und reduzierte Aufnahme von elektrischer Energie. Der Effekt aus Sicht des Stromnetzes im Sinne einer Flexibilität ist jedoch identisch. Die Chlor-Alkali Elektrolyse kann elektrische Energie praktisch verlustfrei speichern.

Die Chlor-Alkali Elektrolyse (und auch andere Elektrolyseprozesse) profitieren dabei von der hohen Energiedichte ihrer chemischen Produkte. Die deutschen Pumpspeicher haben ungefähr 7 GW Leistung und eine Kapazität von 40 GWh [7]. Die installierte Leistung der Chlor-Alkali Elektrolyse Anlagen liegt mit ca. 1,3 GW deutlich niedriger, aber 40 GWh Speicherkapazität entsprechen nur der Produktionsdifferenz von 16 kt Chlor mit einer durchschnittlichen Membran-Elektrolyse (hier angenommen  $2,5 \text{ MWh/tCl}_2$ ), mithin 10 % der Produktion der Referenzanlage. Insofern erscheint die Nutzung von flexibel betriebenen Chlor-Alkali Elektrolyse Anlagen in einem längeren Zeitintervall als bei Pumpspeichern üblich sinnvoll zu sein.

### 5.6.6 PERFEKTE VORAUSSICHT VS. PRODUKTIONSPLANUNG

Die Berechnungen in diesem Kapitel unterstellen eine perfekte Voraussicht des Betreibers über den zukünftigen Produktionsbedarf. Darüber hinaus ist die Berechnungsgrundlage für viele Aspekte ein Kalenderjahr. Für den Betreiber stellt sich daher die Frage, wann welche Flexibilitäts- und welche Produktionsbedarfe bestehen, um diese planen zu können. Da die Gesamtzahl der Stunden, in denen Flexibilität angeboten werden kann durch die Regeln des §19 Abs. 2 der Netzentgeltverordnung (StromNEV) [13] begrenzt ist, kann sich der Betreiber entweder sehr früh im Kalenderjahr entscheiden, seine Flexibilität anzubieten oder in Erwartung auf höhere Erlöse abwarten. In beiden Fällen ist es unwahrscheinlich, dass das Angebot an Flexibilität mit der Notwendigkeit aus Sicht des Stromsystems zusammen fällt. In der realen Welt wird ein Betreiber versuchen, einen Kompromiss zwischen der absehbar planbaren Produktion und dem voraussichtlichen Flexibilisierungsbedarf zu finden.

## 5.7 ABSCHÄTZUNG DES FLEXIBILITÄTSPOTENZIALS UND DER -PERSPEKTIVEN FÜR DIE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE IN DEUTSCHLAND

In diesem Unterkapitel wird eine Abschätzung zu den Flexibilitätspotentialen und -perspektiven auf Basis der von den Betreibern zur Verfügung gestellten Informationen vorgenommen. Die Ergebnisse werden aggregiert dargestellt. Des Weiteren dient eine imaginäre Referenzanlage zur Darstellung der Effekte. Die verwendeten Parameter sind im Anhang (Kapitel 5.12.2 und Kapitel 5.12.3) zusammengefasst.

## 5.7.1 MODELLANSATZ

Im Rahmen des Modells können Lastverschiebungen, Lastreduktionen und Lasterhöhungen abgebildet werden. In allen Fällen wird vereinfachend von einer Nutzung des vollen dynamischen technischen Lastbereichs zwischen installierter Maximallast und minimaler Teillast der Elektrolyse ohne Nebenaggregate ausgegangen.

Die maximale Erhöhung der Last, ausgehend von einem durchschnittlichen Betriebspunkt der Anlage, wird durch die installierte Kapazität, die maximale Lastreduktion durch die minimale Teillast beschränkt. Es wird nach Angaben der Betreiber von einer durchschnittlichen Produktion von 95 %, bezogen auf die Produktionskapazität der Anlage ausgegangen.

### 5.7.1.1 LASTVERSCHIEBUNG

Eine Lastverschiebung besteht aus zwei gegenläufigen Teilmaßnahmen (Lasterhöhung bzw. Lastreduktion), die hintereinander ausgeführt werden, mit dem Ziel die Änderung der Produktion, die durch die Teilmaßnahme erwirkt wird, durch die zweite Teilmaßnahme zu kompensieren. Die erste Teilmaßnahme ist jene, die das geforderte Anforderungsprofil adressiert.

Aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung erzielen die Teilmaßnahmen unterschiedliche Laständerungen, die aber mit dem Ziel einer konstanten Produktion über ihre jeweilige Dauer, unter Berücksichtigung der linear angenommenen Rampen, kompensiert werden. Die Gesamtdauer der Maßnahme setzt sich aus der Dauer der beiden Teilmaßnahmen inklusive der Rampenzeit zusammen.

### 5.7.1.2 LASTERHÖHUNG

Eine Lasterhöhung ist nur in dem Umfang möglich, in dem die maximale Produktionskapazität der Anlage noch nicht erreicht ist. Bei den durchschnittlich sehr hohen Auslastungen, die von den Betreibern berichtet wurden, sind Lasterhöhungen praktisch kaum möglich. Da die aktuelle Produktion bereits an der Nachfrage der Folgeprozesse ausgerichtet ist, ist es unwahrscheinlich, dass eine zusätzliche Produktion sinnvoll weiterverarbeitet werden kann.

### 5.7.1.3 LASTREDUKTION

Eine Lastreduktion ist mit einer Minderung der Produktion verbunden. Auch wenn diese technisch im Sinne der Elektrolyse möglich ist, führt sie parallel zu einer Minderung der Gesamtwertschöpfung entlang der Folgekette. Dieser Effekt ist standortspezifisch und hängt stark von den Folgeprozessen ab. Im Fall der PVC-Produktion werden die Folgeprozesse explizit berücksichtigt. Für andere Standorte wird die Bilanzgrenze mit der Produktion der ECU aus der Chlor-Alkali Elektrolyse gezogen.

#### 5.7.1.4 KOSTENANALYSE

Für die Abschätzung der Kosten für Flexibilitätsmaßnahmen gegenüber einem durchschnittlichen Betrieb der Anlage, wurden folgende Aspekte quantitativ berücksichtigt:

- **Arbeitspreis:** Eine Lasterhöhung führt über den betrachteten Zeitraum zu einem erhöhten Bedarf an elektrischer Energie, während eine Lastreduktion zu einem geringeren Bedarf führt. Die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Energiebedarfs der Elektrolyse von der Stromstärke ergibt darüber hinaus auch bei Lastverschiebungen einen leicht erhöhten Bedarf an elektrischer Energie.
- **Netzentgelte:** Die Netzentgelte nach §19 Abs. 2 orientieren sich an der Anzahl der Stunden einer gleichmäßigen Abnahme [13], berechnet durch die Gesamtmenge an elektrischer Arbeit im Kalenderjahr dividiert durch die höchste im Kalenderjahr abgerufene Leistung (hier die installierte Leistung). Eine Reduzierung der Abnahme von elektrischer Energie führt bei gleicher Leistung zu einer Minderung der für die individuelle Netzentgeltberechnung relevanten Stundenzahl.
- **Investitionskosten:** Bedingt eine Flexibilitätsoption eine Investition, so werden die damit verbundenen Kosten berücksichtigt und werden auf die Flexibilitätsmaßnahmen umgelegt.
- **Rohstoffe:** Eine Lasterhöhung, d.h. zusätzliche Produktion, ist mit einem zusätzlichen Verbrauch an Rohstoffen verbunden, während eine Lastreduktion, d.h. reduzierte Produktion, zu einer Minderung des Rohstoffverbrauchs führt.
- **Entgangene Erlöse:** Die Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse werden zum Marktpreis berücksichtigt. Eine Lastreduktion führt zu geringerer Produktion und damit zu reduzierten Erlösen. Eine Lasterhöhung führt zu erhöhten Erlösen.

Nicht berücksichtigt in dieser Betrachtung sind alle anderen Aspekte, die zu weiteren Kosten im Vergleich zu einem durchschnittlichen Betrieb der Anlage führen. Insbesondere sind durch erhöhte Flexibilitätsbereitstellung Kosten aufgrund eines höheren Wartungs- und Reparaturbedarfs nicht berücksichtigt.

### 5.8 FLEXIBILITÄTSOPTIONEN FÜR DIE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

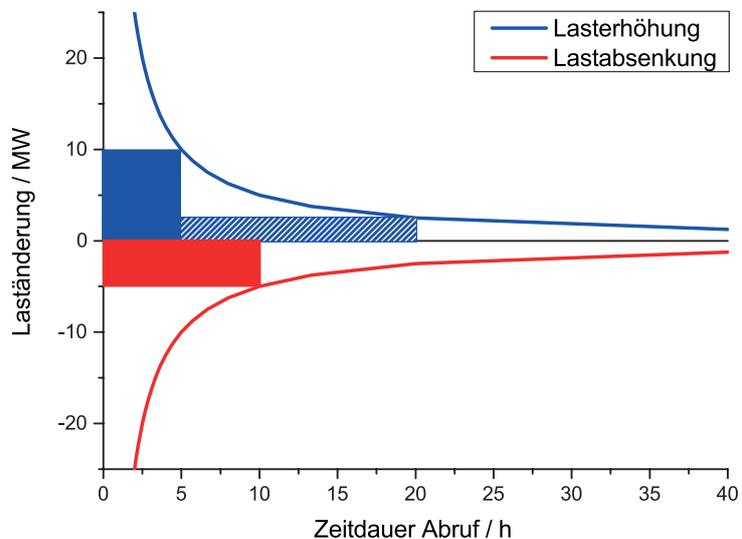
Die Chlor-Alkali Elektrolyse bietet in ihren gegenwärtigen Konfigurationen einige Ansatzpunkte, aber auch Beschränkungen für eine Flexibilisierung. Im Folgenden werden die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven diskutiert. Das theoretische Potenzial, also die Differenz zwischen durchschnittlicher Last und Komplettabschaltung bzw. Volllast, entspricht aufgrund der sehr hohen durchschnittlichen Auslastung ( $\geq 95\%$ ) der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland ungefähr +1.292 MW bzw. -16 MW ohne Nebenaggregate.

### 5.8.1 FLEXIBILITÄT IM TEILLASTBETRIEB

Anlagen, die nicht vollständig ausgelastet sind, können im Prinzip die Differenz zur maximalen oder minimalen Auslastung für die Bereitstellung von Flexibilität nutzen. Dabei wird eine ausreichende Dynamik bzw. Trägheit der Folgeprozesse unterstellt.

Wenn ein Produktionsausfall vermieden werden soll, muss die Flexibilitätsmaßnahme in einem relevanten Zeitraum durch eine gegenläufige Maßnahme kompensiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Kompensation der Produktion relativ schnell erfolgen muss, abhängig von der Dynamik der Prozesskette. Dies ist schematisch in Abbildung 5.10 dargestellt. Im Falle einer Lastverschiebung muss die Lastreduktion durch eine entsprechende Lasterhöhung kompensiert werden, deren Dauer von der möglichen Lasterhöhung abhängt. Für die nachfolgende Abschätzung wird davon ausgegangen, dass die Kompensation der Laständerung innerhalb einer halben Schicht (4 Stunden) abgeschlossen sein muss. Daraus folgt unter Berücksichtigung der Rampen, dass das Verhältnis der beiden Laständerungen den Faktor 6 nicht übersteigen darf und sich die Anwendung dieser Maßnahme auf das Anforderungsprofil 1 (Dauer: 15 Minuten) beschränkt. Diese Art der Lastverschiebungen ist aktuell kein handelbares Produkt.

Abbildung 5.10: Produktionsausgleich für eine initiierte Laständerung



Eine Lasterhöhung ist in der Regel aufgrund der sehr hohen durchschnittlichen Auslastung ( $\geq 95\%$ ) der Anlagen nicht möglich. Damit ist auch eine Kompensation einer Lastreduktion praktisch nicht möglich und ein Teillastbetrieb führt in der Regel zu Produktionsausfall.

Die Chlor-Alkali Elektrolyse hat eine standortabhängige Teillastfähigkeit und entsprechend sind Lastreduktionen prinzipiell möglich. Das technische Potenzial beträgt für alle Anlagen in Deutschland ca. +443 MW, ausgehend von einer 95 % durchschnittlichen Auslastung bezogen auf die Gesamtproduktionskapazität. Diese entspräche einem Betrieb aller Anlagen auf minimaler Teillast. Unter Berücksichtigung der Kompensation innerhalb einer halben Schicht sowie einer eingeschränkten Verfügbarkeit der Anlagen, d.h. nur die Hälfte der Anlagen kann aus betrieblichen Gründen eine Lastreduktion in dem vorgegebenen Umfang durch-

führen, ergibt sich ein deutschlandweites eingeschränktes technisches Potenzial von +21 MW bis +95 MW.

Die Kosten der Lastreduktion werden dominiert von dem Verzicht auf die Erlöse aus der Produktion, welche den geringeren Bedarf an elektrischer Energie und Rohstoffe deutlich überkompensieren. Die Kosten werden für 365 Abrufe im Anforderungsprofil 1 (15 min Dauer) im Jahr für die Referenzanlage mit 535 €/MWh abgeschätzt und für die Anlagen in Deutschland im Bereich 230–600 €/MWh. Dabei ist zu beachten, dass der Produktionsausfall der Folgeketten (außer für die PVC-Produktion) aufgrund ihrer Komplexität nicht berücksichtigt wurde.

## 5.8.2 FLEXIBLE NUTZUNG DES CHLOR-SPEICHERS

Einige Standorte kondensieren das produzierte Chlor in einen Zwischenspeicher, bevor das flüssige Chlor durch Verdampfung, den Folgeprozessen zur Verfügung gestellt wird. Diese Chlorspeicher sind in ihrer Speicherkapazität beschränkt, da sie auf sicherheitstechnischen Überlegungen basierend ausgelegt wurden. Eine Erhöhung der vorhandenen Chlor-Speicherkapazität zur Bereitstellung von Flexibilität wird aufgrund der regulatorischen und sicherheitstechnischen Herausforderungen von den Anlagenbetreibern ausgeschlossen.

Dennoch kann die existierende Speicherkapazität eingeschränkt zum Anbieten von Flexibilität genutzt werden, wobei die Möglichkeiten standortspezifisch sehr unterschiedlich eingeschätzt werden. Um das nutzbare Flexibilitätspotenzial zu ermitteln, ist nicht nur die Größe des Chlor-Speichers von Relevanz, sondern vor allem die Produktionskapazität der Chlorproduktion, deren Teillastfähigkeit sowie die Produktionsauslastung, wie im Beispiel in Abbildung 5.11 gezeigt.

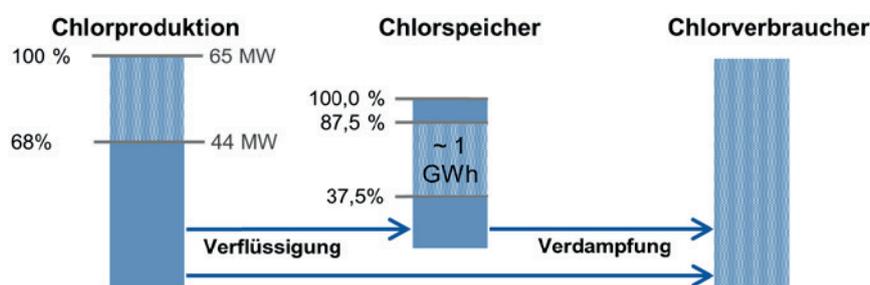


Abbildung 5.11: Interaktion Chlorproduktion, -speicher und -verbraucher [15]

Dementsprechend kann die Produktionsanlage nur in einem Lastbereich von 68–100 % der Produktionskapazität flexibel gesteuert werden.

Da der Chlorspeicher primär eine sicherheitstechnische Funktion hat, kann nicht der gesamte Speicherbereich für die virtuelle Batterie genutzt werden, sondern nur ein Teilbereich. In diesem Beispiel wurde angenommen, dass 50 % des Speichers für Flexibilitätspotenziale genutzt werden können, was einer Speicherkapazität von ca. 1 GWh entspricht. Entscheidend für das Flexibilitätspotenzial ist jedoch die Anlagenauslastung, wie Tabelle 5.2 gezeigt.

Auslastung	Äquivalente Stromlast	Freie Leistung für Speicher		Symmetrische Leistung
		Beladung / Entladung		
100 %	65 MW	0 MW	21 MW	0 MW
92 %	59 MW	5 MW	15 MW	5 MW
84 %	54 MW	10 MW	10 MW	10 MW
76 %	49 MW	15 MW	5 MW	5 MW
68 %	44 MW	21 MW	0 MW	0 MW

Tabelle 5.2: Freie Leistung für den Speicher in Abhängigkeit der Auslastung [15]

Bei einer Vollausslastung der Anlage zu 100 % (~ 65 MW Last) wird die gesamte Chlorproduktion auf die Abnehmer verteilt, sodass keine Kapazität mehr zur Verfügung steht den Speicher zu beladen. Eine Senkung der Anlagenlast ist nur bei gleichzeitiger Entladung des Chlorspeichers möglich.

Im umgekehrten Fall bei unterer Teillast von 68 % (~ 44 MW Last) kann die Anlagenlast zwar gesteigert werden um den Speicher zu beladen, eine weitere Reduktion der Last ist jedoch nicht mehr möglich.

Für die Bereitstellung einer dauerhaften symmetrischen Leistung für die Beladung bzw. Entladung des Speichers, ist in diesem konkreten Beispiel eine Anlagenauslastung von maximal 84 % möglich.

In Bezug auf die Produktionskosten hat die Anlage in diesem Fall jedoch Überkapazitäten, die nicht dauerhaft genutzt werden könnten, was zu deutlich höheren Fixkosten führt.

Aufgrund der geringen Größe der Chlorspeicher können nur Lastreduktionen mit anschließender Kompensation im Anforderungsprofil 1 zum Anbieten von Flexibilität adressiert werden. Für die Berechnungen wurde von einem dynamischen Bereich von 75 % ±25 % der Speicherkapazität ausgegangen. Da nicht alle Standorte mit Chlorspeichern ausgerüstet sind, liegt das technische Potenzial niedriger als im Falle eines reinen Teillastbetriebs bei ungefähr +273 MW. Ebenso ist das eingeschränkte technische Potenzial mit +15 MW bis +61 MW geringer.

Wenn die durchschnittliche Auslastung mit einer Kompensation im Rahmen des Betrachtungszeitraums einer halben Schicht erfolgen kann, sind die Kosten gering und orientieren sich am Mehrbedarf elektrischer Energie für hohe Stromstärken. Im Falle einer Lastreduktion sind die Kosten vergleichbar mit denen, die im Falle eines Teillastbetriebs anfallen.

### 5.8.3 NUTZUNG VON EDC-SPEICHERN

In der PVC-Produktion wird Chlor mit Ethylen zu Ethylendichlorid (EDC) umgesetzt, welches gelagert werden kann. EDC wird darüber hinaus als eigenständige Substanz gehandelt, so dass eine reduzierte Menge von EDC aufgrund einer reduzierten Chlorproduktion aus der Chlor-Alkali Elektrolyse durch Zukauf und Lagerung von EDC ausgeglichen werden kann. Zugekauftes „Nass-EDC“ muss einen Trocknungsschritt durchlaufen, bevor es in der PVC-Produktion eingesetzt werden kann.

Die PVC-Standorte verfügen über eigene EDC Speicher, die als Puffer eingesetzt werden können und Flexibilitätsoptionen in allen Anforderungsprofilen für eine Lastreduktion der Chlor-Alkali Elektrolyse eröffnen.

Wenn die EDC-Speicherung als Energiespeicher betrachtet wird, entspricht eine Speicherung von 1.000 t EDC einer elektrischen Energiemenge zur Chlorproduktion von 1,8 GWh, bei 2,5 MWh/tCl<sub>2</sub>. Eine Erweiterung bestehender EDC-Speicherkapazitäten ist prinzipiell denkbar. Die Kosten betragen hierfür 300 €/tEDC bis 400 €/tEDC. Umgerechnet auf die Investitionskosten der elektrischen Speicherkapazität würden dies 167 €/MWh bis 222 €/MWh bedeuten.

Die Versorgung der Folgeprozesse wird aus dem EDC-Tank übernommen und verläuft ungestört weiter. Die standortspezifische Tankgröße stellt hierbei den limitierenden Faktor dar. Aktuell benötigt die Organisation des Fremdbezuges von großen Mengen von EDC einen Vorlauf von mehreren Wochen. Zu beachten ist weiterhin, dass EDC aus dem Fremdbezug teurer ist, als aus der eigenen Produktion. Im Gegenzug reduzieren sich am Standort die Kosten für die Rohstoffe der EDC-Produktion und elektrische Energie, welche überkompensiert werden durch erhöhte Kosten für die externe Rohstoffzufuhr (EDC) und der Wegfall der Erlöse der Kuppelprodukte Natronlauge und Wasserstoff.

Die aktive Nutzung der EDC-Speicher zum Bereitstellen von Flexibilität führt zu einem theoretischen Potenzial von +276 MW und einem technischen Potenzial von +125 MW für die Lastreduktion und zu einem eingeschränkten technischen Potenzial von +54 MW bis +95 MW.

Die Gesamtkosten werden dominiert von dem Verzicht auf Erlöse (aus NaOH und H<sub>2</sub>) und der Differenz zwischen Fremdbezugskosten und Eigenproduktion von EDC. Für das Anforderungsprofil 1 (365 Abrufe) werden für die Lastreduktion Kosten von 400 €/MWh bis 480 €/MWh abgeschätzt. Für die Anforderungsprofile 2 und 3 ergeben sich 200 €/MWh bis 250 €/MWh für die Lastreduktion bei 52 bzw. 12 Abrufen.

#### 5.8.4 KAPAZITÄTserweiterung

Aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung der Anlagen steht nur ein geringes Potenzial für eine positive Laständerung zur Verfügung. Eine Installation zusätzlicher Produktionskapazität ist daher eine mögliche Strategie, um mehr Flexibilität anbieten zu können. Da sich der Gesamtbedarf an den Produkten der Anlage nicht ändert, reduziert sich die durchschnittliche Auslastung und es verändern sich die Bedingungen für die Gewährung der individuellen Netzentgelte gemäß §19.2 Strom-NEV [13].

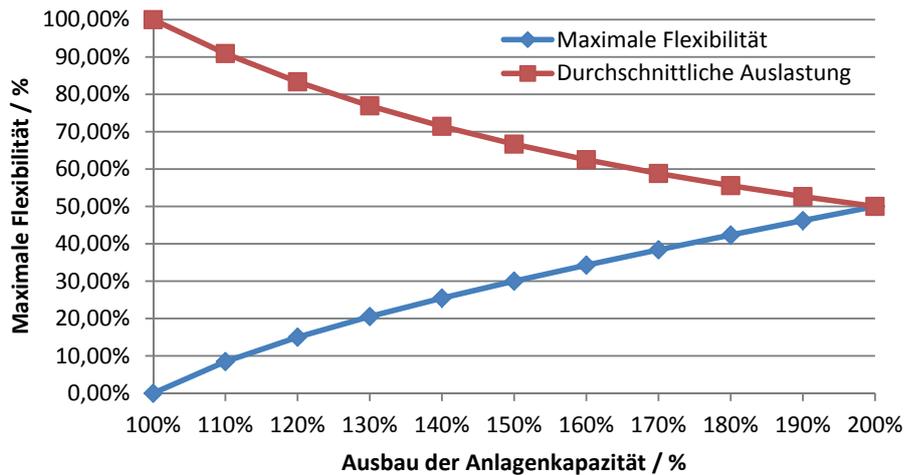
Eine Kapazitätserweiterung erhöht signifikant das Potenzial positiver Laständerungen, da die Differenz zwischen durchschnittlicher und maximaler Auslastung ansteigt. Allerdings geht die Erweiterung der Produktionskapazität mit signifikanten Investitionen einher, die mit 1.000 €/kW zusätzlicher installierter Leistung als untere Grenze abgeschätzt werden<sup>5</sup>. In der Modellierung wurde eine Erweiterung der Produktionskapazität von 10 % angenommen.

<sup>5</sup> Dieser Wert umfasst die Installationskosten für die reine Elektrolyse. Die notwendigen Anpassungen der Peripherie sind hier nicht berücksichtigt, da diese sehr standortspezifisch sind. Die daraus abgeleiteten Zahlen sind als Abschätzung für eine untere Grenze zu verstehen und ersetzen keine standortspezifische betriebswirtschaftliche Kostenanalyse.

Auch eine erweiterte Kapazität ist durch die Rahmenbedingungen der Peripherie (z.B. Größe des Chlorspeichers) eingeschränkt. Daher sind ebenfalls nur Lastverschiebungen im Anforderungsprofil 1 möglich.

Dabei ist zu beachten, dass wie auch in den anderen Betrachtungen die Flexibilität der Elektrolyse sich in dem dynamischen Bereich von 50–100 % der Produktionskapazität der installierten Elektrolysezellen abspielt. Umgekehrt bedeutet dies, dass mit einem Zubau an Produktionskapazität die durchschnittliche Auslastung der Elektrolysezellen sinkt, vgl. Abbildung 5.12.

Abbildung 5.12: Effekt eines Kapazitätsausbaus auf die maximale Flexibilität und die durchschnittliche Auslastung



Als zusätzliche Kostenposition fallen dominant die Investitionskosten im Umfang von ca. 1000 €/kW zusätzlicher installierter Leistung für die Erweiterung der Elektrolysekapazität an. Diese Investition muss sich im Rahmen der üblichen Abschreibungszeiträume durch die Flexibilitätsabrufe amortisieren, da nicht von einem erhöhten Bedarf an Chlor auszugehen ist. Darüber hinaus ist von einer Änderung der individuellen Netzentgelte auszugehen, da die maximale Last ansteigt, aber die benötigte elektrische Energie praktisch konstant bleibt. Dagegen fallen die Kosten für den geringen zusätzlichen elektrischen Energiebedarf nicht ins Gewicht.

Eine 10 % Erweiterung der bestehenden Chlor-Alkali Produktionskapazität würde zu einem deutschlandweiten technischen Potenzials von +255 MW bis -106 MW führen. Das eingeschränkte technische Potenzial liegt bei +76 MW bis +194 MW für die Lastreduktion, bzw. bei -25 MW bis -88 MW für die Lasterhöhung. Die Kosten werden von den Kapitalkosten der Investition dominiert und betragen bei 365 Abrufen pro Jahr 2.500 €/MWh bis 2.800 €/MWh für die Lasterhöhung bzw. 1.200 €/MWh bis 1.800 €/MWh für die Lastreduktion. Eine höhere Anzahl von Abrufen führt zu geringeren spezifischen Kosten, eine geringere Anzahl zu höheren spezifischen Kosten.

### 5.8.5 VIRTUELLES KRAFTWERK

Die Kombination einer Chlor-Alkali Elektrolyse mit einem Batteriespeicher in Reihe geschaltet ergibt in der Funktion ein virtuelles Kraftwerk, bei der die Batterie die Lastwechsel des sehr schnell verfügbaren Kondensat-Anstaus und die Elektrolyse die Kesselfeuerungsanlage eines Kraftwerks ersetzt. Die Batterie bietet ein zusätzliches Potenzial für positive wie negative Laständerungen, das mit der Elektrolyse kombiniert werden kann. Als Betriebsstrategie liefert die Batterie einen Großteil der Flexibilität, eingeschränkt durch ihre Speicherkapazität. Die Elektrolyse hingegen wird nur in einem begrenzten Umfang eingeschränkt.

Ein Betriebsmodus kann die Bereitstellung möglichst konstanter Produktion unter Ausnutzung von Strompreisunterschieden sein. In diesem Fall agiert die Batterie als ein Puffer gegenüber dem Stromnetz und kann im Falle von hohen Strompreisen den Bezug reduzieren und sich entladen, um die Chlor-Alkali Elektrolyse zumindest teilweise zu versorgen, bzw. im Falle von niedrigen Strompreisen sich aufladen bei gleichzeitiger Versorgung der Chlor-Alkali Elektrolyse über das Stromnetz.

Ein anderer möglicher Betriebsmodus zielt auf die Bereitstellung maximaler Flexibilität ab. In Kombination mit der Chlor-Alkali Elektrolyse, die unter Volllast läuft, kann damit auch zusätzliche Last abgefragt werden, und zwar in dem Umfang der installierten Leistung des Batteriespeichers. Umgekehrt kann auch eine entsprechend erhöhte Lastreduktion erfolgen. Aufgrund der geringen Speicherkapazität von Batteriespeichern gegenüber dem Energiegehalt der Produkte der Chlor-Alkali Elektrolyse, bietet sich diese Erhöhung der Flexibilität nur für kurze Anforderungszeiträume an. Sein wesentlicher Vorteil ist das Anbieten einer größeren Lastdifferenz und damit das Abfangen kurzer, hoher Spitzen durch die Kombination des Batteriespeichers mit der Chlor-Alkali Elektrolyse.

Der in Schwerin installierte kommerzielle Stromspeicher auf Li-Ionen Basis hatte Investitionskosten von 12 Mio. Euro, eine installierte Leistung von 10 MW und eine Speicherkapazität von 15 MWh [18], was einer Produktion von ungefähr 6 Tonnen Chlor entspricht, also rund 20 min Volllastproduktion in der Referenzanlage. Die elektrochemische Speicherkapazität der Batterie ist daher klein im Vergleich zum Energiegehalt der Produkte und kann eine längerfristige Laständerung ohne Beeinträchtigung der Produktion nicht ermöglichen.

Eine andere Alternative können Redox-Flow Batterien darstellen. In Dalian, China wird aktuell ein auf Vanadium basierende Redox-Flow Speicher mit einer Leistung von 200 MW und 800 MWh Speicherkapazität installiert [19], was rund 16 Stunden der Produktion in der Referenzanlage entspricht.

Das virtuelle Kraftwerk kann ebenfalls nur Lastverschiebungen im Anforderungsprofil 1 anbieten. Alle möglichen Betriebsmodi werden durch die Anforderungen von §19.2 der Netzentgeltverordnung (StromNEV) beschränkt [13]. Für die Batterie fallen zusätzliche Investitionskosten an. Im Gegensatz zu diesen Positionen spielt der zusätzliche elektrische Energiebedarf, hier auch unter Berücksichtigung der Zykleneffizienz der Batterie eine untergeordnete Rolle.

Eine Installation von zusätzlichen elektrochemischen Speichern zum Anbieten von Flexibilität in Kombination mit der Chlor-Alkali Elektrolyse im Umfang von 10 % der jeweiligen Leistung der Chlor-Alkali Anlage führt zu einem technischen Potenzial von -150 MW für die Lasterhöhung und +358 MW für die Lastreduktion. Das eingeschränkte technische Potenzial liegt zwischen -28 MW und -119 MW für die Lasterhöhung und +82 MW bis +252 MW für die Lastreduktion. Die dominierenden Kostenbeiträge stammen von den Kapitalkosten der Li-Ionen Batterie. Die Kosten werden bei 365 Abrufen im Jahr insgesamt auf rund 3.600 €/MWh bis 3700 €/MWh für die Lasterhöhung und 1.100 €/MWh bis 2.000 €/MWh für die Lastreduktion abgeschätzt.

### 5.8.6 SCHALTBARE SAUERSTOFFVERZEHRKATHODE

Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode ermöglicht im Membran-Verfahren die Kathode zwischen einem regulären Betriebszustand unter Wasserstoffproduktion, mit höherem Bedarf an elektrischer Energie, und einem Sauerstoffverzehrmodus ohne Wasserstoffproduktion und mit 15 % reduziertem elektrischen Energiebedarf, hin- und herzuwechseln.

Da die Chlorproduktion durch den Wechsel nicht beeinflusst wird, können damit im Prinzip auch die Anforderungsprofile 2 und 3 adressiert werden. Am Standort variiert dann allerdings die Wasserstoffproduktion durch die Chlor-Alkali Elektrolyse. Es ist davon auszugehen, dass eine Ertüchtigung der Elektroden nur in dem Maße erfolgen kann, in dem die Wasserstoffversorgung am Standort nicht gefährdet wird. Wenn also 50 % des standortspezifischen Wasserstoffbedarfs durch die Chlor-Alkali Elektrolyse gedeckt wird, kann erwartet werden, dass eine entsprechende Anzahl an „normalen“ Membran-Elektrolyseuren am Standort verbleibt. Nur die darüber hinausgehenden Elektrolyseure werden mit schaltbaren Sauerstoffverzehrkathoden ausgestattet.

Die meisten Standorte der Chlor-Alkali Elektrolyse weisen einen Wasserstoffüberschuss auf. Je nach Standort wird Wasserstoff unterschiedlich verwendet und weiterverarbeitet. Dabei kommt folgende Hierarchie zum Einsatz:

1. Nutzung von Wasserstoff am Standort zur chemischen Umsetzung in Prozessen
2. Verkauf von Wasserstoff als Industriegas an externe Nutzer
3. Nutzung des Energiegehaltes des Wasserstoffs am Standort
  - a. zur kalorischen Umsetzung (z.B. als Erdgasersatz) in Prozessen
  - b. zur thermischen oder elektrischen Energieerzeugung (z.B. als Erdgasersatz)

Die Punkte 1 und 2 bedingen unverzichtbar eine gesicherte Versorgung mit Wasserstoff, während im Punkt 3 Wasserstoff als Substitut für Erdgas genutzt wird. Der Wasserstoff fällt im Normalbetrieb der Chlor-Alkali Elektrolyse an und seine Nutzung im Punkt 3 reduziert die CO<sub>2</sub>-Bilanz und den Erdgasbedarf des Standortes. Eine energetische Nutzung des elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs ist nicht energieeffizient, kann sich aber, abhängig von den Bilanzierungsgrenzen, im Sinne der CO<sub>2</sub>-Belastung für den Standort lohnen.

In der Abschätzung wurde angenommen, dass die Standorte zu 50 % (bezogen auf die Chlor-Produktionskapazität) weiter die regulären Membran-Elektrolyseure betrieben und die verbliebenen 50 % der Produktionskapazität mit schaltbaren Sauerstoffverzehrkathoden ausgestattet sind. Als normaler Betriebszustand wurde angenommen, dass jeweils die Hälfte der Sauerstoffverzehrelektroden im dem normalen Betriebsmodus und die Hälfte im Sauerstoffverzehrmodus betrieben werden, was einer Maximierung der Flexibilität gleichkommt. Dieser Wechsel in der Anlagenkonfiguration führt zu einer symmetrischen Flexibilitätsoption für Lasterhöhung und -reduktion.

Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode entspricht einer zusätzlichen Investition im Umfang von rund 200 €/kW, die durch das Flexibilitätsangebot amortisiert werden muss. Der wesentliche Vorteil eines Einsatzes der Sauerstoffverzehrkathode für eine Flexibilisierung der Chlor-Alkali Elektrolyse liegt darin, dass die Chlorproduktion durch die Flexibilität nicht beeinflusst wird.

Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode kann alle Anforderungsprofile mit Lasterhöhungen und Lastreduktionen adressieren. Die Kosten werden von den Investitionskosten dominiert. Auch die Differenz der benötigten elektrischen Energie wird eine relevante Größe für die Kostenabschätzung. Im Falle von Lastreduktionen ist von einer Veränderung der Bedingungen für individuelle Netzentgelte nach §19 Abs. 2 StromNEV auszugehen [13]. Die Änderung der Erlöse beschränkt sich auf den Wasserstoff und ist damit von untergeordneter Bedeutung, wenn auch nicht vernachlässigbar.

Bei einem vollständigen Umrüsten der Membran-Standorte auf die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode ergäbe sich ein technisches Potenzial von -32 MW für die Lasterhöhung und +32 MW für die Lastreduktion. Das eingeschränkte technische Potenzial liegt zwischen -8 MW und -27 MW für die Lasterhöhung und +8 MW bis +27 MW für die Lastreduktion.

Die Gesamtkosten werden dominiert von den Investitionskosten und mit 3.600 €/MWh für die Lasterhöhung und 3.800 €/MWh im Anforderungsprofil 1 (365 Abrufe) abgeschätzt. Für die Anforderungsprofile 2 (52 Abrufe) und 3 (12 Abrufe) ergeben sich 770 €/MWh und 350 €/MWh für die Lasterhöhung und 860 €/MWh bzw. 440 €/MWh für die Lastreduktion.

### 5.8.7 ERGEBNISSE

Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist der Prozess der chemischen Industrie mit dem höchsten Stromverbrauch. Das theoretische Flexibilitätspotenzial entspricht der installierten Leistung (ohne Nebenaggregate). Allerdings ist einfaches Ein- und Ausschalten der Anlagen nicht zielführend. Die Anlagen werden betrieben um die Produkte für die Weiterverarbeitung in chemischen Verbundstandorten bereitzustellen und damit die entsprechenden Wertschöpfungsketten zu sichern.

Während eine Lasterhöhung aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung kaum möglich ist, sind Lastreduktionen technisch machbar, führen jedoch zu einem Produktionsausfall, mit den entsprechenden Auswirkungen auf die angegliederten Folgeprozesse.

Die aktuellen Flexibilitätspotenziale, für Lastreduktionen, ergeben sich aus einem möglichen Teillastbetrieb der Anlage, ggfs. gepuffert durch vorhandene Chlorspeicher. Diese Potenziale stehen realistischer Weise nur für das Anforderungsprofil 1 (Dauer: 15 min.) zur Verfügung, da ein längerer Teillastbetrieb unweigerlich die Versorgung des Standortes gefährdet. Die Kosten werden durch den Wegfall der Produkterlöse dominiert und müssten konsequenter Weise standortspezifisch auf die Änderung innerhalb der gesamten Wertschöpfungskette bezogen werden, was in der Komplexität den Rahmen dieser Studie sprengen würde.

Eine Sonderrolle bei den verfügbaren Potenzialen ist die Nutzung von EDC-Speichern in der PVC-Produktion. Prinzipiell ist hier eine Nutzung für eine Lastreduktion in allen Anforderungsprofilen denkbar. Die Begrenzung durch die Größe des EDC-Speichers ist nicht limitierend, wenn das EDC extern bezogen werden kann. Die Kosten werden dominiert durch die Zusatzkosten für den Fremdbezug von EDC im Gegensatz zur Eigenproduktion.

Die Potenziale für Lastreduktionen führen in ihrer Anwendung zu einem reduzierten Bezug von elektrischer Energie und damit ggfs. zu einer Änderung der individuellen Netzentgelte gemäß §19 Abs. 2 StromNEV [13], was einen erheblichen Kostenfaktor darstellen kann.

Als zukünftige Flexibilitätsoptionen stehen mit der Installation von Überkapazitäten und dem virtuellen Kraftwerk Perspektiven zur Verfügung, die sowohl die mögliche Lastreduktion als auch Lasterhöhungen anbieten können. Im Falle der Überkapazitäten sind diese aber durch die Abnahmekapazität der Folgeprozesse beschränkt. Daher werden für beide Optionen ebenfalls nur Anwendungsmöglichkeiten im Anforderungsprofil 1 gesehen.

Die schaltbare Sauerstoffverzehrelektrode bietet, je nach Betriebsstrategie, eine symmetrische Flexibilitätsperspektive, begrenzt durch den Wasserstoffbedarf am Standort. Sie kann im Prinzip sämtliche Anforderungsprofile adressieren.

Für alle dargestellten Flexibilitätsperspektiven fallen zusätzliche Investitionskosten in erheblichem Umfang an, die über die Flexibilitätsabrufe amortisiert werden müssen. Daher sind die spezifischen Abrufkosten stark abhängig von der Anzahl der zu erwartenden Abrufe.

Aufgrund der Schwankungen der abgerufenen Last ist bei den Flexibilitätsperspektiven ebenfalls von einer Änderung der individuellen Netzentgelte gemäß §19.2 [13] auszugehen.

Insgesamt sind aktuell Potenziale für Lastreduktion durch Teillastbetrieb denkbar, jedoch nicht im Interesse der Unternehmen, da sie damit ihre Kundenbeziehung gefährden. Die aktive Nutzung der Chlorspeicher ist stark von den standortspezifischen Gegebenheiten abhängig und setzt voraus, dass die entfallene Produktion nachgeholt wird. Die Nutzung von EDC als speicherbares und extern beziehbares Zwischenprodukt bietet das Flexibilitätspotenzial mit der geringsten Beeinträchtigung der Folgeprozesse.

Von den möglichen Flexibilitätsperspektiven führt der Einsatz von Überkapazitäten zwar formal zu den Möglichkeiten einer Lasterhöhung, die jedoch von den Folgeprozessen verarbeitbar sein muss. Ansonsten gelten die gleichen Randbedingungen wie für den Teillastbetrieb. Der Einsatz einer vorgeschalteten Batterie führt zu Flexibilität in beide Richtungen, es sind Lasterhöhungen und -reduktionen möglich. Aufgrund der geringen Stromspeicherkapazität der Batterie im Vergleich zur Energiedichte der Elektrolyse-Produkte können nur kurze Abrufe adressiert werden. Die Frage, ob der Vorteil einer Kombination der Batterie mit der Elektrolyse gegenüber einer isolierten Installation der Batterie als Netzdienstleistung ausreichend ist, ist nicht untersucht worden. Die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode bietet eine symmetrische Lasterhöhungs- und Lastreduktionsperspektive und verändert die Chlorproduktion durch die Flexibilitätsabrufe nicht, womit die Folgeprozesse unverändert betrieben werden können.

In Tabelle 5.3 werden die unterschiedlichen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven für die Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland als Laständerungen in den Anforderungsprofilen ausgewiesen. Tabelle 5.4 weist die Kosten gemäß der durchgeführten Abschätzung für die Anforderungsprofile und eine jeweils angenommene Abrufanzahl aus.

Maßnahme	Verfahren	Regelleistung	Theoretisches Potenzial <sup>7</sup>	Auslastung
Anforderungsprofil			MW	%
Teillast	alle	Lasterhöhung	-16	>=95 %
		Lastreduktion	+1292	>=95 %
Chlorspeicher	Membran	Lasterhöhung	-11	>=95 %
		Lastreduktion	+911	>=95 %
EDC-Speicher	Membran (PVC)	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	+276	>=95 %
Kapazitätserhöhung	Membran	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	-	>=95 %
Virtuelles Kraftwerk	alle	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	-	>=95 %
Schaltbare	Membran	Lasterhöhung	-	>=95 %
		Lastreduktion	-	>=95 %

Tabelle 5.3: Übersicht der Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (orange Schrift) der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland

<sup>7</sup> Differenz zwischen durchschnittlich ausgelasteter und abgeschalteter Anlage bzw. Vollast.

Maßnahme	Verfahren	Regelleistung
Anforderungsprofil		
# Abrufe pro Jahr		
Auslastung (nur Lastverschiebung)	alle	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Chlorspeicher (nur Lastverschiebung)	Membran	Lasterhöhung
		Lastreduktion
EDC-Speicher	Membran (PVC)	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Kapazitätserhöhung (nur Lastverschiebung)	Membran	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Virtuelles Kraftwerk (nur Lastverschiebung)	alle	Lasterhöhung
		Lastreduktion
Schaltbare Sauerstoffverzehrkathode	Membran	Lasterhöhung
		Lastreduktion

Tabelle 5.4: Abgeschätzte Kosten für die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven (orange Schrift) in den verschiedenen Anforderungsprofilen. In Klammern die Kostenabschätzung für die Referenzanlage Darstellung des Effekts der Flexibilitätsoptionen und -perspektiven der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland.

Technisches Potenzial / Perspektive (gegenüber durchschnittlicher Auslastung)			Eingeschränktes technisches Potenzial / Perspektive unter Berücksichtigung von 50 % Verfügbarkeit <sup>8</sup>		
MW	MW	MW	MW	MW	MW
1	2	3	1	2	3
-16 In der Regel nicht verfügbar	-	-	-4 bis -13 In der Regel nicht verfügbar	-	-
+443	-	-	+21 bis +95		
-11 In der Regel nicht verfügbar	-	-	-3 bis -10 In der Regel nicht verfügbar	-	-
+273	-	-	+15 bis +61	-	-
-	-	-	-	-	-
+125	+125	+125	+54 bis +95	+54 bis +95	+54 bis +95
-106	-	-	-25 bis -88		
+255	-	-	+76 bis +194		
-150	-	-	-28 bis -119		
+358	-	-	+82 bis +252		
-32	-32	-32	+8 bis -27	-8 bis -27	-8 bis -27
+32	+32	+32	+8 bis +27	+8 bis +27	+8 bis +27

<sup>8</sup> Lastverschiebung muss innerhalb von einer halben Schicht 4 h (inklusive Abrufdauer) wieder kompensiert sein, Rampe jeweils 0,25 h, d.h. Verhältnis  $x_2 \leq 6x_1$ .  
Es wird von einer betriebsbedingten Verfügbarkeit der Hälfte der Anlagen ausgegangen.

Geschätzte Kosten für Flexibilitätsmaßnahmen		
€/MWh	€/MWh	€/MWh
1	2	3
365 à 15 Minuten	52 à 8 Stunden	12 à 72 Stunden
In der Regel nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
230 bis 600 (535)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
In der Regel nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
300 bis 560 (535)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
In der Regel nicht verfügbar	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
400 bis 480 (425)	200 bis 250 (220)	200 bis 250 (220)
2.500 bis 2.800 (2.590)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
1.200 bis 1.800 (1.390)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
3.600 bis 3.700 (3.675)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
1.100 bis 2.000 (1.230)	Nicht verfügbar	Nicht verfügbar
3.640 (3.640)	770 (770)	350 (350)
3.815 (3.815)	865 (865)	440 (440)

## 5.9 DARSTELLUNG DES EFFEKTS DER FLEXIBILITÄTSOPTIONEN UND -PERSPEKTIVEN DER CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE IN DEUTSCHLAND

Die Angabe einer aggregierten Zahl für das Flexibilitätspotenzial oder die -perspektive ist unzureichend für eine abschließende Bewertung im Sinne des Beitrages zu dem aktuellen und zukünftigen Stromsystem.

Ein Flexibilitätsbedarf kann aus verschiedenen Gründen auftreten:

1. Sehr hoher Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung im Gesamtsystem, ohne dass ausreichend Abnehmer zur Verfügung stehen. (Lasterhöhung)
2. Sehr geringer Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung im Gesamtsystem, der auch nicht durch konventionelle Erzeugung kompensiert wird. (Lastreduktion)
3. Sehr hoher lokaler Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung, ohne dass ausreichend lokale Abnehmer oder Transportmöglichkeiten zur Verfügung stehen. (Lasterhöhung)
4. Sehr geringer lokaler Eintrag an erneuerbarer Stromerzeugung, ohne dass ein lokaler Ausgleich durch konventionelle Erzeugung möglich ist. (Lastreduktion)

Die ersten beiden Punkte setzen ausreichende Netzkapazitäten voraus, während die letzten beiden Punkte durch die nicht vorhandenen Netzkapazitäten entstehen. Da die Chlor-Produktion sich an dem Bedarf der Folgeprozess orientiert, ist eine Lasterhöhung (Punkte 1. und 3.) nur sinnvoll, wenn die zusätzliche Produktion weiterverarbeitet werden kann. Lastreduktionen hingegen, sind mit Produktionsausfall verbunden und müssen kompensiert werden. Aufgrund der Netzausbaupläne und des geplanten Ausbaus erneuerbarer Stromerzeugung ist davon auszugehen, dass die Situationen „lokale Engpässe“ oder „lokale Überschüsse“ auch absehbar mittelfristig den Flexibilitätsbedarf definieren werden.

Es ist daher relevant, wo sich der Flexibilitätsanbieter in Bezug auf den Flexibilitätsbedarf räumlich befindet. Ein Flexibilitätsbedarf an der Küste kann nicht im Oberbayrischen kompensiert werden. Die folgende Abbildung 5.13 zeigt die Standorte der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland und ihre Produktionskapazitäten, hinterlegt mit den aktuellen Stromnetzstrukturen im Höchst- und Hochspannungsbereich. Der größte Standort ist DOW in Stade, während sich die anderen Standorte in Nordrhein-Westfalen konzentrieren. Darüber hinaus verfügen Chemieparks in Mitteldeutschland sowie in Hessen und Rheinland-Pfalz über Anlagen. Alle Standorte sind an das bestehende Höchst- (380 kV) oder Hochspannungsnetz (220 kV) angebunden.

Die absehbaren Schwerpunkte der Erzeugung von erneuerbarem Strom liegen an den Küsten im Norden für Windkraft und im Süden für Photovoltaik. Die Zentren der Chlor-Alkali Elektrolyse liegen nicht in unmittelbarer Nähe der erneuerbaren Stromerzeugung und können damit nur einen eingeschränkten Beitrag im Sinne der Flexibilität leisten.

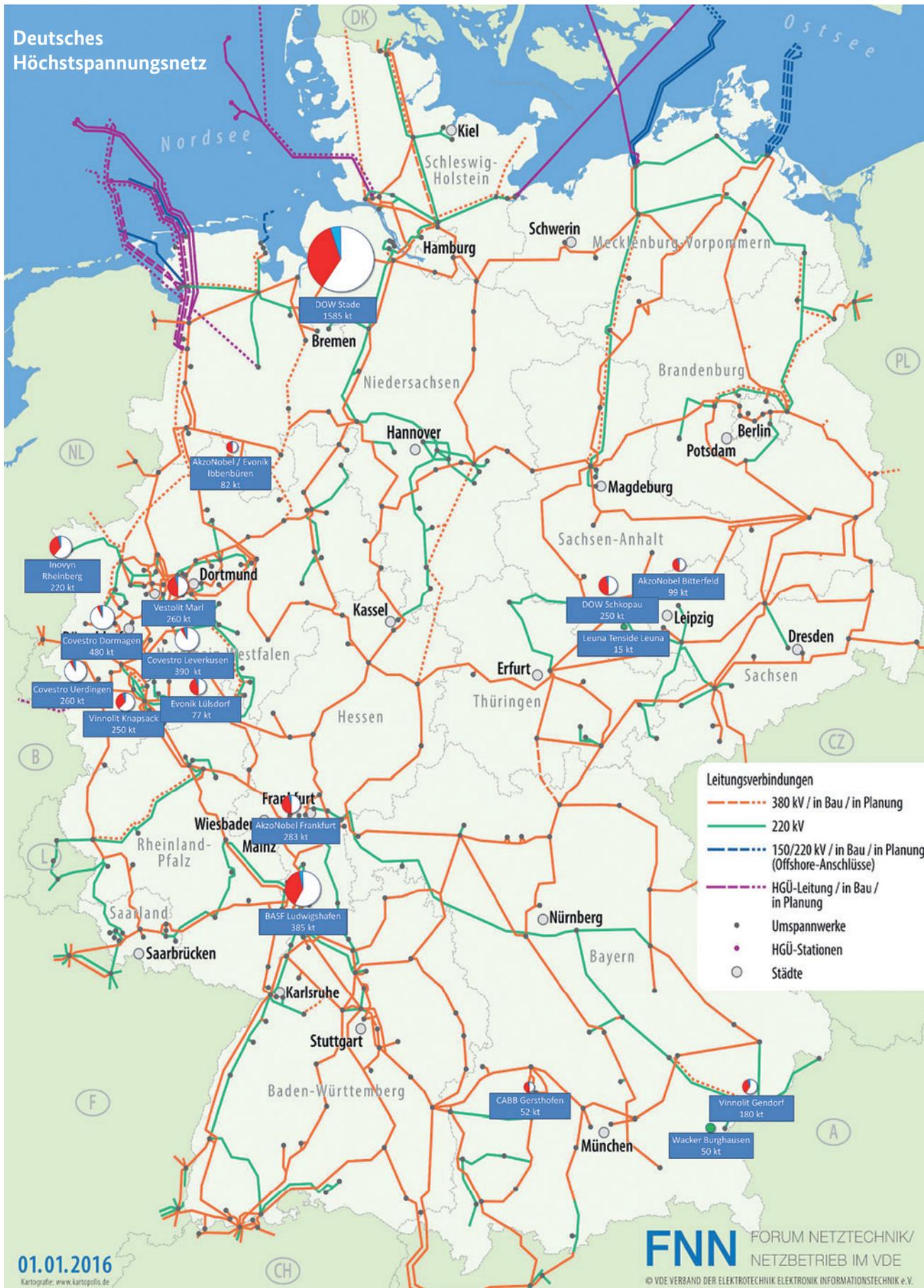


Abbildung 5.13: Standorte und technisches Teillastpotenzial für eine Auslastung von 95 % der Chlor-Alkali Elektrolyse in Deutschland, hinterlegt mit den aktuellen Stromnetzstrukturen [20]. Für die grün eingefärbten Standorte liegen keine Daten vor.

## 5.10 ZUSAMMENFASSUNG

Die Chlor-Alkali Elektrolyse stellt die Versorgung von Chlor und der Koppelprodukte für die Folgeprozesse an den Chemie Standorten sicher. Sie ist die Grundlage für die auf Chlor beruhenden Prozess- und Wertschöpfungsketten. Die Weiterverarbeitung ist sehr standortspezifisch. Die Flexibilität der Anlagen ist technisch nach unten (Lastreduktion) auf die minimale Teillast beschränkt und nach oben (Lasterhöhung) durch die maximale Last. Der Betrieb erfolgt mit sehr hoher Auslastung (>95 %), womit Lasterhöhungen als Flexibilitätspotenzial praktisch nicht vorhanden sind.

Eine Lastreduktion führt zu einem Produktionsverlust, während eine Lasterhöhung eine ausreichende Kapazität in den Folgeprozessen zur Weiterverarbeitung voraussetzt, da eine Chlorspeicherung nur in geringen Mengen erfolgt. Eine Ausnahme bildet die PVC-Produktion, in der mit EDC ein speicherbares und handelbares Zwischenprodukt entsteht, welches die Folgeprozesse (nach EDC) von der Chlor-Alkali Elektrolyse entkoppelt.

Denkbare Flexibilitätsperspektiven sind die Installation von Überkapazitäten, die Verknüpfung mit einer Batterie zu einem virtuellen Kraftwerk und die Nutzung schaltbarer Sauerstoffverzehrkathoden im Membran-Verfahren.

Die möglichen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven sind mit nicht vernachlässigbaren Zusatzkosten für die Unternehmen verbunden, die durch die Flexibilitätsmaßnahmen mindestens abgedeckt werden müssen, um das Anbieten von Flexibilität aus Sicht der Unternehmen betriebswirtschaftlich zu ermöglichen. Die Kosten sind dabei sehr standortspezifisch und müssen die folgenden Wertschöpfungsketten berücksichtigen.

Die Priorität der Unternehmen liegt in der Herstellung und Belieferung der Kunden mit den jeweiligen Produkten. Auch eine attraktive Vergütung der Flexibilitätsmaßnahme darf nicht zu einer Gefährdung der Kundenbeziehung führen.

Der mögliche Beitrag der Chlor-Alkali Elektrolyse durch Anbieten von Flexibilität zur Stabilität des Stromnetzes wird durch die räumliche Verteilung der Standorte eingeschränkt. Daher sind die ausgewiesenen technischen Flexibilitätspotenziale und -perspektiven nur eine aggregierte Information. Eine umfassende Bewertung des Beitrages setzt eine räumlich aufgelöste Analyse der sich im Laufe der Zeit verändernden Flexibilitätsanforderungen voraus.

## 5.11 AUSBLICK

Die Chlor-Alkali Elektrolyse hat ein höheres Potenzial für die Bereitstellung von Flexibilitätsdienstleistungen als gegenwärtig genutzt wird. Das Anbieten von Flexibilität oder anderen energiewirtschaftlichen Dienstleistungen durch die Chlor-Alkali Elektrolyse ist jedoch immer der termin- und spezifikationsgerechten Belieferung der Kunden mit den Produkten nachgeordnet.

Neben den Möglichkeiten, die sich durch die Implementierung der hier beschriebenen Technologien und weiterer Innovationen auf tun, sind auch noch einige Herausforderungen zu adressieren:

- Das Anbieten von Flexibilität muss für die beteiligten Unternehmen wirtschaftlich sein.
- Das Primat der betrieblichen Erfordernisse vor energiewirtschaftlichen Dienstleistungen muss sichergestellt sein, z.B. über das Pooling von Flexibilitätsoptionen bei Aggregatoren.
- Das Verhalten und die Lebensdauer von Anlagen und Anlagenkomponenten unter der Bedingung häufiger Lastwechsel sind noch nicht ausreichend untersucht [21]. Dieser Aspekt sollte im Rahmen von F&E-Projekten unter direkter Beteiligung der Anlagenbetreiber und Anlagen- bzw. Komponentenhersteller adressiert werden.
- Der Einfluss von häufigen Lastwechseln auf Produktqualitäten ist noch nicht ausreichend bekannt. Ggfs. sind zusätzliche Investitionen für Aufreinigungs- und Abtrennungsprozesse erforderlich. Diese Fragestellungen können nur standortspezifisch beantwortet werden.
- Die (zunehmende) Notwendigkeit der Flexibilitätsbereitstellung ist in dem gegenwärtigen Regulierungswerk nur unzureichend abgebildet. Lediglich die noch recht junge AbLaV berücksichtigt dies in ausreichendem Maße indem durch die Bereitstellung von Flexibilität ausgelöste Minderungen der Vollbenutzungsstunden nicht berücksichtigt werden. Insbesondere §19 Abs. 2 der StromNEV [13] fördert zur Netzstabilisierung einen möglichst konstanten Betrieb der Anlagen, was in entsprechend neu zu formulierende Ausnahmeregelungen bei den verschiedenen Flexibilisierungsinstrumenten (siehe AbLaV) Berücksichtigung finden muss. Hohe Kosten für Lastspitzen werden durch aktives Lastspitzenmanagement vermieden. Ein zukünftig flexibleres System müsste einen anderen, systemdienlicheren Pfad eröffnen.
- Investitionen zur Bereitstellung von zusätzlichen Flexibilitätsperspektiven benötigen einen Rahmen, in dem sich die Investition betriebswirtschaftlich sinnvoll darstellen lässt.

Die Chlor-Alkali Elektrolyse wird aufgrund ihrer Bedeutung in der Grundstoffchemie auch weiterhin eine wichtige Rolle spielen. Als strombasierter Prozess wird sie auf die kommenden Veränderungen des Stromsystems reagieren müssen und bietet Möglichkeiten, sich konstruktiv, im Sinne einer Stabilisierung des Stromnetzes durch Bereitstellung von Flexibilität, einzubringen. Damit leistet sie einen Beitrag zur Sicherheit der zukünftigen Energieversorgung und zur Zukunft des Industriestandortes Deutschlands, auch für energieintensive Industrien.

## 5.12 ANHANG

### 5.12.1 GRUNDLAGEN DER BERECHNUNGEN

Die Berechnungen wurden auf Basis von vertraulichen Anlagendaten der Betreiber durchgeführt. Neben den anlagenspezifischen Daten wurden allgemeine Parameter verwendet. Um eine Transparenz der Vorgehensweise und der ermittelten Kosten sicherzustellen, wurden die Kosten ebenfalls für eine imaginäre Referenzanlage errechnet. Die allgemeinen Parameter und die Annahmen für die Referenzanlage sind in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

## 5.12.2 VERWENDETE PARAMETER

Tabelle 5.5 stellt die für die Modellierungen und Kostenabschätzungen verwendeten Parameter dar.

Tabelle 5.5: Übersicht über die verwendeten Parameter

Parameter	Wert	Einheit	Anmerkungen
Abrufdauer (Anforderungsprofil 1)	0,25	h	Schnelle Variation
Abrufdauer (Anforderungsprofil 2)	8	h	Tageszeitliche Variation
Abrufdauer (Anforderungsprofil 3)	72	h	Dunkle Flaute
Abrufhäufigkeit (Anforderungsprofil 1)	365	#	Schnelle Variation
Abrufhäufigkeit (Anforderungsprofil 2)	52	#	Tageszeitliche Variation
Abrufhäufigkeit (Anforderungsprofil 3)	12	#	Dunkle Flaute
Rampenzeit	0,25	h	Pro Rampe
Durchschnittliche Auslastung	95	%	Bezogen auf Gesamtproduktionskapazität
Wartung	336	h	2-wöchiges Wartungs- und Reparaturintervall
Verlauf des spezifischen elektrischen Energiebedarfs der Elektrolyse	b=0,20486 a=0,79514	Y=bx+a	[4]
Netzentgelte	>8.000 h = 10 % >7.500 h = 15 % >7.000 h = 20 % <7.000 h = 100 %	%	Auf Basis §19 Abs. 2 StromNEV, Annahme: 40.000 €/MWaw
Investitionskosten Kapazität	1.000	€/kW	
Investitionskosten SVK	200	€/kW	
Abschreibungszeitraum	5	a	
Zinssatz	10	%	
Stromkosten (Arbeitspreis)	40	€/MWh	
Chlorspeicher Gesamtkapazität	24 h Produktion	tCl <sub>2</sub>	Wenn Größe unbekannt
Chlorspeicher Flexibilität	6 h Flexibilität	tCl <sub>2</sub>	25 % wenn Größe bekannt
EDC-Speicher Gesamtkapazität	72	h	
EDC-Speicher Flexibilität	25	%	
<b>Marktpreise</b>			
Chlor (Cl <sub>2</sub> )	90	€/t	
Natronlauge (Trockengewicht)	350	€/t	
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	1.000	€/t	Entspricht Gaspreis bezogen auf den unteren Heizwert
Gesamtwert ECU	513	€/t Cl <sub>2</sub>	Pro produzierte Tonne Chlor
Ethylendichlorid (EDC)	410	€/t	
PVC	790	€/t	
Gesamtwert PVC	1.120	€/t Cl <sub>2</sub>	Pro produzierte Tonne Chlor
Steinsalz (NaCl)	40	€/t	
Ethylen	920	€/t	
Vinylchlorid	550	€/t	

### 5.12.3 REFERENZANLAGE CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE

Für die Beispielrechnungen in diesem Kapitel wird eine Referenzanlage für die Chlor-Alkali Elektrolyse zugrunde gelegt. Diese Anlage ist idealisiert und entspricht keiner realen Anlage. Ihr Zweck ist es, die Größenordnung und die Auswirkungen von Flexibilitätsoptionen und -perspektiven abzuschätzen. Die verwendeten Parameter zur Beschreibung der Referenzanlage sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Parameter	Größe	Einheit	Anmerkungen
Nominale Produktionskapazität	175,2	kt/a	Bei 8760 Volllaststunden
Reale Produktionskapazität	168,48	kt/a	Bei 8424 Volllaststunden
Installierte Leistung	50	MW	
Jährliche Betriebsstunden	8424	h	
Wartung und Reparatur	336	h	
Spezifischer Strombedarf	2,5	MWh/tCl <sub>2</sub>	Pro ECU
Stündliche Chlorproduktion unter Volllast	20	tCl <sub>2</sub>	Entspricht einer Strommenge von 50 MWh
Jährlicher Strombedarf unter Volllast	412,2	GWh	
Chlorspeicher	500	tCl <sub>2</sub>	Entspricht rund 24 h Volllast (1250 MWh)
Dynamischer Bereich des Chlorspeichers	250–500 (50–100 %)	tCl <sub>2</sub>	Aufgrund der Gewährleistung der Sicherheit der Folgeprozesse
Dynamischer Bereich für die Elektrolyse	25–50 (50–100 %)	MW	
Zeitraum konstanter Last gemäß §19.2 der Netzentgeltverordnung (StromNEV)	7.500	h	Reduziert Netzentgelte auf 15 %
EDC-Speicher			Falls benötigt

Tabelle 5.6: Parameter der Referenzanlage

## 5.12.4 DANKSAGUNG

Die Autoren dieses Kapitels möchten sich ausdrücklich bei folgenden Personen für die Diskussionen, Informationen und Rückmeldungen bedanken:

Jürgen C. Baune, Akzo Nobel Industrial Chemicals B.V.  
Holger Brezski, Evonik Technology & Infrastructure GmbH  
Christian Essers, Wacker Chemie AG  
Holger Friedrich, BASF SE  
Dirk Hoormann, thyssenkrupp, Uhde Chlorine Engineers GmbH  
Klaus-Michael Mangold, DECHEMA Forschungsinstitut  
Volkert Mehrwald, Dow Deutschland Anlagengesellschaft mbH  
Karen Perrey, Covestro Deutschland AG  
Markus Scheuren, BASF SE  
Philipp Stahlhofen, CABB GmbH  
Martin Trennhaus, Vestolit GmbH  
Sebastian Vomberg, Vestolit GmbH  
Rainer Weber, Covestro Deutschland AG  
Claudia Weidlich, DECHEMA Forschungsinstitut  
Michael Winhold, Vinnolit GmbH & Co. KG

## 5.13 LITERATURVERZEICHNIS

Andreas Schneider, Inovyn Deutschland GmbH  
**Alle Internetadressen gültig zum 20. Februar 2018.**

- [1] T. Brinkmann, G. Giner Santonja, F. Schorcht, S. Roudier, L. Delgado, Sancho; European Commission; JRC Science and Policy Reports; Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali, ISBN 978-92-79-40945-5 (PDF), Luxembourg 2014. [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CAK\\_BREF\\_102014.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/CAK_BREF_102014.pdf)  
 Zusätzliche Quellen für Abbildung 1:  
 Ullmann's, 'Chlorine', Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 7th edition, electronic release, 2006.  
 Kirk-Othmer, 'Chlorine', Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 2002.
- [2] Schmidt, V. M. Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozeßoptimierung. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2003. isbn: 978-3-527-29958-4.
- [3] Schmittinger, P., Florkiewicz, T., Curlin, L. C., Lüke, B., Scannell, R., Navin, T., Zelfel, E. und Bartsch, R. „Chlorine“. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Electronic Re-lease. Hrsg. von Bohnet, M., Bellussi, G., Bus, J., Cornils, B., Drauz, K., Greim, H., Herrmann, W. A., Jäckel, K.-P., Karst, U., Kleemann, A., Kreysa, G., Laird, T., Meier, W., Plass, L., Röper, M., Sawamoto, M., Scholtz, J., Schubert-Zsilavec, M., Sundmacher, K., Ulber, R., Yoda, N., Wietelmann, U. und Zass, E. Wiley-VCH, 2011. doi:10.1002/14356007.a06\_399.pub3
- [4] D. Hoormann, thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineers, persönliche Korrespondenz.
- [5] VDE Studie, Demand Side Integration, Lastverschiebungspotenziale in Deutschland, R. Apel, B.M. Buchholz, H.P. Domels, 2012.
- [6] Amtsblatt der Europäischen Union, Verordnung (EU) 2017/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2017 über Quecksilber und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1102/2008 (Text von Bedeutung für den EWR.)
- [7] Minamata Convention on Mercury, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, beschlossen am 10.10.2013, in Kraft getreten am 16.8.2017.  
<http://www.mercuryconvention.org/>
- [8] Eurochlor, Industry Review 2016-2017, Brüssel 2017.
- [9] EuroChlorWebseite:<http://www.eurochlor.org/the-chlorine-universe/the-chlor-alkali-industry-in-europe.aspx>

- [10] Euro Chlor: <http://www.eurochlor.org>
- [11] Vinnolit Webseite: [https://www.vinnolit.com/vinnolit.nsf/id/DE\\_VCM-Process](https://www.vinnolit.com/vinnolit.nsf/id/DE_VCM-Process)
- [12] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist.
- [13] Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2503) geändert worden ist.
- [14] Verordnung zu abschaltbaren Lasten vom 16. August 2016 (BGBl. I S. 1984), die zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist.
- [15] M. Scheuren, Energieversorgung BASF SE persönliche Korrespondenz
- [16] F. Holtrup „Potenzial für Demand Side Management der energieintensiven Industrie in Deutschland – Eine Kostenbetrachtung am Beispiel der Chlor-Alkali-Elektrolysen“, Welt Energie Rat Deutschland, Berlin 2015.  
<http://www.weltenergie.de/wp-content/uploads/2014/03/2016-01-DSM-Papier-v8.pdf>
- [17] F. Ausfelder et al. „Energy Storage as Part of a Secure Energy Supply“ ChemBioEng. Rev. 2017 4(3) 144-210, DOI 10.1002/cben.201700004.  
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cben.201700004/epdf>
- [18] Frankfurter Rundschau vom 15.09.2014: <http://www.fr.de/wirtschaft/batteriespeicher-in-schwerin-europas-groesster-batteriespeicher-a-563724>  
WEMAG 10-MW-Batteriespeicherkraftwerk  
<https://www.wemag.com/sites/default/files/20170714%20Faktenblatt%20WEMAG%20Batteriespeicher.pdf>
- [19] UniEnergy Technologies. <http://www.uettechnologies.com/news/71-200mw-800mwh-energy-storage-station-to-be-built-with-rongke-power-s-vanadium-flow-battery>
- [20] Forum Netztechnik im VDE (FNN) 2016, VDE Verband der Elektrotechnik Informationstechnik e.V.
- [21] F. Klauke, T. Karsten, F. Holtrup, E. Esche, T. Morosuk, G. Tsatasronis, J.-U. Repke; Demand Response Potenziale in der chemischen Industrie; Chem. Ing. Tech. 2017 89 (9) 1133-1141, DOI: 10.1002/cite.201600073



## KAPITEL 6

# **FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE UND -PERSPEKTIVEN IN EINER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE FÜR FEUERFESTMATERIALIEN**

Christian Dannert, Hartmut Wuthnow,  
Forschungsgemeinschaft Feuerfest e.V., Höhr-Grenzhausen

Olaf Krause,  
Hochschule Koblenz, Höhr-Grenzhausen

Tomke Janßen, Karin Arnold,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Ralph-Uwe Dietrich, Stefan Estelmann,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

## 6.1 BEDEUTUNG DER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE IN DER FEUERFESTINDUSTRIE

<sup>1</sup>Die Feuerfestindustrie wird entsprechend der Klassifikation der Wirtschaftszeige (WZ 2008) unter dem Kode 23.2 geführt.

Die deutsche Feuerfestindustrie<sup>1</sup> als ein Teilbereich der Keramikindustrie produziert feuerfeste keramische Werkstoffe im Wert von etwa 1,5 Mrd. € im Jahr mit etwa 6.300 Beschäftigten [1] und beliefert damit im Wesentlichen die Industriebereiche (Nutzer-Industrien, s. Abbildung 6.1):

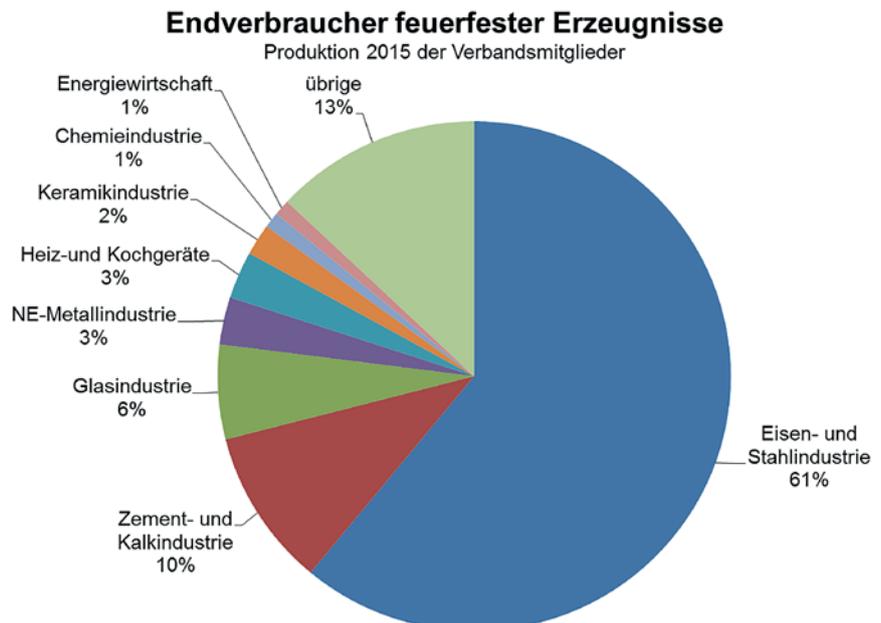
- Eisen- und Stahlerzeugung,
- Nichteisenmetallurgie,
- Zement, Kalk, Gips,
- Glas,
- Keramik,
- Energie,
- Umwelt und Chemie

Die von der Feuerfest-Industrie direkt belieferten Industriezweige wiederum erwirtschafteten im Jahr in Deutschland mit etwa 400.000 Beschäftigten einen Umsatz von etwa 230 Mrd. €.

Feuerfeste Keramikerzeugnisse sind in Form von geformten und gebrannten Steinen, ungeformten Produkten zur Herstellung von Feuerbetonen, Fertigbauteilen sowie Mörteln und Kittungen verfügbar [2].

Zu ihrer Produktion werden natürliche und synthetische Rohstoffe verwendet, die in einem ersten Herstellungsschritt mit Zusätzen versehen und gemischt werden (Masseaufbereitung). Geformte Produkte sowie Fertigbauteile werden anschließend gepresst oder in Formen gegossen (Formgebung) und getrocknet (Trocknung). Nach dem anschließenden Sinterbrand folgt ggf. noch eine Nachbearbeitung, dann die Qualitätskontrolle, die Verpackung und der Versand an die Endverbraucher [3].

Abbildung 6.1: Anteile der Nutzer-Industrien an feuerfesten Erzeugnissen in %



Quelle: VDFFI

Die Sinterung der gepressten und getrockneten Feuerfestprodukte erfolgt technologisch bedingt in gasbefeuchten Öfen. Daher beträgt der Anteil von Brenngas etwa 82,5 % an dem Energieverbrauch zur Feuerfest-Produktion (2015). Die Nutzung von Gasen ist beim Sinterprozess wegen der hohen Sintertemperaturen von bis zu 1.700 °C erforderlich und kann aktuell nicht elektrisch substituiert werden.

Eine Übersicht der relevanten Daten für die Feuerfestindustrie ist im Branchensteckbrief dargestellt (Abbildung 6.2).

Hochwertige Feuerfestprodukte werden zum großen Teil aus Schmelzrohstoffen hergestellt. Synthetische Schmelzrohstoffe sind vormals natürliche Rohstoffe, die in Rohstoffschmelzanlagen einmal aufgeschmolzen wurden und dabei besondere Reinheit und chemische Beständigkeit erwerben. Die vielfältigen Feuerfestprodukte, die aus Schmelzrohstoffen hergestellt werden, finden in mindestens 85 % der oben genannten Nutzer-Industrien Anwendung. Je nach Prozess wird hier auf unterschiedliche stoffliche Systeme der Schmelzrohstoffe zurückgegriffen, deren Natur sich nach den jeweiligen Prozessanforderungen richtet, um sowohl den thermischen Erfordernissen als auch der chemischen Beständigkeit gerecht zu werden.

Synthetische Schmelzrohstoffe sind im Folgenden aufgelistet:

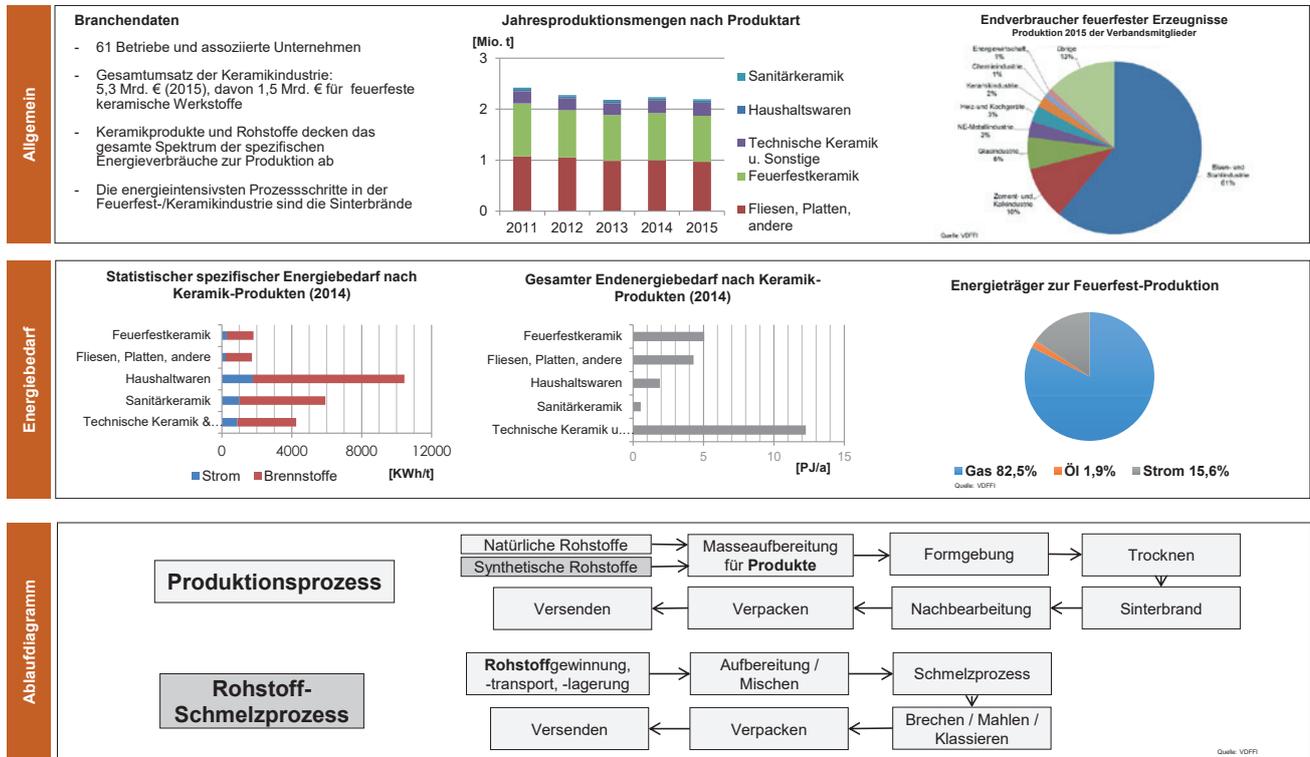
- Edelkorund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- Normalkorund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
- Schmelzmullit ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ),
- Schmelzmagnesia ( $\text{MgO}$ ),
- Schmelzspinell ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ),
- Quarzgut ( $\text{SiO}_2$ ),
- Schmelzzirkonmullit ( $\text{ZrSiO}_4 \cdot \text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ ),
- Schmelzzirkonkorund ( $\text{ZrSiO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) und
- Schmelzpikrochromit ( $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ).

Insbesondere Feuerfestprodukte, die in Thermoprozessanlagen bei sehr hohen Temperaturen eingesetzt werden und dort exzellente Temperatur- und Korrosionsbeständigkeiten und eine besonders lange Lebensdauer erreichen sollen, werden auf Basis synthetischer Schmelzrohstoffe von Unternehmen der Rohstoffveredlung hergestellt [4] [5].

Diese synthetischen Schmelzrohstoffe weisen hochwertige und reproduzierbare Eigenschaften auf wie hohe chemische Reinheit, hohe Dichte, geringe oder keine offene Porosität und eine definierte Kristallinität. Um diese besonderen Eigenschaften erfüllen zu können, werden die synthetischen Rohstoffe in **Rohstoffschmelzanlagen** aus natürlichen Rohstoffen erschmolzen. Dabei müssen die sehr hohen Schmelztemperaturen der Rohstoffe überschritten werden:

- |               |          |
|---------------|----------|
| • Mullit      | 1.810 °C |
| • Korund      | 2.050 °C |
| • Chromkorund | 2.060 °C |
| • Spinell     | 2.135 °C |
| • Zirconia    | 2.710 °C |
| • Magnesia    | 2.820 °C |

Abbildung 6.2: Branchensteckbrief für die Feuerfest-Industrie



## 6.2 ROHSTOFFSCHMELZPROZESS – METHODIK DER DATENERHEBUNG

Die grundlegenden Angaben zum Prozess „Rohstoffschmelzanlage“ sind durch Recherchen in Publikationen, veröffentlichten Unternehmensdaten, Aggregate- und Anlagenspezifikationen und in den Verbandsstatistiken des Verbandes der Deutschen Feuerfest-Industrie e. V. erhoben worden.

Darauf aufbauend erfolgte die Identifizierung der Rohstoffschmelzanlage als eines Anlagentyps, der zu seinem Betrieb kontinuierlich beträchtliche Mengen an elektrischer Energie benötigt, um u. A. die Feuerfest-Industrie in verlässlicher Art und Weise mit Schmelzrohstoffen beliefern zu können.

Durch Telefoninterviews mit Anlagenbetreibern wurde vorab erörtert, ob ihrerseits die Bereitschaft bestünde, die Projektarbeiten mit Angaben zu dem jeweiligen Schmelzprozess zu unterstützen. Für diese Sondierungsarbeiten standen die Betriebsleitungen und das Energiemanagement als Gesprächspartner zur Verfügung.

Im Rahmen eines mehrtägigen Werksbesuches erfolgten dann durch die Forschungsgemeinschaft Feuerfest e. V. die Begehung einer Rohstoffschmelzanlage und der dazugehörigen Peripherie, die detaillierte Besprechung aller relevanten Themen und die Datenerhebung. Das ge-

schah unter Mitwirkung der Werksleitung, des Energiemanagements und der Qualitätssicherung.

Zurückhaltung wurde gewahrt, als es um Verbrauchsdaten, Preise, Investitionen, Strategien und F&E-Vorhaben ging. Solche Angaben gelten als betriebliche Daten, die nur betriebsintern verwertet werden.

### 6.3 TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES SCHMELZPROZESSES UND DESSEN EINBETTUNG IN DEN GESAMTPROZESS

Die Herstellung von Schmelzkorund in einer Rohstoffschmelzanlage (Lichtbogenofen) ist im Steckbrief (Abbildung 6.3) beschrieben worden.

In diesem Prozess wird hochwertiger Schmelzkorund mit speziellen Eigenschaften erzeugt, der u. a. Eingang in besonders belastbare Feuerfestprodukte findet.

Der so hergestellte synthetische Rohstoff [7] [8] wird anschließend in Produktionsprozessen der Feuerfest-Industrie eingesetzt. Der betrachtete Schmelzprozess ist somit ein Vorprozess der Herstellung von Feuerfest-Produkten.

Abbildung 6.3: Steckbrief des Schmelzprozesses: Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung von Schmelzkorund (4 MW Lichtbogenofen)

<b>Prozess</b>	<b>Prozessablauf</b> 		<b>Schmelzanlage</b> Typische Größenordnung in MW Technisches Potenzial Flexibler Anteil Stunden/Jahr Dauer in Min. Häufigkeit	<b>Typischer Prozess</b> 3,2– 3,7 <b>1350 kWh / Tonne</b> 2 % 5 Min Bis zu 6 mal täglich	<b>Technische Abhängigkeiten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Energetisch optimierter Prozess</li> <li>- Festgelegter Energieeintrag pro Tonne Erzeugnis (Schmelzenthalpie)</li> <li>- Geringere Schmelzleistung führt zu Energieverlusten durch Kühlung</li> <li>- Ofen darf nicht auskühlen (Restschmelze immer vorhanden).</li> <li>- Ofen läuft 5 Jahre bis zu nächsten Überholung durch</li> </ul>
	<b>Energetische Erfordernisse und Energiebedarf</b> Strom            29 GWh/a.		<b>Aktuelle Energiekosten</b> k. A.	<b>Kurzzeitige Nachfragereduktion</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Kurzzeitige Lastverschiebung über 15 Min. ist mit kurzfristiger Voranmeldung möglich.</li> <li>- Mittelfristige Lastverschiebung für 30-60 Min. ist möglich, wenn die Produktionsleistung in einem Zyklus kompensiert werden kann.</li> <li>- Kurzzeitige Abschaltung der Schmelzanlage für 5 Minuten ist möglich bei einem gesicherten Wiederanfahren.</li> </ul>	<b>Nachfragereduktion über 3-12 Stunden mit täglicher Ankündigung und über 1-5 Tage mit 2-5 Tagen Vorlauf</b> Diese Anforderungsprofile sind nicht möglich. Der Ofen müsste außer Betrieb genommen werden, Produktionsausfall tritt ein und das Wiederanfahren kann Auswirkungen auf die Produktqualität haben.
<b>Potenziale und Kosten</b>	<b>Künftige Energiekosten</b> Geknüpft an die Entwicklung der zukünftigen Netzentgeltspolitik.	<b>Hochrechnung der energetischen Flexibilität:</b> Es wäre eine kurzzeitige positive Laständerung auf 4,0 MW denkbar (+300 kW). Positive Laständerung nur mit Vorankündigung von 1 Stunde möglich.	<b>Flexibilisierung der Produktionskapazität:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rohstoffe und Zwischenprodukte können praktisch beliebig lange in Rohstoffbunkern oder Kühlfeldern mit ausreichender Kapazität zwischengelagert werden.</li> <li>- Die Kapitalbindung ist zu beachten.</li> <li>- Flexibilisierung des Schmelzprozesses nur in technisch engen Grenzen.</li> </ul>	<b>Hemmnisse für Laständerungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Negative Laständerungen sind nur im Rahmen kurzzeitiger Nachfragereduktionen möglich.</li> <li>- Energieeintrag pro Tonne Erzeugnis ist klar definiert.</li> <li>- Bei Lastverringern verlängert sich die Schmelzzeit. Leistungserhöhung nur kurzzeitig, um den Ofen nicht zu überhitzen.</li> </ul>	

Rohstoffschmelzanlagen werden, bedingt durch hohe Schmelztemperaturen, je nach Material zwischen 1.800 und bis zu 2.800 °C vollelektrisch betrieben. Schmelzkorund wird in einem kontinuierlichen Batchprozess in elektrisch betriebenen Lichtbogenöfen bei Temperaturen oberhalb von 2.050 °C hergestellt. Mit fossilen Brennstoffen betriebene Brenner erreichen nicht die benötigten hohen Schmelztemperaturen.

Die Produktion erfolgt ununterbrochen, der kontinuierliche Chargenprozess ist energetisch optimiert und wird nur einmal im Jahr für eine Revision unterbrochen.

Die Herstellung des Schmelzkorunds erfolgt nach folgendem Prozess:

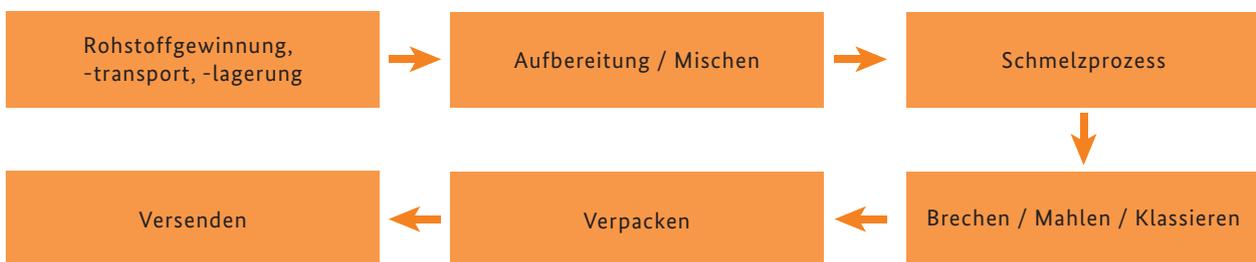


Abbildung 6.4: Prozesskette der Schmelzkorund-Herstellung

Dabei wird der angelieferte Rohstoff (Korund), der in Silos gelagert wird, chargenweise aufbereitet in den Lichtbogenöfen gefüllt. Anschließend wird der Lichtbogenofen durch das Absenken von zwei Elektroden „gezündet“ und der Schmelzprozess begonnen. Der Wärmeeintrag erfolgt in Form von Strahlung und Konvektion des Lichtbogens. Die elektrische Leistungsaufnahme wächst mit dem Schmelzfortschritt an, während die gemittelte elektrische Leistungsaufnahme, bezogen auf die Nennleistung, bei ca. 100 % über den gesamten Zeitraum des Schmelzprozesses liegt.

Pro Charge werden 10 Tonnen Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) in einem Zyklus von 4 Stunden aufgeschmolzen. Der betrachtete Ofen hat eine installierte Leistung von ca. 3,5 MW und kann im Bereich von 3,2 bis 3,7 MW betrieben werden. Zum Schmelzen einer Tonne Korund ist eine Energiemenge von 1,35 MWh erforderlich.

Nach dem Abguss des flüssigen Produkts in Transport- und Abkühlbehälter innerhalb von etwa 5 Minuten wird der Ofen der Schmelzanlage wieder gefüllt und der Prozess fortgesetzt. Beim Abguss wird darauf geachtet, dass eine geringe Menge an Schmelze im Ofen verbleibt, um ihn nicht auskühlen zu lassen.

Die Schmelze erstarrt und kühlt in den Transport- und Abkühlbehältern ab, so dass die erstarrten Korundblöcke in ein Zwischenlager deponiert werden und die Abkühlbehälter nach 4 Stunden die nächste Produktcharge aufnehmen können.

Die erkalteten Korundblöcke werden zur Aufbereitung den nachgeschalteten Zerkleinerungsgängen zugeführt. Zuerst ist das Brechen in unterschiedliche Größen, danach die Mahlung und Feinmahlung und am Ende das Klassieren vorgesehen. Durch das Sieben wird sichergestellt, dass die Korngrößen exakt eingehalten werden. Zwischen diesen einzelnen

Aufbereitungsschritten sind Silokapazitäten eingerichtet worden, um den klassierten Schmelzkorund zwischenzulagern.

Mit zunehmender Mahlfeinheit nehmen Energieeinsatz und Mahlzeit zu. Während der grobe Brecher 3 Stunden am Tag betrieben wird, müssen der mittlere Brecher bereits 6 Volllaststunden am Tag und die Feinmahlung kontinuierlich betrieben werden.

Der letzte Produktionsschritt besteht aus der Verpackung des Schmelzkorund-Rohstoffes beispielsweise in Big Bags oder Säcke und der Auslieferung an die Feuerfestindustrie und weitere Abnehmer.

## 6.4 IDENTIFIKATION WESENTLICHER HEMMNISSE – METHODIK UND DATENGRUNDLAGE

Die Ermittlung der technischen und organisatorischen Restriktionen zur Flexibilisierung von Rohstoffschmelzanlagen wurde nach der in Kapitel 1.2 beschriebenen Methodik durchgeführt. Entsprechend des dort vorgestellten Analyserasters sind die verschiedenen zeitlich-organisatorischen Hemmnis-Ebenen und die technischen Restriktionen eingearbeitet worden. Anschließend werden die Flexibilisierungsmöglichkeiten für die drei vorgestellten Anforderungsprofile (siehe auch Kapitel 1.4) erörtert.

Verglichen mit anderen im Projektkontext behandelten Branchen wird die Branche der Rohstoffveredler in der Literatur nicht separat bezüglich Flexibilisierungspotenzialen und Hemmnissen behandelt<sup>2</sup>. Als Grundlage für die folgenden Darstellungen dienen deshalb in erster Linie Experteninterviews, welche direkt mit den Unternehmen geführt wurden. Aufgrund einer geringen Anzahl an Unternehmen, die den Schmelzprozess in Deutschland betreiben, bestehen Vorbehalte bezüglich einer möglicher Zuordenbarkeit von identifizierten Hemmnissen zu einzelnen Standorten. Deshalb fanden die Expertengespräche zur Identifikation von Hemmnissen zwischen Vertretern des Forschungsinstituts der Feuerfestindustrie (FGF) und dem DLR bzw. dem Wuppertal Institut statt.

<sup>2</sup> Diverse Studien sprechen der übergeordneten Keramikindustrie Lastmanagementpotenziale zu, häufig werden diese jedoch nicht quantifiziert und wenn, nur aggregiert mit anderen Branchen (mit Glas oder auch mit Glas, Steinen und Erden) ausgewiesen. Zu diesen Studien zählen [9], [10], [11] und [12].

Die folgenden Darstellungen, die auf diesen Interviews beruhen, beinhalten die Identifikation der wesentlichen Prozesse und technischen Hemmnisse zur Flexibilisierung der Rohstoffschmelzanlage (DLR) und darüber hinaus Hemmnissen, die sich aus innerbetrieblichen Organisationsstrukturen und dem Marktumfeld ergeben (WI).

Die Untersuchung des technischen Flexibilitätspotenzials der Rohstoffschmelzanlage erfolgte unter der Bedingung, dass es keinen Ausfall in der Produktion von Schmelzkorund geben darf.

## 6.5 TECHNISCHES FLEXIBILITÄTSPOTENZIAL UND HEMMNISSE DER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE

### 6.5.1 TECHNISCHE LIMITATIONEN IM HINBLICK AUF LASTFLEXIBILISIERUNG

Das Schmelzaggregat besteht aus einer wassergekühlten, tragenden Stahlhülle, auf der im Betrieb eine „arteigene Schicht“ aus Korund-Rohstoff aufsintert und den Stahlmantel vor dem schmelzflüssigen Korund schützt. Diese arteigene Schutzschicht hat einen großen Einfluss auf die Lebensdauer des Schmelzaggregates, indem sie es vor irreversibler Zerstörung bewahrt.

Eine langfristige Steigerung des Wärmeeintrages durch erhöhten Leistungsbezug würde zu einer Abnahme der Schutzschicht führen, und ein direkter Kontakt der Schmelze mit dem wassergekühlten Stahlgefäß würde zur Zerstörung des Aggregates führen. Im Gegenzug kann durch ein Abkühlen mittels verringertem oder gar ohne Leistungsbezug der Elektroden ein Anwachsen der Schutzschicht erfolgen. Eine Regulation der arteigenen Schutzschicht erfolgt in begrenztem Maße, wobei eine zeitliche Degradation unvermeidlich ist. Dauerhafte Aufwärm- und Abkühlungsprozesse führen zur Oszillation der Mächtigkeit der Schutzschicht während des Produktionsprozesses.

Somit ist die Intensität des Wärmeeintrags die limitierende Prozessgröße für Flexibilitätsmaßnahmen. Kurzzeitige Leistungserhöhungen über die 3,7 MW hinaus sind aus technischer Sicht zulässig. Ebenfalls ist die Leistungsreduktion unterhalb der genannten 3,2 MW möglich, sofern die technischen Voraussetzungen vorliegen und die flüssige Schmelze in der Rohstoffschmelzanlage nicht zu erstarren beginnt.

Weiterhin ist als technische Limitation zur Lastflexibilisierung bedeutsam, dass die Schmelze nicht im Schmelzbehälter erstarren darf. Ein zu starkes Auskühlen der Schmelze im Ofen darf durch eine Lastflexibilisierung nicht zugelassen werden.

### 6.5.2 EINBETTUNG IN DIE PROZESSKETTE/ VERNETZTE PRODUKTIONSPROZESSE

Grundsätzlich stellt das Schmelzen aus rein technischer Sicht einen Prozessschritt dar, bei dem sowohl zu den vor- als auch zu den nachgelagerten Prozessschritten eine Unterbrechung möglich wäre. Der Schmelzprozess ist nicht direkt über Stoff- oder Energieflüsse mit anderen Produktionsprozessen gekoppelt.

Vor dem Schmelzen findet die Aufbereitung und Mischung des Rohstoffes statt. Aus technischer Sicht kann das Vorprodukt in Lagern zwischengespeichert werden. An den Schmelzprozess angeschlossen findet das Brechen, Mahlen und Klassieren statt. Sowohl nach dem Schmelzen als

auch nach dem Brechen (bzw. anderen Zerkleinerungsprozessen) könnten die Zwischenprodukte entsprechend der logistischen Ressourcen und der Lagerkapazitäten zwischengespeichert werden.

Qualitätsverluste durch Lagerung ergeben sich im Fall des Schmelzkorunds nicht. Im Falle anderer synthetischer Schmelzrohstoffe, wie beispielsweise Magnesia, kann eine Lagerung des Produktes zu Qualitätsverlust führen. Im Falle des betrachteten Schmelzprozesses gibt es ausreichende Lagerkapazitäten und durchschnittliche Lagerfüllstände, um Flexibilisierungspotenziale über mehrere Stunden (bis zu Tagen) zu erschließen. Es könnte sich möglicherweise die mit der Lagerhaltung einhergehende Kapitalbindung hemmend auf die Flexibilisierungser-schließung auswirken.

Bezüglich möglicher Flexibilisierungen der Schmelzanlage mit Blick auf ihre Einbettung in den gesamten Produktionsprozess ist festzuhalten, dass bestehende Anlagen optimiert sind auf eine vordefinierte Tonnage sowie Tap-to-Tap Zeit, welche sich in die Werksstruktur einfügt. Der Produktionsprozess zeichnet sich insgesamt durch optimal aufeinander abgestimmte Prozessschritte aus, die entsprechend der kontinuierlichen und hohen Auslastung dimensioniert sind. Eine Flexibilisierung des Prozesses ist nur unter Einhaltung der definierten Randbedingungen zulässig, sofern Laständerungen durch entsprechende Ausgleichsmaßnahmen kompensiert werden und der Energieeintrag von 1,35 MWh/t Produkt gewährleistet ist.

Entlang der Prozesskette zählen neben dem Schmelzprozess auch das Zerkleinern des Schmelzkorunds und die Herstellung von Körnungen zu den stromintensiven Prozessen. Diese Prozessschritte würden grundsätzlich Flexibilisierungsmöglichkeiten bieten, da Teile der Brech- und Mahlwerke unterschiedlich lange pro Tag betrieben werden und nur die besonders fein mahlenden Aggregate rund um die Uhr zum Einsatz kommen. Entsprechend gäbe es für die gröberen Zerkleinerungsschritte aus technischer sowie aus Sicht des Produktionsablaufes ein vergleichsweise leicht zu erschließendes Potenzial, welches jedoch nur einen geringen Anteil am ansonsten besonders stromintensiven Rohstoffschmelzprozess hat.

## 6.6 ANFORDERUNGSPROFIL 1 - POTENZIALE UND HEMMNISSE

### 6.6.1 KURZFRISTIGE LASTVERSCHIEBUNG

Aus technischer und produktionsorganisatorischer Sicht sind kurzzeitige (ca. 15 Min.) negative wie positive Flexibilitätsmaßnahmen in der Rohstoffschmelzanlage im Leistungsbereich zwischen 3,2 bis 3,7 MW mit kurzfristiger Voranmeldung möglich, sofern die erforderliche Energiemenge von 1,35 MWh/t zum Schmelzen des Produktes eingebracht wird und die Länge des Zyklus von 4 Stunden weder verkürzt noch verlängert wird.

Eine Leistungserhöhung des Elektrolichtbogens über die 3,7 MW hinaus ist kurzzeitig, für 15 Minuten, auf 4 MW möglich mit einer Vorankündigungszeit von ca. 1 Stunde. Eine längerfristige Lasterhöhung führt zu Schäden am Schmelzgefäß der Rohstoffschmelzanlage und wird nicht vorgenommen.

Eine Lastreduktion ohne Vorzug bzw. Nachholung der Last während eines Zyklus von 4 Stunden ist nicht denkbar, ohne die innerbetriebliche Organisation und die Produktionsmenge des kontinuierlichen Prozesses zu gefährden. Bezüglich aller hier beschriebenen Formen der Laständerung muss zudem berücksichtigt werden, dass der Betriebsleiter (wie auch im Schmelzprozess im EAF im Stahlwerk) die Entscheidungshoheit über den Prozess und entsprechend auch den etwaigen Einsatz von Lastmanagement behalten muss. Eine automatische Ausübung einer Lasterhöhung oder -reduktion kommt deshalb nicht in Frage, da aufgrund der sich ändernden Prozessbedingungen nicht zu jedem Zeitpunkt des Schmelzzyklus eine Änderung der eingebrachten Wärmemenge realisiert werden kann, zum Beispiel während des Beginns eines Schmelzprozesses.

## 6.6.2 MITTELFRISTIGE LASTVERSCHIEBUNG

Mit entsprechender Vorankündigung von einem Tag kann eine positive wie negative Flexibilitätsmaßnahme für 30 bis 60 Minuten in den kontinuierlichen Chargenprozess eingeplant werden, sofern eine Leistungsveränderung nicht zu Beginn des Schmelzprozesses erfolgt. Die Leistungsänderung ist im Bereich zwischen 3,2 bis 3,7 MW zulässig, das Aggregat darf jedoch thermisch nicht überlastet und dadurch geschädigt werden. Die Produktionsleistung muss innerhalb der Dauer des Tap-to-Tap Zyklus von 4 Stunden ausgeglichen sein. Die somit erzielte kurzfristige Flexibilisierung von maximal 500 kW (250 bis 500 kWh) muss innerhalb eines Zyklus von 4 Stunden kompensiert werden.

## 6.6.3 VOLLSTÄNDIGER LASTABWURF

Sofern sich der Schmelzprozess im fortgeschrittenen Zustand befindet, ist theoretisch eine kurzzeitige Abschaltung der Rohstoffschmelzanlage für ca. 5 Minuten denkbar. Diese Flexibilitätsmaßnahme kann einmal pro Schmelzzyklus realisiert werden und führt auf Grund der zu gewährenden Nachholbarkeit innerhalb des gleichen Schmelzzyklus zu einer kurzfristigen Lastverschiebung von maximal 1,85 MWh pro Tag (5 min • 6 Zyklen • 3,5 MW).

Da es sich aus Sicht einer kontinuierlichen Betriebsführung beim Abschalten der Energiezufuhr um einen Störfall handelt, der Risiken beim Wiederauffahren birgt, ist aus betrieblich-organisatorischer Sicht diese Form der Lastflexibilisierung mit hohen Unsicherheiten behaftet und ihre Realisierung, zumindest zum gegenwärtigen Zeitpunkt, unwahrscheinlich. Der störanfällige Anfahrprozess erhöht das Ausfallrisiko der Anlage. Bei Ausfall des Ofens ist zur Reparatur eine Abkühlung von 2.000 °C

mit entsprechend langen Wartezeiten und hohen Produktionsausfällen nötig. Diese Form der Lastflexibilisierung ist zudem nicht nur mit Risiken, sondern auch mit einem erhöhten Arbeitsaufwand verbunden, da das Wiederanfahren nicht automatisch, sondern unter Aufsicht des Prozessverantwortlichen stattfinden muss. Auch die Gefahr einer Verunreinigung des Produktes beim Wiederanfahren wirkt sich hemmend auf die Realisierung des Potenzials aus. Durch häufigeres Zünden des Lichtbogens kann außerdem von einem erhöhten Verschleiß der Elektroden ausgegangen werden.

## 6.7 ANFORDERUNGSPROFILE 2 UND 3 – POTENZIALE UND HEMMNISSE

Wie Anforderungsprofil 2, die Anpassung der Last über mehrere Stunden, ist auch Anforderungsprofil 3, die Reduktion über mehrere Tage, in der bestehenden Produktionsstruktur nicht umsetzbar.

Im Betriebsablauf mit aktuell nahezu vollständiger Auslastung sind diese Lastreduktionen oder -erhöhungen aus technischer, organisatorischer und ökonomischer Sicht nicht denkbar. Wird die Schmelzzeit beispielsweise über die übliche Tap-to-Tap Zeit von vier Stunden verlängert, kann aufgrund der ansonsten hohen Auslastung der Rohstoffschmelzanlage die entgangene Produktion später nicht nachgeholt werden und die Ofenanlage wird aufgrund der hohen andauernden Betriebstemperaturen stärker in Mitleidenschaft gezogen/verschlissen. Blieben selbst die dadurch anfallenden hohen Opportunitätskosten zunächst unberücksichtigt, ist aufgrund des Marktumfeldes (langfristige, wertgeschätzte Kundenbeziehungen, Lieferverträge und fehlende Möglichkeit des Zukaufs eines identischen Produktes) eine Realisierung sehr unwahrscheinlich.

Auch die Möglichkeit der Synchronisation der Revisionszeiten von jährlich einer Woche und fünfjährlich drei Wochen mit Zeiten geringer erneuerbarer Stromeinspeisung (Dunkelflaute) ist nicht umsetzbar, da die Vorankündigungsdauer der Revisionen in der innerbetrieblichen Organisation mindestens zwei Monate beträgt.

Im Falle einer sich perspektivisch ändernden Auslastung wäre es auch denkbar, einen kontinuierlich betriebenen Ofen in einen Chargenofen zu wandeln, entsprechend der Anforderungsprofile 2 und 3 die Aufträge zu bündeln und die Öfen nach Bearbeitung der gebündelten Aufträge komplett auszuschalten. Dies scheint jedoch unter der prognostizierten Auslastung von ca. 100 % nicht von Bedeutung zu sein.

Über die betrachtete Rohstoffschmelzanlage hinaus sind in Bezug auf weitere Flexibilisierungspotenziale (entsprechend der Anforderungsprofile 2 und 3) auch unterschiedliche Einsatzfelder von Rohstoffschmelzanlagen berücksichtigt worden. In dem hier untersuchten Anwendungsbeispiel wird Schmelzkorund in einem kontinuierlichen Prozess geschmolzen. In Deutschland kommen für andere Spezialrohstoffe mit geringerer oder diskontinuierlicher Nachfrage auch Chargenproduktionen zum Einsatz. In solchen Öfen werden grundsätzlich Rohstoffe für

unterschiedliche Anwendungen und spezielle Einsatzfelder hergestellt und die Produktion für einen bestimmten Rohstoff jeweils gebündelt. Ein solcher Einsatz bietet ggf. die Möglichkeit, durch eine Verschiebung des gesamten Produktionsprozesses weitere Flexibilitätspotenziale zu heben.

## 6.8 MARKTUMFELD UND KUNDENBEZIEHUNGEN

### 6.8.1 KONJUNKTUR UND AUSLASTUNG DER BRANCHE

Die deutsche Feuerfestindustrie wird auch im internationalen Vergleich als „extrem wettbewerbsstark“ beschrieben [6]. Als Gründe dafür wird neben der technologischen Stärke auch die deutliche Steigerung der Arbeitsproduktivität nach der Jahrtausendwende benannt. Da ca. 60 % der feuerfesten Erzeugnisse in der Stahlindustrie verwendet werden, ist die konjunkturelle Entwicklung der Feuerfestindustrie stark von derjenigen der Stahlindustrie abhängig. Diese weist derzeit Überkapazitäten an Produktionseinheiten auf (vgl. Hemmnisse Stahlindustrie). Die daraus resultierende Nachfragereduktion hat sich teilweise auf die Feuerfestindustrie übertragen. Die zunehmende Erzeugung von Sonderstählen in der deutschen Stahlindustrie kann die Feuerfestindustrie aufgrund einer hohen Innovationsfähigkeit und damit verbundenen Anpassungsfähigkeit gut unterstützen.

Die Branche der Rohstoffveredler weist in Deutschland keine Überkapazitäten auf und der betrachtete Prozess „Rohstoffschmelzanlage“ ist derzeit als kontinuierlicher Chargenprozess in Deutschland zu beinahe 100 % ausgelastet. Auch kurzfristige Auslastungsschwankungen sind in diesem Produktionsprozess eher unüblich, da die Branche der Rohstoffveredler typischerweise über langfristige Lieferverträge und sehr stabile Kundenbeziehungen verfügt.

### 6.8.2 ZUKAUFMÖGLICHKEITEN UND LIEFERFRISTEN

Bezogen auf das Endprodukt Schmelzkorund gibt es grundsätzlich die Möglichkeit des Zukaufs. Aufgrund vorhandener Lagerkapazitäten und üblicher Lagerbestände können auch bei Produktionsausfall die Lieferverträge ohne Zukäufe eingehalten werden und kurzzeitige Flexibilisierungen, zur Erfüllung des Anforderungsprofil 1, könnten grundsätzlich mit den vorhandenen Lagerkapazitäten des Endproduktes sowie der Zwischenprodukte erfüllt werden. Im Falle eines Zukaufs wäre mit hoher Wahrscheinlichkeit kein exakt identisches Produkt erwerbbar, da sich je nach Produktionsstandort (und den unterschiedlichen Mahlwerken) die Körnung des Korunds unterscheidet. Feuerfeste Produkte reagieren extrem sensibel auf Unterschiede in der Produktqualität der Rohstoffe. Entsprechend können Unterschiede in der Körnung später zu Mängeln in der Anwendung der feuerfesten Produkte führen. Aus diesem Grund sind langjährige Kundenbeziehungen (auch für die Feuerfestproduzenten, also die Abnehmer der in der Rohstoffschmelzanlage hergestellten

Rohstoffe) sehr wertvoll und es ist unwahrscheinlich, dass diesem Umstand zum Trotz die Risiken eines Zukaufs zur Flexibilisierungserschließung in Kauf genommen würden.

## 6.9 INNERBETRIEBLICHE ORGANISATION

### 6.9.1 AUFTRAGS- UND SCHICHTPLANUNG

Aufgrund der langfristigen, engen Kundenbeziehungen sind die Auftragsplanung und damit auch die Auslastung der Rohstoffschmelzanlagen gut vorhersehbar. Die Produktionsplanung findet in den repräsentativen Unternehmen monatlich statt. Die Auslastung im Schmelzprozess ist aktuell annähernd 100 %; es gibt keine Stillstandzeiten außer den Revisionszeiten. Die Produktion erfolgt kontinuierlich 24 Stunden an sieben Tagen pro Woche in einem Dreischichtsystem. Auch die Schichtplanung erfolgt langfristig mit monatlicher Anpassung.

### 6.9.2 GEPLANTE REVISIONEN

Jährlich finden Revisionen mit Stillstandzeiten von 1–2 Wochen statt, in denen der Zustand der Rohstoffschmelzanlagen kontrolliert wird. Darüber hinaus finden umfangreiche Revisionen alle fünf Jahre mit einer Dauer von 3 Wochen statt. Hierbei werden die Schmelzanlagen komplett überprüft. Die Terminierung dieser Revisionszeiten bedarf einer langfristigen Planung; die Vorlaufzeit beträgt mindestens 2 Monate.

### 6.9.3 REGULATORISCHE HEMMNISSE

Die Stromkosten machen für die Hersteller von Schmelzkorund einen hohen Anteil an den laufenden Kosten aus<sup>3</sup> [13]. Entsprechend relevant ist deshalb auch die Netzentgeltreduktion nach § 19 StromNEV [14] Für diese wird eine gewisse Anzahl an Vollbenutzungsstunden vorausgesetzt. Im Falle einer Lastflexibilisierung kann es sehr wahrscheinlich dazu kommen, dass die erforderlichen Vollbenutzungsstunden nicht erreicht werden und die Netzentgeltreduktion nicht mehr gewährt wird. Dies stellt für die betrachteten Unternehmen ein entscheidendes Hemmnis zur Erschließung von Flexibilität dar und wird in der Literatur bereits vielfach beschrieben, z.B. in [15].

<sup>3</sup> Hersteller von Schmelzkorund erhalten Steuerentlastungen nach §9a und 9b StromStG

## 6.10 WECHSELWIRKUNGEN ZWISCHEN EFFIZIENZ UND FLEXIBILITÄT

In den Rohstoffschmelzanlagen laufen energetisch anspruchsvolle Hochtemperaturprozesse ab. Da elektrische Energie dabei einen deutlichen Kostenfaktor darstellt, sind die Anlagen energieoptimiert und werden nach dem aktuellen Stand der Technik so betrieben, dass in ihnen mit der größten Effizienz Schmelzprodukte erzeugt werden können.

Dabei müssen die technischen Anforderungen der Anlagen berücksichtigt werden, um sie nicht zu schädigen.

Alle Schmelzprozesse, in deren Verlauf nach einer Lastreduktion eine Lasterhöhung erforderlich wird, um die versäumte Produktion nachzuholen, sind keine energieeffizienten Prozesse mehr.

Prozesse, in denen die Schmelzzeit verlängert oder verkürzt wird, in denen es Probleme beim Zünden des Lichtbogens gibt oder zusätzliches Personal zur Unterstützung bei Flexibilitätsmaßnahmen gebraucht wird, können möglicherweise flexibel betrieben werden, sind jedoch nicht mehr auf Effizienz optimiert.

Bei allen Maßnahmen, wie Lastreduktionen und Lasterhöhungen durch beispielsweise kurzfristige Lastverschiebungen, kann nur in bestimmten prozessbedingten Grenzen gearbeitet werden. Diese limitieren damit die erschließbare Flexibilität.

Aufgrund der hohen Auslastung der Schmelzanlagen und der guten Wirtschaftslage bestehen momentan seitens der Hersteller von Schmelzrohstoffen keine Erfordernisse, die Flexibilität der Anlagen zu steigern.

## 6.11 FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER ROHSTOFFSCHMELZANLAGE

Die betrachtete Rohstoffschmelzanlage zur Herstellung von Schmelzkorund bietet bereits in der aktuellen Konzeption einige Perspektiven, besonders in der Betriebsinfrastruktur.

Sowohl für die Bevorratung von Rohstoffen zur Herstellung des Schmelzkorunds als auch für die Zwischenlagerung der erstarrten Korundschmelze stehen ausreichend große Lagermöglichkeiten zur Verfügung, um selbst bei Beschaffungsengpässen der Rohstoffe weiter produzieren zu können. Inwieweit sich hierbei möglicherweise eine Kapitalbindung bemerkbar macht, muss vom Betrieb beurteilt werden.

Bei der Aufbereitungs- und Weiterverarbeitungskette des Schmelzkorunds durch Brecher und Mahlwerke kann aufgrund der Auftragslage, der laufenden Produktion sowie des Füllstands der Zwischenlager noch ein gewisser Flexibilitätsspielraum durch einen angepassten Prozessbetrieb erschlossen werden.

Dem gegenüber sind einer weiteren energetischen Flexibilisierung des Schmelzprozesses selbst, technologisch bedingt, enge Grenzen gesetzt. Die hohen Reaktionstemperaturen im Ofen und die Wechselwirkungen zwischen dem Ofenaggregat und dem Schmelzgut erfordern große Aufmerksamkeit, wie es in den Anforderungsprofilen anlässlich der Betrachtung des technischen Flexibilitätspotenzials erörtert wurde.

Aufgrund enger Verflechtungen sind einige der Rohstoffveredler im Sinne einer „Rückwärtsintegration“ der Feuerfestindustrie am Produktionsstandort der Feuerfestproduzenten ansässig. In diesem Fall könnten sich gute Kommunikations- und Kooperationsstrukturen, basierend auf starken Unternehmensverflechtungen, teilweise in Form von Unternehmenseinheiten, langfristig begünstigend auf die Erschließung von Flexibilitätsperspektiven auswirken.

## 6.12 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Mitteilungen des Verbandes der Deutschen Feuerfest-Industrie e. V. an seine Mitglieder (2015). Höhr-Grenzhausen.
- [2] Deutsche Gesellschaft Feuerfest- und Schornsteinbau e. V. (2015): Feuerfestbau. Stoffe-Konstruktion-Ausführung. Vulkan-Verlag, Essen.
- [3] Routschka, G.; Wuthnow, H. (Hrsg.) (2011): Praxishandbuch Feuerfeste Werkstoffe. Vulkan-Verlag, Essen.
- [4] Schnabel, M.; Buhr, A.; Schmidtmeier, D. et al. (2015): Perceptions and Characteristics of Fused and Sintered Refractory Aggregates. Refractories Worldforum, 7(4)75–81.
- [5] Gelbmann, G.; Muehlhaeusser, J.; Nilica, R. (2015): Fused refractory raw materials - challenging aspects for their production. UNITECR 2015 - 14th Biennial Worldwide Congress, 14(1)1–4.
- [6] Voß, W. (2012): Innovationsprozesse in der keramischen Industrie – Möglichkeiten und Grenzen der Mitarbeiterbeteiligung. Hans-Böckler-Stiftung/IG Bergbau, Chemie, Energie, Hauptvorstand (Hrsg.). Hannover.
- [7] Li, Y.; Li, N. (2000): Sintering and microstructure of bauxite-based electro-melted corundum. Interceram, 49(3)174–177.
- [8] Fruhstorfer, J.; Möhmel, S.; Thalheim, M. et al. (2015): Microstructure and strength of fused high alumina materials with 2.5 wt% zirconia and 2.5 wt% titania additions for refractory applications. Ceramics International, 41(9A)10644–10653.
- [9] Buber, T.; Gruber, A.; Klobasa, M.; von Roon, S. (2013): Lastmanagement für Systemdienstleistungen und zur Reduktion der Spitzenlast. Vierteljahreshefte zur Wirtschaftsforschung 82(3)89–106.
- [10] Klobasa et al. (2013): Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Auftragsstudie Endbericht. Berlin: Agora Energiewende.
- [11] Klobasa, M.; Erge, T.; Wille-Haussmann, B. (2009): Integration Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe.
- [12] von Roon, S.; Gobmaier, T. (2010): Demand Response in der Industrie – Status und Potenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE).  
[http://www.ffe.de/download/article/353/von\\_Roon\\_Gobmaier\\_FfE\\_Demand\\_Response.pdf](http://www.ffe.de/download/article/353/von_Roon_Gobmaier_FfE_Demand_Response.pdf). Abgerufen am 04.02.2015.
- [13] Stromsteuergesetz vom 24. März 1999 (BGBl. I S. 378; 2000 I S. 147), das zuletzt durch Artikel 3 u. 4 des Gesetzes vom 27. August 2017 (BGBl. I S. 3299) geändert worden ist.

- [14] Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), die zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2017 (BGBl. I S. 2503) geändert worden ist.
  
- [15] Langrock, T.; Achner, S.; Baumgart, B.; Jungbluth, C.; Marambio, C.; Michels, A.; Otto, A.; Weinhard, P. (2015): Regelleistungsbereitstellung mit regelbaren Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil Erneuerbarer Energien. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.



KAPITEL 7

## **VERGLEICH DER WIRTSCHAFTLICHEN POTENZIALE AUSGEWÄHLTER PROZESSE**

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin



In diesem Abschnitt werden zwei Referenzprozesse genauer betrachtet um wesentliche regulatorische und praktische Hemmnisse quantitativ zu analysieren, die sich in ähnlicher Form auf andere Referenzprozesse übertragen lassen. Zum einen analysieren wir einen Referenzprozess mit hohen Auslastungsgraden (die Chlor-Alkali-Elektrolyse), an dem die Bedeutung von Auslastungsgraden, sowie regulatorische Markt-designfragen kritisch analysiert werden, und zum anderen ein Prozess mit geringeren Auslastungsgraden, aber wesentlichen technischen und praktischen Hemmnissen, welcher einer Flexibilisierung entgegen stehen (die Zementmahlung).

## 7.1 WIRTSCHAFTLICHER REFERENZPROZESS FÜR HOHE AUSLASTUNGSGRAD MIT SPEICHERN (CHLOR-ALKALI)

Als Prototyp für einen Referenzprozess mit hohen Auslastungsgraden und der prinzipiellen Option der Flexibilisierung wird hier der Chlor-Alkali Prozess herangezogen, welcher in Kapitel 5.8.3 ausführlich besprochen wird. Es ist hierbei anzumerken, dass der vorliegende Prozess einen relativ großen Speicher von ca. 10 Produktionstagen vorweist.

### 7.1.1 MODELLBESCHREIBUNG

Das Model ist als Kostenminimierung (Lineares Programm, LP) bezüglich der Strombeschaffung am Day-Ahead-Markt und Maximierung der Erlöse an Flexibilitätsmärkten formuliert, und beschreibt die Chlor-Alkali-Elektrolyse als kontinuierlichen, steuerbaren Produktionsprozess mit nachgelagertem Speicher (um die kontinuierliche Nachfrage nach EDC zu erfüllen). Das Modell beschreibt ausschließlich den Zusammenhang zwischen flexibler Stromnachfrage und der EDC-Produktion und Speicherung. (Kosten-)Effekte durch Veränderung in der Menge und Qualität der Ko- und Zwischenprodukte werden vernachlässigt.

Das Modell ist in drei wesentliche Bestandteile gegliedert: Variable Strombeschaffungskosten, fixe Kosten und Erlöse aus weiteren Flexibilitäts-Märkten (hier AbLaV [1] und Primärregelleistung).

Variablen	Beschreibung	Einheit
$x_t$	Strombedarf der Elektrolyse (stundenscharf)	[MW]
$r_{ABLA\bar{V}}$	Jahresmindestproduktionsleistung und vermarktete AbLaV-Reserve	[MW]
$s$	Kapazitätserweiterung des Downstream-Speichers	[ton <sub>EDC</sub> ]
$l_t$	Speicherlevel in Stunde t	[ton <sub>EDC</sub> ]
$x_{max}$	Jahreshöchstleistung	[MW]
$r_{Primär}$	Vermarktete Primärregelleistung	[MW]
<b>Kalkulatorische Variablen</b>		
$C_{Total}$	Totale Kosten	[Euro/Jahr]
$C_{Var}$	Variable Kosten	[Euro/Jahr]
$C_{Fix}$	Fixe Kosten	[Euro/Jahr]

Tabelle 7.1: Beschreibung der Variablen

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert (Basisszenario)
$t$	Stunde [1-8760]	h	
$R_{FlexMarkets}$	Erlöse aus Flexibilitätsmärkten (nicht Day-Ahead-Märkte)	[Euro/Jahr]	Ergebnis
$P_{ElHourly,t}$	Stündlicher Elektrizitätspreis <sup>1</sup>	[Euro/MWh]	Jahr 2015
$N_{Var}$	Variable Netzentgelte	[Euro/MWh]	0,2
$\Phi_{El}$	Elektrizitätsintensivität des Prozesses	[MWh/ton <sub>EDC</sub> ]	2,1
$N_{Fix}$	Fixe Netzentgelte (für Maximalleistung)	[Euro/MW]	10000
$P_{ABLA\bar{V},Reserve}$	AbLaV Reserve Preis (SOL) <sup>2</sup>	[Euro/MW]	26000
$P_{Primär,Reserve}$	Primärregelleistung-Leistungspreis	[Euro/MW]	180000
$r_{Primär,max}$	Max. Anteil der Prim.-Reserve an Kapazität <sup>3</sup>	[%]	17,5 %
$K$	Installierte Prozesskapazität	[MW]	80
$D_t$	Nachfrage für Folgeprodukt	[ton <sub>EDC</sub> ]	37,62 (~79MW)
$x_{min}$	Minimale Produktionsstufe	[MW]	20 (25% von K+k)
$\bar{L}$	Oberes Speicherlimit	[ton <sub>EDC</sub> ]	10000
$\underline{L}$	Unteres Speicherlimit	[ton <sub>EDC</sub> ]	1000

Tabelle 7.2: Beschreibung der Parameter

<sup>1</sup> Von <https://open-power-system-data.org>

<sup>2</sup> Basierend auf Ausschreibungswerten von [regelleistung.net](http://regelleistung.net), Wochenleistungspreise von 500 Euro/MW.

<sup>3</sup> Annahme, dass technisch 3,5 MW präqualifiziert pro 2 Elektrolyseure a 10 MW präqualifiziert werden. Dies ist allerdings nur möglich solange auch alle weiteren Bedingungen erfüllt sind.

Tabelle 7.3: Beschreibung der Zielfunktion und Nebenbedingungen

Gleichung	Beschreibung
(1)	Zielfunktion (Erlöse werden abgezogen, da eine Minimierung)
(2)	Variable Kosten
(3)	Fixe Kosten
(4)	Erlöse aus anderen Märkten (AbLaV und Primärregelleistungsmarkt)
(5)	Beschreibung des Speicherzustands (Folgeperiode bestimmt sich aus bisherigem Speicherzustand sowie Exzess-/Unterproduktion)
(6)	Minimale und maximale Speichermenge
(7)	Speicherzustand am Jahresanfang und -Ende identisch (anderes ausgedrückt die Jahresproduktion muss der Jahresnachfrage entsprechen, der Speicher darf nicht „aufgezehrt“ werden).
(8)	Produktionsmenge muss größer als vermarktete AbLaV-Kapazität (oder mögliche Minimalproduktion $x_{min}$ ), aber kleiner als Elektrolysekapazität sein. Um Down-Regulation im Primärregelleistungsmarkt garantieren zu können, muss zwischen dem geplanten maximalen Day-Ahead Plan und der Elektrolysekapazität der Reserveabstand eingehalten werden.
(9)	Die vermarktete AbLaV-Menge muss größer als die Summe der gewählten Jahresmindestproduktion sein und der Menge der vermarkteten Primärregelleistung sein (sodass jederzeit nach unten reguliert werden kann).
(10)	Die Produktion muss geringer als die gewählte Jahreshöchstleistung sein. (Primärregelleistungsreserve wird ignoriert, da von Jahreshöchstlastberechnung ausgenommen).
(11)	Um Up-Regulation garantieren zu können, muss zwischen dem geplanten maximalen Day-Ahead Plan und der Elektrolysekapazität der Reserveabstand eingehalten werden.
(12)	Die Primärregelleistung kann nur einen maximalen Anteil der Gesamtleistung betragen (unter der Annahme, dass sonst die geforderten Rampen nicht erfüllt werden können).

**Mathematische Ausformulierung der Zielfunktion und Nebenbedingungen** (Entscheidungsvariablen sind fett markiert)

$$\min_{\{x_t | \forall t\}, l_t, k, s, r_{ABLAV}} C_{Total} = C_{Var} + C_{Fix} - R_{FlexMarkets} \tag{1}$$

u.d.N.

$$C_{Var} = \sum_t (P_{ElHourly,t} + N_{Var}) x_t \tag{2}$$

$$C_{Fix} = N_{Fix} x_{max} \tag{3}$$

$$R_{FlexMarkets} = P_{ABLAV,Reserve} r_{ABLAV} + P_{Primär,Reserve} r_{Primär} \tag{4}$$

$$l_t = l_{t-1} + \frac{x_t}{\Phi_{El}} - D_t, \forall t > 1 \tag{5}$$

$$\underline{l} \leq l_t \leq \bar{l}, \forall t \tag{6}$$

$$l_1 = l_{8760} \tag{7}$$

(8)

$$x_{Min} + r_{Primär} \leq r_{ABLAV} \tag{8}$$

$$x_t \leq x_{max} \tag{9}$$

$$x_{max} + r_{Primär} \leq K + k \tag{10}$$

$$r_{Primär} \leq K * r_{Primär,max} \tag{11}$$

$$\tag{12}$$

### 7.1.2 ANALYSEN

In diesem Teil werden zwei Fragestellungen analysiert. Zum einen die Frage, welche Auswirkungen der Auslastungsgrad auf die Flexibilitätsbereitstellung hat, und zum anderen, wie sich die Abwägung zwischen der Teilnahme an verschiedenen Flexibilitätsmärkten auf die Unternehmensentscheidungen auswirkt. Es wird bemerkt, dass in diesem Abschnitt ausschließlich Lastverschiebungen betrachtet werden, das heißt negative Produktionsanpassungen werden in jedem Fall nachgeholt. Des Weiteren wird die Kapazität des Prozesses, sowie des Speichers als exogen festgelegt betrachtet.

### 7.1.3 EINFLUSS VON AUSLASTUNGSGRAD AUF FLEXIBILITÄTSBEREITSTELLUNG

In diesem Abschnitt wird zur Illustration von Flexibilitätsbereitstellung vereinfachend ausschließlich die Flexibilitätsbereitstellung am Day-Ahead-Markt (für das Basisjahr 2015) in Abhängigkeit vom Auslastungsgrad betrachtet, d.h. eine Bereitstellung an Regelenenergiemärkten oder dem Markt für abschaltbare Lasten findet hier nicht statt, sondern wird separat im folgenden Abschnitt betrachtet.

Der Auslastungsgrad ist hier definiert als Anteil der Stunden eines Jahres, in der ein Prozess an seiner Prozessgrenze produzieren muss, um die (exogen) vorgegebene Jahresproduktion zu erfüllen. Ein Auslastungsgrad von geringer als 100 % kann z.B. durch eine temporäre ökonomisch bedingte geringere Auslastung vorliegen<sup>3</sup>, oder auch durch geplante Überkapazitäten entstehen (z.B. um Produktionsausfälle auffangen zu können, oder saisonale Unterschiede in der Nachfrage auszugleichen).

<sup>3</sup> Hier wird als Referenz zur Vereinfachung eine Auslastung von 100 % bei 8.760 Stunden im Jahr angenommen – häufig ist diese jedoch auch bei Prozessen der Grundstoffindustrie niedriger, z.B. aufgrund von mehrwöchigen Revisionszeiten, welche hier nicht berücksichtigt wurden.

Abbildung 7.2 stellt die variablen Strombeschaffungskosten (d.h. die Kosten pro verbrauchter Megawattstunde) in Abhängigkeit vom Aus-

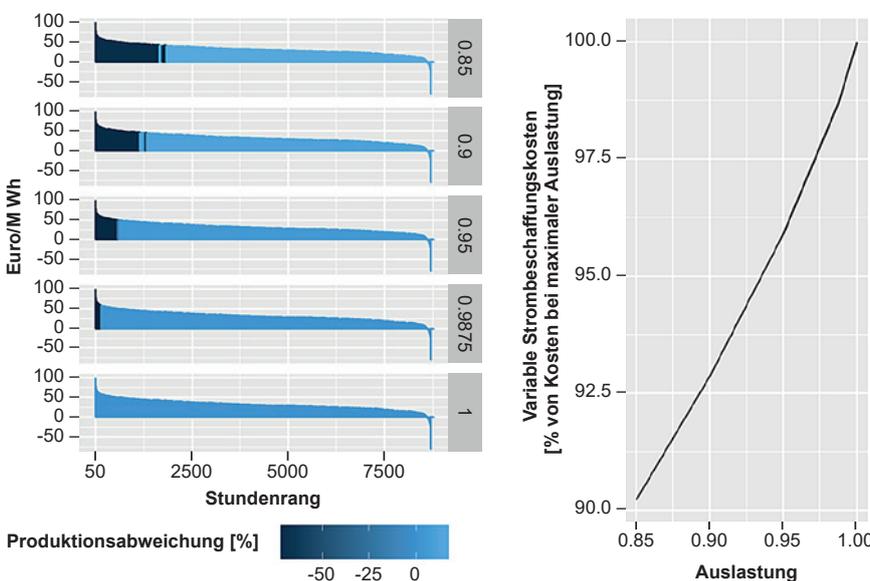
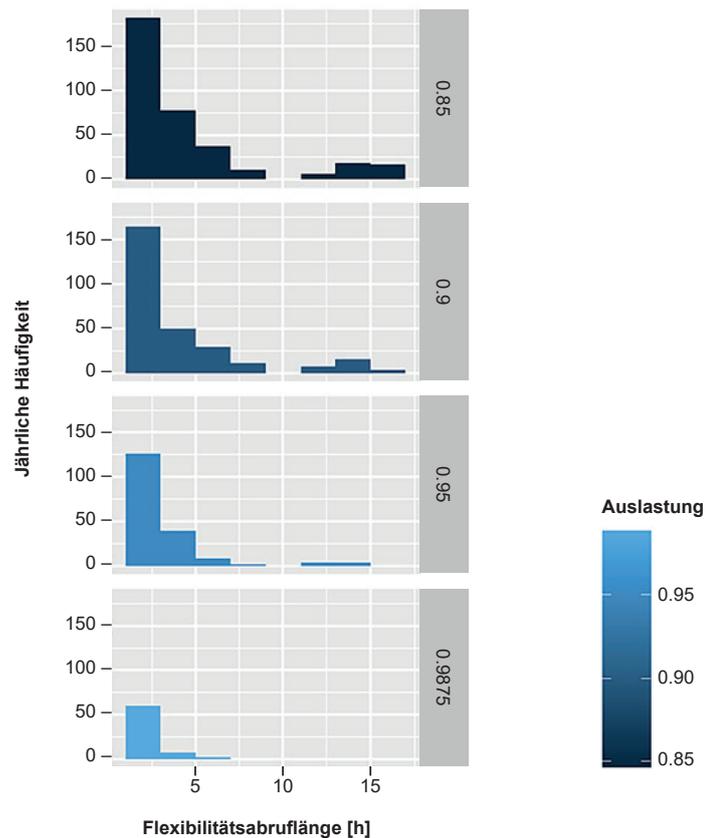


Abbildung 7.1 (links): Preisdauerlinie mit Produktionsanpassung in Abhängigkeit des Auslastungsgrades

Abbildung 7.2 (rechts): Variable Strombeschaffungskosten in Abhängigkeit des Auslastungsgrads. Diese machen nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten aus.

Abbildung 7.3: Flexibilitätsabruflänge in Abhängigkeit des Auslastungsgrades



lastungsgrad des Produktionsprozesses dar. Wie deutlich wird, sinken mit absinkender Auslastung die variablen Strombeschaffungskosten, allerdings in geringerem Maße mit abnehmender Auslastung, sodass bei einer Auslastung von 85 % ca. 92 % der üblichen variablen Strombeschaffungskosten anfallen (hier werden nur Großhandelskosten und variable Netzkosten betrachtet). Abbildung 7.1 erklärt das Sinken der Grenzerträge für geringere Auslastungen: Es sind für die Preisdauerlinie des Jahres 2015 die Produktionsabweichungen je nach Auslastungsgrad (in den Reihen der Abbildung) dargestellt (eine kontinuierliche Produktion zum selben Niveau hat einen Wert von 0 und dient als Benchmark für Anpassungen). Negative Produktionsabweichung sind als dunkler dargestellt, positive Abweichungen heller. Wie deutlich wird vermeidet die Produktion die teuersten Stunden des Jahres. Da relativ wenige Stunden überproportional teuer sind, bringen auch vergleichsweise kleine Abweichungen vom Auslastungsgrad 100 % relativ große Einsparungen.

Eine weitere Charakteristik von Nachfrageflexibilität wird ebenfalls in Abbildung 7.1, insbesondere bei einem Auslastungsgrad von 85 %, deutlich: Es können bei einem begrenzten Speicher nach Rang nicht alle teuersten Stunden des Jahres vermieden werden (die „helle Lücke“ deutet auf eine Produktion hin, obwohl günstigere Stunden über das Jahr verfügbar wären), da teilweise relativ lange Hochpreisperioden auftreten, welche die Kapazität des Speichers erschöpfen (der in dem hier betrachteten Prozess mit 10 Tagesproduktionen relativ hoch angesetzt ist). In zukünftigen Jahren könnte sich dieser Effekt durch das Auftreten längerer Hochpreisperioden („Dunkelflauten“) verstärken, welches das Sinken der Grenzerträge bei geringeren Auslastungsgraden verringern würde.

Abbildung 7.3 stellt die jährlichen (ununterbrochenen) negativen Flexibilitätsabrufmengen dar. Es wird deutlich, dass kurze Flexibilitätsabrufe deutlich häufiger auftreten als längere Perioden. Im Falle von einer 90 % Auslastung treten Abrufe von kürzer als 2 Stunden fast jeden zweiten Tag auf, während Abrufe von länger als 15 Stunden nur wenige Male im Jahr auftreten. Längere Abrufdauern nehmen mit geringeren Auslastungsgraden relativ gesehen stärker zu, da nur über hinreichend positive Flexibilität der Speicher nach einer längeren Abrufdauer hinreichend schnell gefüllt werden kann, um hohe Preisperioden auszugleichen.

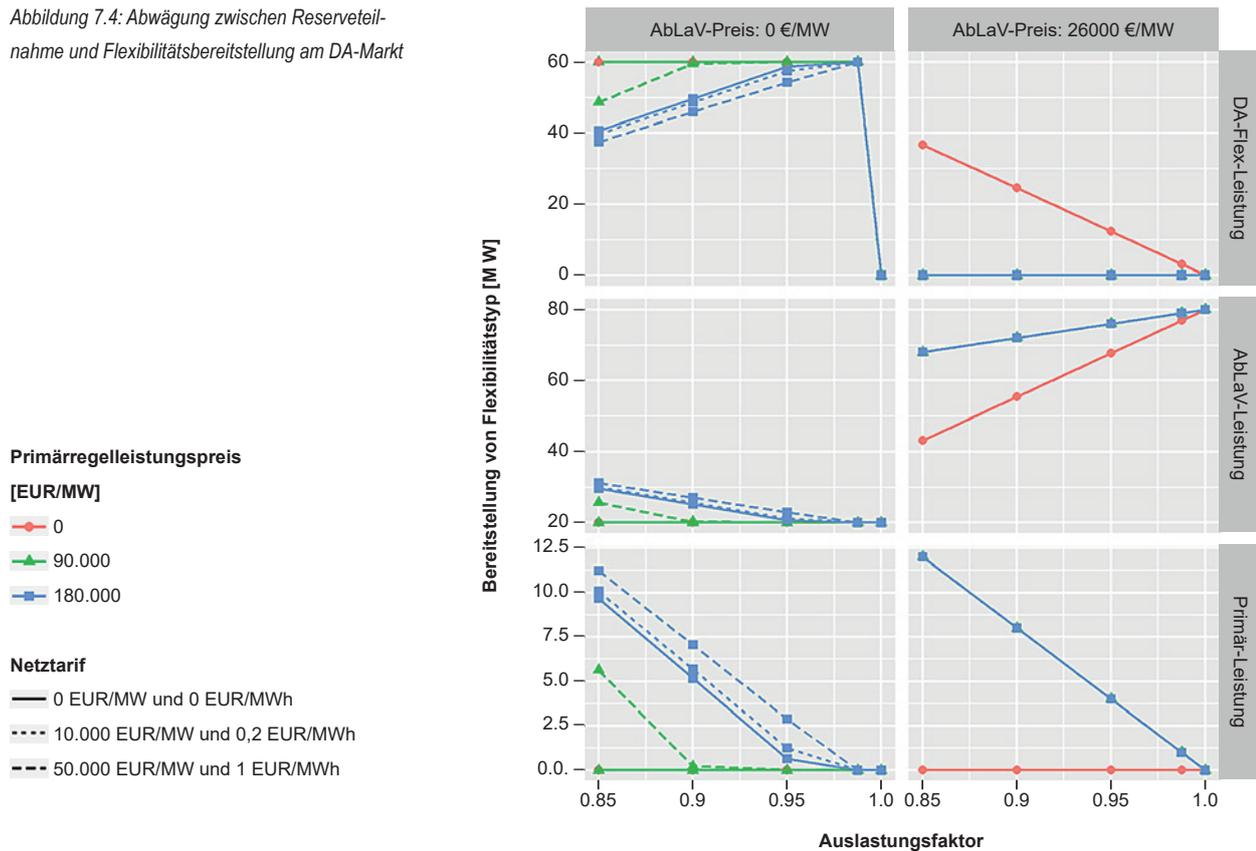
#### 7.1.4 DIE ABWÄGUNG ZWISCHEN RESERVETEILNAHME UND FLEXIBLER BESCHAFFUNG AM MARKT

In einem zweiten Schritt soll die Abwägung zwischen der Bereitstellung von Flexibilität in verschiedenen Märkten stattfinden (Preise am Day-Ahead Markt, im Primärregelleistungsmarkt und AbLaV-Markt werden als exogene Parameter angenommen). Zu diesem Zweck wird ein einfacher Indikator für die Flexibilitätsbereitstellung am Day-Ahead-Markt definiert, welcher vergleichbar in Einheit und Bedeutung zu der bereitgestellten Leistung im Regenergiemarkt und in der Abschaltbare Lastung Verordnung (AbLaV) ist.

Zu diesem Zweck ist die DA-Flex-Leistung als die Differenz zwischen der jährlichen maximalen und minimalen Leistungsabfrage (in MW) am Day-Ahead-Markt definiert. Diese wird verglichen mit der vermarkteten AbLaV-Leistung (welche der Minimallast entspricht, da diese die vermarktete AbLaV-Leistung darstellt), sowie mit der vermarkteten Primärregelleistung. Abbildung 7.4 stellt die vermarkteten Leistungen an den verschiedenen Märkten unter zwei AbLaV-Preisszenarien und 3 Primärregelleistungspreisszenarien dar. Die aktuelle Marktsituation ist für eine realistische Auslastung von 98,75 % hervorgehoben. Unter aktuellen Bedingungen ist die profitabelste Variante die (geringe) verfügbare Flexibilität als Primärregelleistung und in der AbLaV-Reserve zu vermarkten und nicht in den Day-Ahead Markt einzubringen. Das bedeutet konkret die Anlage (bis auf Abweichungen durch Bereitstellung der Primärregelleistung) 1 MW unter der Maximalleistung laufen zu lassen, und diese 1 MW dann als Primärregelleistung zu vermarkten (da die Produktdefinition eine symmetrische Regelung nach oben und unten verlangt). Da die Verordnung zu abschaltbaren Lasten [2] explizit keine Abschaltleistung bei gleichzeitiger Erbringung von Primärregelleistung erfordert, kann die verbliebene Kapazität über den AbLaV-Markt angeboten werden. Bei dem aktuellen AbLaV-Preislevel von 26.000 EUR/MW setzt sich diese Symbiose zwischen Primärregelleistungsvermarktung und Erbringung von abschaltbarer Leistung über alle (untersuchten) Auslastungsgrade und positiven Primärregelleistungspreise hinweg durch. Nur bei einem Primärregelleistungspreis von null verringert sich die vermarktete Leistung von abschaltbaren Lasten und etwas Flexibilität wird im Day-Ahead-Markt verkauft.

Im Falle, dass kein AbLaV-Leistungspreis existiert (die Minimalleistung könnte theoretisch weiterhin aufgrund des Arbeitspreises vermarktet wer-

Abbildung 7.4: Abwägung zwischen Reserveteilnahme und Flexibilitätsbereitstellung am DA-Markt



den), zeigt das Modell, dass ein Gleichgewicht zwischen der Teilnahme an der Primärregelleistungsreserve und der flexiblen Beschaffung am Day-Ahead-Markt existiert. Es wird nicht sämtlich mögliche Flexibilität am Primärregelleistungsmarkt vermarktet, sondern auch in den Day-Ahead-Markt eingebracht. Da dort fallende Grenzerträge vorliegen (nach der Vermeidung der teuersten Stunden ist der Ertrag zusätzlicher Flexibilität geringer), stellt sich ein Entscheidungsgleichgewicht ein. Dieses wird durch die Leistungskomponente der Netzentgelte beeinflusst, da Lastspitzen durch Erbringung von Primärregelleistung nicht zur Ermittlung der Jahreshöchstlast verwendet werden [3], und da eine ähnliche Ausnahmeregelung für eine kurze Lasterhöhung im Day-Ahead-Markt nicht vorliegt, welche den effektiven Primärregelleistungspreis positiv beeinflusst.

## 7.2 WIRTSCHAFTLICHER REFERENZPROZESS FÜR SAISONALE AUSLASTUNGSGRAD MIT SPEICHERN (ZEMENT)

Als zweiter Referenzprozess zur wirtschaftlichen Betrachtung wird die Zementmahlung betrachtet, welche detailliert im Kapitel 4.2.2 beschrieben ist (der Prozess der vorgelagerten Rohmahlung wird in diesem Abschnitt nicht betrachtet). Im Gegensatz zu der Chlor-Alkali-Elektrolyse, zeichnet sich die Zementmahlung durch geringere Auslastungsgrade und damit diskontinuierlicher Fahrweise aus, welche jedoch starken saisonalen Schwankungen unterliegt (s. h. Kapitel 4.4.2). Auch unterliegt der Prozess durch seine technischen Parameter gewissen Einschränkungen, welche ebenfalls die Flexibilitätsbereitstellung einschränken könnten.

Des Weiteren werden Zementmühlen häufig im Nachtschichtbetrieb eingesetzt, und eine Erweiterung auf den ganztägigen Schichtbetrieb würde zusätzliche Fachkräfte benötigen (s. h. Kapitel 4.6.5).

In diesem Abschnitt wird das wirtschaftliche Potential zur Kostenreduktion der Strombeschaffung durch eine Flexibilisierung der Zementmahlung vor dem Hintergrund der saisonalen Schwankungen, der technischen sowie Nachtschichtbeschränkung, mithilfe eines numerischen Modelles analysiert. Darüber hinaus wird ebenfalls der Einfluss einer beschränkten Voraussicht, d.h. eines eingeschränkten Planungshorizontes von wenigen Tagen statt eines Jahres analysiert.

### 7.2.1 MODELLBESCHREIBUNG

Das Modell ist als Kostenminimierung<sup>4</sup> der Strombeschaffungskosten der Zementmahlung (technisch angelehnt an das Modell 1 des VDZ, beschrieben im Kapitel 4.4) am Day-Ahead-Markt formuliert. Das heißt, dass nur der variable Teil des Strompreises, welcher durch den Strommarkt bestimmt ist, im Modell und in den dargestellten Kosten abgebildet ist. Der von den Unternehmen zu zahlende Strompreis beinhaltet jedoch weitere Komponenten, wie Netzentgelte, Umlagen und Steuern, welche je nach Unternehmen, Anschlussort und Ausnahmeregelungen<sup>5</sup> abweichen können und typischerweise zeitlich nicht variabel sind. Obwohl diese Kostenbestandteile für die Unternehmen damit von großer Bedeutung sind, können sie für das Problem der Produktionsplanung ignoriert werden, da hier nur zeitlich variable Bestandteile des Strompreises betroffen sind, und die restlichen Strompreiskomponenten von der Produktion meist nicht betroffen sind<sup>6</sup>. Des Weiteren können durch Wechsel von Schichtplanungen, sowie durch Abnutzungserscheinungen durch die geänderte Fahrweise Kosten auftreten, die in diesem Modell nicht erfasst werden. Es zeigt primär die möglichen Einsparungen am vortägigen Großhandelsmarkt für Strom unter Berücksichtigung von technischen und praktischen Einschränkungen auf.

Das Modell beschreibt die Zementmahlung als diskreten, steuerbaren Produktionsprozess von 4 Mühlen mit nachgelagertem Speicher. Jede Mühle ist entweder komplett an, oder aus. Das Modell berücksichtigt dabei zusätzlich zwei weitere wesentliche technische Einschränkungen: Zum einen Minimumanzeiten von 4 Stunden kontinuierlichen Betriebes, welcher nicht unterbrochen werden darf (da ansonsten Auswirkungen auf die Produktqualität auftreten, s. h. Kapitel 4.6.2) und zum anderen Speicherbegrenzungen durch die Silos, in welchen der Zement zwischen Produktion und Lieferung gelagert wird. Der Einfluss der vorausgegangenen Rohmahlung, sowie möglicher Lagerbeschränkungen des Rohzementes werden hier aus Vereinfachungsgründen nicht berücksichtigt.

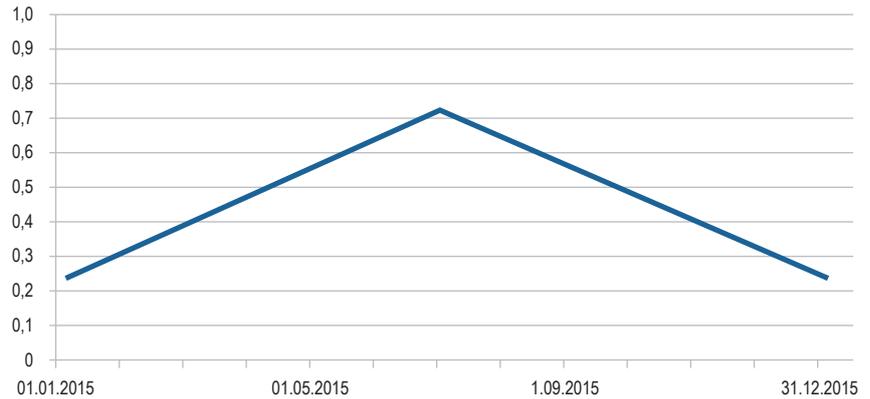
Das Modell minimiert die Strombeschaffungskosten über ein gesamtes Jahr, und kann ebenfalls als rollierendes Problem mit eingeschränktem Planungshorizont gelöst werden. Dies bedeutet, dass das Modell zur Lösung des Problems nur einen eingeschränkten Planungshorizont als Entscheidungsgrundlage hat, und so keine perfekte Voraussicht auf das gesamte Jahr vorliegt. Rollierend bedeutet, dass sich überschneidende

<sup>4</sup> Als gemischt-ganzzahliges Minimierungsproblem, d.h. manche Variablen können kontinuierliche Lösungen annehmen, während für andere nur eine eingeschränkte Anzahl von diskreten Lösungen möglich ist, was nützlich ist um z.B. An- oder Auszustände eines Prozesses zu modellieren.

<sup>5</sup> Z.B. durch die Befreiung von der EEG-Umlage für stromkostenintensive Unternehmen.

<sup>6</sup> Mit Einschränkungen: Netzentgeltregelungen, sowie Ausnahmeregelungen können von Lastspitzen und Volllaststunden abhängigen. Wir nehmen an, dass diese Beschränkungen hier eingehalten werden, sodass sich diese Strompreisbestandteile in der Analyse nicht ändern.

Abbildung 7.5: Stilisierte saisonale Zementnachfrage



Optimierungshorizonte verwendet werden. So werden mit 3 Tagen Voraussicht Entscheidungen getroffen, wobei nur die ersten 2 Tage fix geplant werden, und der letzte Tag Teil einer neuen 3 Tages-Optimierung ist.

Es ist ebenfalls eine vereinfachte Nachtschicht-Beschränkung implementiert um einen stellvertretenden Referenzfall für die Flexibilisierung der Zementmahlung zu etablieren: Hier wird die tägliche Produktionsmenge soweit wie möglich auf Nachtstunden eingeschränkt. Präziser werden für jeden Tag die nötigen Volllaststunden ermittelt, um die Tagesnachfrage zu erfüllen (d.h. im Sommer sind es ca. 22 Volllaststunden und im Winter nur ca. 7). Die Nachtschichteinschränkung erlaubt dem Modell dann nur in den Volllaststunden symmetrisch um 2:00 Uhr nachts zu produzieren (also im Winter von 22:00 bis 5:30 Uhr, und im Sommer von 15:00 bis 13:00 Uhr des nächsten Tages).

Vereinfachend wird zudem eine kontinuierliche Zementnachfrage angenommen, welche über das Jahr von ca. 30 % der Mühlenkapazität im Winter, auf 90 % im Sommer variiert wird (ca. 59 % Gesamtauslastung). Dies ist an die genaueren Daten des Kapitels 4.2.2 angelehnt.

Im Folgenden werden die wesentlichen Modellparameter aufgelistet und die Modellbeschreibung formal präzisiert:

Tabelle 7.4: Beschreibung der Modellvariablen

Variablen	Beschreibung	Einheit
$u_{t,m}$	An-/Auszustand von Mühle m in Periode t	{0,1}
$v_{t,m}$	Startentscheidung von Mühle m in Periode t	{0,1}
$w_{t,m}$	Abschaltentscheidung von Mühle m in Periode t	{0,1}
$l_t$	Speicherlevel in Stunde t	[ton <sub>Zem</sub> ]
$x_{max}$	Jahreshöchstleistung	[MW]
<b>Kalkulatorische Variablen</b>		
$C_{Total}$	Totale Kosten	[Euro/Jahr]
$C_{Var}$	Variable Kosten	[Euro/Jahr]
$C_{Fix}$	Fixe Kosten	[Euro/Jahr]

Parameter	Beschreibung	Einheit	Wert (Basisszenario)
$t$	Stunde [1-8760]	h	
$m$	Mühle		
$P_{ElHourly,t}$	Stündlicher Elektrizitätspreis <sup>1</sup>	[Euro/MWh]	Jahr 2015
$D_t$	Zementnachfrage	[ton <sub>Zem</sub> ]	Stilisiert
$\varphi_{El}$	Elektrizitätsintensivität des Prozesses	[MWh/ton <sub>Zem</sub> ]	0,05
$K_m$	Mühlenkapazität	MW	2
$\bar{l}$	Oberes Speicherlimit	[ton <sub>Zem</sub> ]	3000 – 10000 (wird als Sensitivität variiert)
$\underline{l}$	Unteres Speicherlimit	[ton <sub>Zem</sub> ]	1000
$\tau_{Up}$	Minimale Laufzeit	[h]	4
$N_{Var}$	Variable Netzentgelte	[Euro/MWh]	3,02
$N_{Fix}$	Fixe Netzentgelte (für Maximalleistung)	[Euro/MW]	50000

Tabelle 7.5: Beschreibung der Modellparameter

<sup>1</sup> Von <https://open-power-system-data.org/>

Gleichung	Beschreibung
(1)	Zielfunktion, welche sich aus variablen und fixen Kostenbestandteilen zusammensetzt. $\min C_{Total} = C_{Var} + C_{Fix}$
(2)	Variable Kosten, welche sich stündlich aus den variablen Preisen des Day-Ahead-Marktes, sowie den variablen Netzentgelten multipliziert mit dem Stromverbrauch der angeschalteten Mühlen zusammensetzt und über das Jahr (oder die rollierende Optimierungsperiode) summiert wird. $C_{Var} = \sum_t ((P_{ElHourly,t} + N_{Var}) \varphi_{El} \sum_m u_{t,m})$
(3)	Fixe Stromkosten (Leistungsbestandteil des Netzentgeltes). $C_{Fix} = N_{Fix} x_{max}$
(4)	Beschreibung des Speicherzustands (der Speicherzustand der Folgeperiode bestimmt sich aus dem bisherigem Speicherzustand, sowie Exzess-/Unterproduktion durch die Mühlen). $l_t = l_{t-1} + \frac{\sum_m Ku_{t,m}}{\varphi_{El}} - D_t, \forall t > 1$
(5)	Minimale und maximale Speichermenge: der Speicherzustand muss jederzeit größer-gleich als der Minimalspeicherzustand und kleiner-gleich der Silospeichergröße sein. $\underline{l} \leq l_t \leq \bar{l}, \forall t$
(6)	Nebenbedingung um minimale kontinuierliche Anzeiten zu erfüllen. Adaptiert von [1] $\sum_{i=t-\tau_{Up}+1}^t v_{i,m} \leq u_{t,m}, t \in [\tau_{Up}, 8760], \forall m$
(7)	Nebenbedingung um An- und Auschaltvorgänge an den An-/Auszustand der Mühlen zu koppeln. Adaptiert von [1] $u_{t,m} - u_{t-1,m} = v_{t,m} - w_{t,m}, \forall t, \forall m$
(8)	Die Produktion muss in allen Stunden geringer als die gewählte Jahreshöchstleistung sein. $\sum_m Ku_{t,m} \leq x_{max}, \forall t$

Tabelle 7.6: Mathematische Ausformulierung der Zielfunktion und Nebenbedingungen und deren Beschreibung

Die Nachtschicht-Begrenzung ist durch eine Festlegung der Variablen  $u_{t,m} = 0$  für alle Stunden der Begrenzung implementiert (Beschreibung im Text oben).

## 7.2.2 ANALYSEN

### QUANTIFIZIERUNG VON HEMMNISSEN (NACHTSCHICHT BESCHRÄNKUNG) AUF FLEXIBILITÄTSBEREITSTELLUNG

In diesem Abschnitt wird diskutiert, welche Auswirkungen praktische Hemmnisse auf die Bereitstellung von Flexibilität haben können. Abbildung 7.6 stellt die optimalen Produktionsentscheidungen über die Preisdauerlinie über ein Jahr hinweg dar (hellblau: Einsatz der Mühlen, dunkelblau: Mühlen ruhen). Auf der x-Achse sind die Stunden des Jahres absteigend sortiert nach den variablen Strompreisen am Großhandelsmarkt. Es lässt sich somit sehen, ob die Produktion in den günstigsten Stunden des Jahres stattfindet, oder aufgrund von technischen und praktischen Einschränkungen auch in teureren Stunden des Jahres produziert wird. Die genannten technischen Beschränkungen sind in allen Modellfällen erfüllt. Die Nachtschichtbeschränkung ist in der rechten Spalte aktiviert und in der linken Spalte nicht als Beschränkung enthalten. Zusätzlich sind für jede Kombination die Reduktion der Beschaffungskosten am vortägigen Großhandelsmarkt (kurz DA für Day-Ahead-Markt) angegeben (ausgehend von einem Basiswert von ca. 29 Euro/MWh). Diese machen aktuell ca. 40–70 % der Strombeschaffungskosten von Zementherstellern aus. Hinzu kommen weitere Komponenten wie Netzentgelte, Umlagen und Steuern, welche je nach Unternehmen, Anschlussort und Ausnahmeregelungen abweichen können, und unter Umständen zusammen mit den Marktpreisen in einem Vertrag gebündelt sind. Je nach Vertrag müssten mögliche Kosteneinsparungen zwischen Zementherstellern, Flexibilitätsdienstleistern und Energielieferanten geteilt werden.

Wie deutlich wird, schränkt die Nachtschichtbegrenzung die Möglichkeiten der Flexibilisierung erheblich ein, sodass auch mit größeren Speichern nur geringe Einsparungen von unter 0,5 % erreicht werden könnten. Ohne Nachtschichtbegrenzung könnten die Beschaffungskosten am Stromgroßhandelsmarkt deutlich stärker reduziert werden, um ca. 11,85 % im Falle eines kleineren Speichers von ca. 3.000 Tonnen (wovon nur 2.000 Tonnen genutzt werden können), bis zu 15,3 % im Falle eines 20.000 Tonnen Silos.

Die Preisdauerlinie mit Produktionszeiten zeigt, auf welche Weise die Einsparungen erreicht werden: Im Fall der Nachtschichtbegrenzung sind unabhängig von der Speichergröße die Produktionszeitpunkte gleichmäßiger über das Jahr hinweg verteilt, wobei bereits jetzt, aufgrund der Nachtschichtproduktionen, die größten Spreisspitzen vermieden werden, da diese typischerweise tagsüber auftreten (in Zukunft gilt diese Regel bei höheren Anteilen erneuerbarer Energien nicht mehr zwangsläufig). Im Falle einer flexiblen Fahrweise werden Kosten einerseits durch Vermeidung teurer Stunden, aber ebenfalls durch eine konsequente Ausnutzung von Niedrig- und Negativpreisperioden erreicht (s. h. das im Falle der flexiblen Fahrweise negative Preise fast vollständig ausgenutzt werden, während dies im Falle einer Nachtschichtbegrenzung nicht geschieht).

Im Rahmen des Berichts, werden die Längen der Abrufdauer als Charakterisierung von verschiedenen Abruftypen verwendet. Durch die Fokussierung auf den vortägigen Großhandelsmarkt, kann das Anfor-

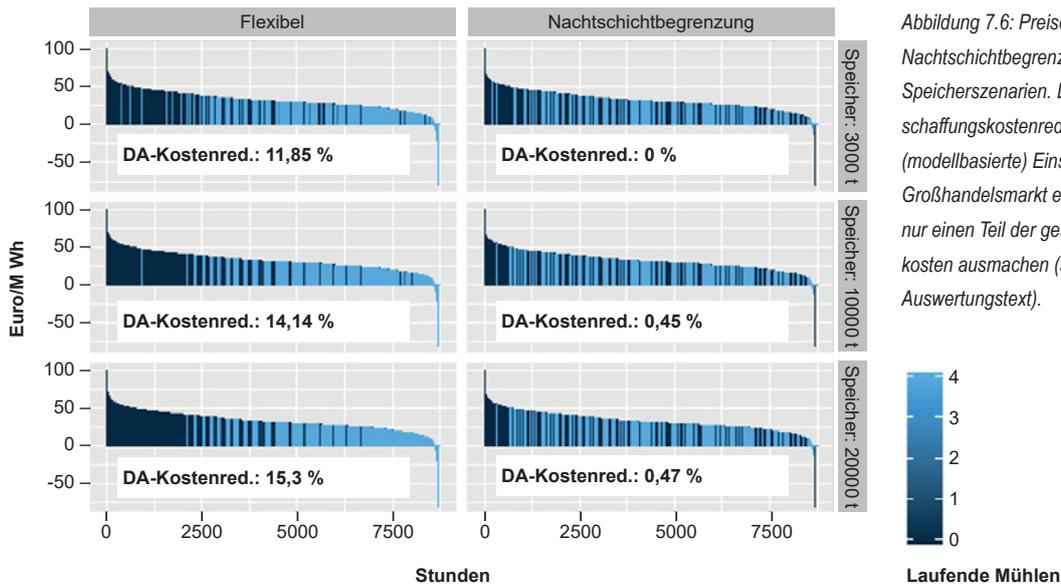


Abbildung 7.6: Preisdauerlinien mit und ohne Nachtschichtbegrenzung unter verschiedenen Speicherszenarien. Die angegebenen Strombeschaffungskostenreduktionen beziehen sich auf (modellbasierte) Einsparungen welche am vortägigen Großhandelsmarkt erreicht werden könnten, und nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten ausmachen (s.h. Modellbeschreibung und Auswertungstext).

derungsprofil 1 mit kurzen Abrufdauern von 15 Minuten im Rahmen dieses Abschnitts nicht untersucht werden. Dagegen können längere Abrufdauern von Anforderungsprofil 2 (mehrere Stunden) und Anforderungsprofil 3 (mehrere Tage) gut untersucht werden. Abbildung 7.7 stellt die Verteilung der kontinuierlichen Produktionsstillstände über das Jahr hinweg dar (Die Abbildung ist in dem Sinne zu interpretieren, dass ein ca. 62-stündiger Produktionsstillstand einmal im Jahr im flexiblen Szenario mit 10.000 t Speicher auftritt). Wie deutlich wird treten längere Stillstände nur im Rahmen einer komplett flexiblen Produktionsweise auf, während die Nachtschichtbegrenzung dazu führt, dass jeden Tag produziert werden muss. Bei aktuell üblichen Silogrößen von ca. 3.000 Tonnen werden hauptsächlich kürzere Flexibilitätsfenster von wenigen Stunden, die dem Anforderungsprofil 2 zuzuordnen sind, angeboten. Bei größeren Silokapazitäten und aktuellen Preisen steigen die Abruflängen vereinzelt auf mehrere Tage an, was die langfristige Perspektive der Zementmahlung verdeutlicht auch ohne Produktionsausfälle das Anforderungsprofil 3 bedienen zu können.

<sup>7</sup> Der Durchschnitt wird über ein Jahr gebildet.

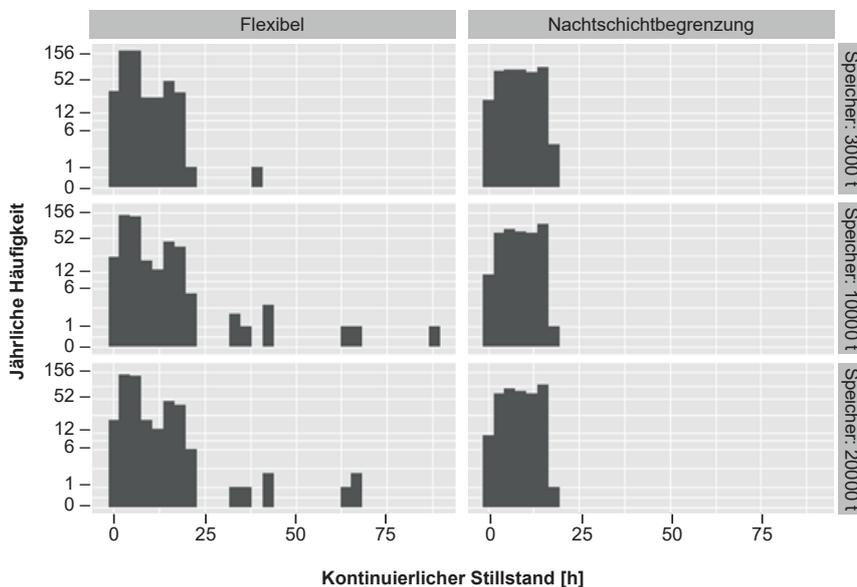


Abbildung 7.7: Kontinuierliche Stillstände in der Zementmahlung

Abbildung 7.8: Durchschnittliche tägliche Produktionszeitpunkte

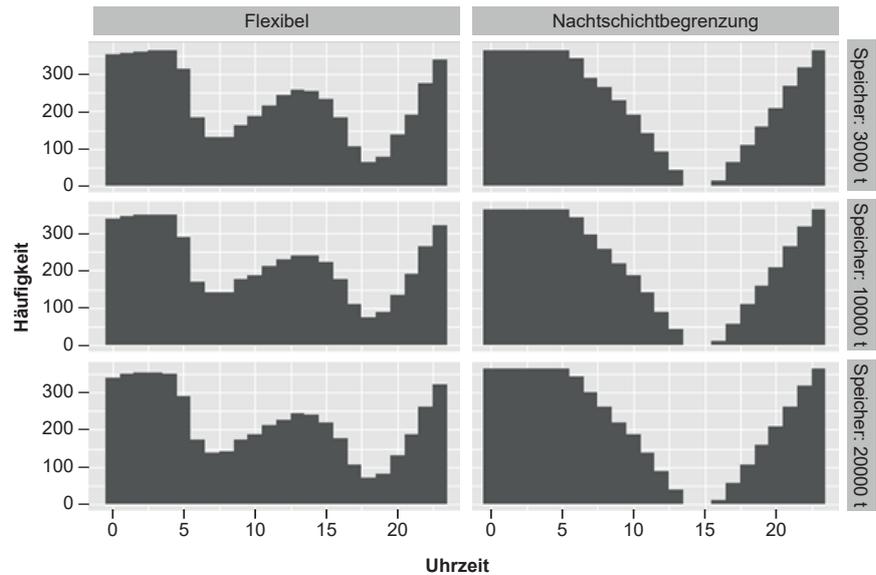


Abbildung 7.8 zeigt die durchschnittlichen<sup>7</sup> täglichen Produktionszeitpunkte in den verschiedenen Szenarien. Während in der Nachtschichtbegrenzung hauptsächlich nachts, und nur in den Sommermonaten tagsüber produziert wird, ist in dem Szenario ohne Nachtschichtbegrenzung eine Produktion in der Mittagszeit üblich, welche sich durch die niedrigen Mittagspreise in den Sommermonaten durch PV-Produktion erklären lässt.

### EINFLUSS DES PLANUNGSHORIZONTES

Da in der Realität im Gegensatz zu Modellen keine vollständige Information vorliegt, und mit Unsicherheit zu rechnen ist, stellen die oben ermittelten Werte eine obere Abschätzung der möglichen Kostenreduktionen am Stromgroßhandelsmarkt dar. Aus diesem Grund wurde ebenfalls eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Planungshorizontes, bzw. der Voraussicht durchgeführt. Hierbei wurde, wie in der Modellbeschreibung dargestellt, ein rollierendes Modell benutzt. Hierbei ist der Planungshorizont die Information, die dem Modell zur Verfügung steht. Hierbei wird nur für 75 % des Planungshorizont fixe Entscheidungen getroffen, während die restlichen Informationen zwar verwendet werden, jedoch erst in der folgenden Optimierungsperiode Fahrpläne erstellt werden.

Abbildung 7.9 stellt die Einsparmöglichkeiten am vortägigen Stromgroßhandelsmarkt (welcher nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten ausmacht, s.h. Modellbeschreibung) in Abhängigkeit der Speichergröße und des Planungshorizontes dar (die bisher dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf den jährlichen Planungshorizont). Wie deutlich wird, nimmt das Potential zur Kostenreduktion am Stromgroßhandelsmarkt mit kürzeren Planungshorizonten ab. Die Unterschiede sind jedoch bei einer kleineren Speichergröße von 3.000 Tonnen deutlich markanter, und zeichnen sich insbesondere zwischen einer Reduktion des Planungshorizontes von 7 auf 5 Tage ab, welches die möglichen Einsparungen am Stromgroßhandelsmarkt von ca. 9,4 % auf ca. 3,8 % reduziert. Diese starke Reduktion des Einsparpotentials tritt bei größeren Speichern in einem nur kleineren Umfang auf (bei einem Speicher von 20.000 Tonnen reduzieren sich die möglichen Kostenreduktionen am Stromgroßhandelsmarkt lediglich von ca. 15,3 % auf 11,6 %).

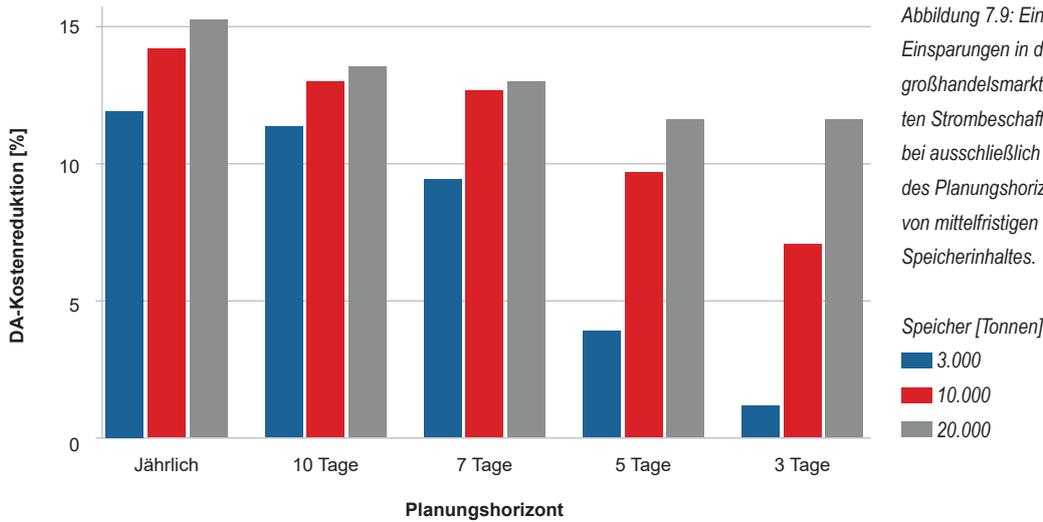


Abbildung 7.9: Einfluss des Planungshorizontes auf Einsparungen in der Strombeschaffung am Stromgroßhandelsmarkt (welche nur einen Teil der gesamten Strombeschaffungskosten betreffen, s.h. Text), bei ausschließlich kurzfristiger Optimierung innerhalb des Planungshorizontes und Nichtberücksichtigung von mittelfristigen Opportunitätskosten des Speicherinhaltes.

Es ist jedoch zu bemerken, dass die vorliegende Sensitivitätsanalyse die Realität unzureichend widerspiegelt, da innerhalb des Planungshorizontes perfekte Information, jedoch außerhalb des Planungshorizontes keinerlei Informationen, und auch keine Opportunitätskosten für zukünftige Planungsperioden angenommen werden. Damit reagiert das Modell selbst auf kleinste Preisunterschiede innerhalb von z.B. 3 Tagen und nutzt den Speicher soweit wie möglich aus, um Einsparungen zu realisieren. In der Realität liegen jedoch (ungewisse) Informationen außerhalb des Planungshorizontes vor. So können die Preisunterschiede innerhalb eines begrenzten Planungshorizontes mit typischen Preisunterschieden verglichen werden, und so ein größerer Anteil des Speichers vorgehalten werden, wenn die aktuellen Preisunterschiede relativ klein sind, oder aus wöchentlichen und saisonalen Mustern Erwartungen abgeleitet werden können.

Das Ergebnis zeigt die Wichtigkeit von hinreichend dimensionierten Speichern und mittelfristig guten Prognosen, welche die Flexibilitätsbereitstellung erleichtern.

### 7.3 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Morales-España, J. M. Latorre and A. Ramos, Tight and Compact MILP Formulation of Start-Up and Shut-Down Ramping in Unit Commitment, in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1288–1296, May 2013. doi: 10.1109/TPWRS.2012.2222938
- [2] Verordnung zu abschaltbaren Lasten vom 16. August 2016 (BGBl. I S. 1984), die zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 22. Dezember 2016 (BGBl. I S. 3106) geändert worden ist, § 7 (1)
- [3] Bericht der Bundesnetzagentur zur Netzentgeltsystematik Elektrizität, Stand Dezember 2015



## KAPITEL 8

# BRANCHENÜBERGREIFENDE AUSWERTUNG

Christa Dufter, Anna Gruber, Andrej Guminski, Serafin von Roon,  
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

Karin Arnold, Georg Holtz,  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH, Wuppertal

Jörn Richstein, Karsten Neuhoff,  
Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Berlin

Clara Orthofer,  
Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft  
und Anwendungstechnik, München

Dieses Kapitel fasst die zentralen Ergebnisse der branchenspezifischen Betrachtungen aus den branchenspezifischen Kapitel 2 bis Kapitel 6 zusammen und vergleicht diese branchenübergreifend.

Die Grundstoffindustrien produzieren innerhalb spezifischer Rahmenbedingungen, die Auswirkungen auf die Flexibilisierungsmöglichkeiten der ausgewählten Prozesse haben. Diese lassen sich branchenübergreifend wie folgt zusammenfassen:

- **Hohe Auslastung und bestehende Lieferverpflichtungen:** Die Prozesse der Grundstoffindustrien sind auf eine hohe Auslastung hin optimiert, und die Nachfrage nach ihren Produkten ist derzeit i. d. R. gegeben. Längere/häufigere Stillstände würden daher zu Verletzungen von Lieferverpflichtungen oder entgangenen Aufträgen führen.
- **Technische Prozessführung:** Einige Prozesse stehen aufgrund technischer Gegebenheiten nicht kontinuierlich für Lastflexibilisierungen zur Verfügung. Z. B. kann bei Hochtemperaturschmelzprozessen in vielen Fällen nicht in den Prozess eingegriffen werden, ohne das Schmelzaggregat und die Produktqualität zu gefährden.
- **Optimierte Prozesse:** Die ausgewählten Prozesse sind auf Energie- und Ressourcen(kosten)-Effizienz optimiert und werden i. d. R. im optimalen Betriebspunkt betrieben. Eine Abweichung aus dem optimalen Betriebspunkt zur Bereitstellung von Flexibilität führt automatisch zu einem Trade-off bzgl. der Effizienz. Die Zusammenhänge sind in vielen Fällen allerdings noch nicht quantifiziert. Hier besteht noch zusätzlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.
- **Einbettung in Produktionsketten:** Die ausgewählten Prozesse sind teilweise eng in Produktionsketten eingebettet, so dass eine Flexibilisierung Auswirkungen auf die gesamte Produktionskette hätte. Speicher können dies z. T. nur in sehr begrenztem Umfang kompensieren (z. B. Chlor); in manchen Fällen ist das Produkt des Prozesses nicht speicherbar (z. B. flüssiger Stahl).
- **Personalplanung:** In einigen Industrien, die im Batch-Verfahren produzieren, könnte eine Flexibilisierung prinzipiell u. a. durch die Verschiebung der Produktion über mehrere Stunden bis Tage geschehen. Die Personalplanung benötigt für solch eine Verschiebung jedoch i. d. R. einen ausreichenden zeitlichen Vorlauf. Zudem entstehen ggf. zusätzliche Kosten (z. B. Bereitschaftsdienst, Personalaufstockung).

Die unter diesen Rahmenbedingungen identifizierten technischen Potenziale werden in Kapitel 8.1 genauer charakterisiert, und in Kapitel 8.2 an den in Kapitel 1.4 definierten Anforderungsprofilen gespiegelt. Ein großer Teil dieser Potenziale wird bisher nicht gehoben. Die Hemmnisse zur Hebung dieser verbleibenden Potenziale werden daher in Kapitel 8.3 betrachtet. Die Wirtschaftlichkeit von Flexibilität stellt dabei in vielen Fällen ein zentrales Hemmnis dar. Daher werden die in Kapitel 7 gewonnenen diesbezüglichen Erkenntnisse in Kapitel 8.4 zusammengefasst. Die Referenzprozesse per se sind jedoch nicht unveränderlich, sondern Gegenstand kontinuierlicher Optimierungs- und Entwicklungsprozesse. Die Ergebnisse der Analyse der flexibilitätsrelevanten Innovationsprozesse sind in Kapitel 8.5 zusammengefasst.

## 8.1 VERGLEICH DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE DER AUSGEWÄHLTEN PROZESSE

Im Folgenden werden die ausgewählten Prozesse hinsichtlich ihrer technischen Flexibilitätspotenziale und den entsprechenden Abrufdauern und -häufigkeiten verglichen. Die Potenziale beziehen sich hierbei auf die flexibilisierbare Last der aktuell installierten Anlagen unter heutigen Rahmenbedingungen. Ergänzend werden in Kapitel 8.4 zukünftige Potenziale – sogenannte Flexibilitätsperspektiven – behandelt (siehe den Abschnitt „Klare Abgrenzung der Betrachtungszeiträume“ in 1.1.1.3 für detaillierte Erläuterungen zu diesen Begriffen).

### ELEKTROLICHTBOGENOFEN

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf ein voll ausgelastetes Werk mit Stranggussanlage. Elektrolichtbogenöfen verfügen über eine vergleichsweise hohe installierte Leistung. Die Schaffung eines Flexibilitätspotenzials durch eine Variation der Lichtbogenleistung während eines Schmelzzyklus ist nicht möglich, da die Leistung des Elektrolichtbogens (-ofen) in Abhängigkeit vom Schmelzprozess insbesondere am Ende eines Produktionszyklus immer im Bereich von 70–100 % variiert und der Arbeitspunkt des Elektrolichtbogenofens nicht beliebig gewählt werden kann. Der Elektrolichtbogenofen bietet daher ausschließlich ein Flexibilitätspotenzial zur Lastreduktion durch Unterbrechen des Prozesses, d.h. Ausschalten des Lichtbogens. Eine Unterbrechung/Ausschalten des Lichtbogens ist nur in der Aufschmelzphase möglich und darf nicht zum Ende der Chargenzeit erfolgen. Ein Flexibilitätspotenzial für Lastreduktion ergibt sich auch während der planmäßigen Unterbrechung des Prozesses beim Chargieren von Stahlschrott durch Verlängerung der Ausschaltzeiten und kurzzeitiger Verschiebung der Zykluszeit. Eine Lasterhöhung durch Verkürzung der Unterbrechungen ist allerdings nicht möglich.

Abrufe können für wenige Minuten innerhalb eines Zeitfensters erfolgen, das aus der geringfügig höheren Kapazität des Elektrolichtbogenofens gegenüber der nachgeschalteten Stranggussanlage resultiert. Im untersuchten Fall umfasst dieses Zeitfenster zwanzig Minuten bei störungsfreiem Betrieb je Acht-Stunden-Schicht. Das Zeitfenster ist primär als Puffer für Störzeiten gedacht und steht entsprechend nicht immer oder nur teilweise zur Verfügung. Längere Abrufe über dieses Zeitfenster hinaus sind hingegen nicht möglich. Da die Flexibilität nur während der Aufschmelzphase oder einer Unterbrechungen beim Chargieren abgerufen werden kann, ist die Verfügbarkeit der Flexibilität abhängig vom Ablauf des Schmelzprozesses und somit nur bedingt planbar. Prinzipiell können also mehrere Abrufe pro Tag erfolgen.

Zusätzliche Flexibilität besteht ggf. in nicht vollständig ausgelasteten Werken durch entsprechende Verschiebung der Produktionszeiten. Eine weitere Option ist die Erhöhung der Lichtbogenleistung, welche momentan noch in einem Forschungsprojekt untersucht wird.

### BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG – SCHMELZWANNE MIT ELEKTRISCHER ZUSATZHEIZUNG

Die (Behälter-)Glasherstellung ist ein über Jahre kontinuierlich laufender Prozess, der bei Einhaltung der Produktqualität keine Unterbrechung

der Prozesskette erlaubt. Insbesondere die schmelzführenden Teile (Glas-schmelzwanne und Zuführung der Schmelze zur Formgebung [Feeder]) verlangen eine möglichst konstante Energiezufuhr, um die Qualität der Glasprodukte sicher zu stellen, um die Entstehung von Glasfehlern zu minimieren und um die vorzeitige Schädigung der Anlagenteile zu verhindern.

Die Beheizung der Glasschmelzwannen erfolgt in der Regel mit Erdgas. Bei vielen Behälterglaswannen ist jedoch eine elektrische Zusatzheizung mit wenigen MW installierter Leistung vorhanden, durch die 5 % bis 15 % der zum Schmelzen benötigten Energie eingebracht werden. Die Leistungsaufnahme dieser Zusatzheizung kann um bis zu ca. 33 % der Anschlussleistung variiert werden. Eine beliebige Variation (vor allem ein einfaches An- und Ausschalten) ist praktisch nicht möglich, da der erforderliche elektrische Energieeintrag beim Schmelzen, bedingt durch Glasart und Glasfarbe sowie zur Erreichung eines höheren Durchsatzes, nur in gewissen Maße variabel ist.

Ab einer Abrufdauer von etwa fünf Minuten muss die Reduktion (Erhöhung) der Leistungsaufnahme der elektrischen Zusatzheizung durch eine entsprechende Erhöhung (Reduktion) des fossilen Energieeintrags ausgeglichen werden, um den maximalen Spielraum für Temperaturschwankungen der relevanten Prozesstemperaturen von  $\pm 5$  K einzuhalten. Abrufdauern sind in der Regel nur für weniger als eine Stunde möglich. Längere Abrufe wären prinzipiell durch Produktwechsel denkbar. Allerdings müssen in diesem Fall die Lieferverpflichtungen eine entsprechende Produktionsumstellung zulassen.

### **ROH- UND ZEMENTMAHLUNG**

Die Flexibilitätspotenziale der Roh- und Zementmahlung werden für Werke mit und ohne eigene Klinkerproduktion (integrierte Werke bzw. Mahlwerke) separat ermittelt. Erstere verfügen über Roh- und Zementmahlung, letztere nur über Zementmahlung. Ein Teillastbetrieb ist in keinem der beiden Fälle möglich. Daher entspricht die flexible Leistung der installierten elektrischen Leistung der Mühlenantriebe, welche in Summe typischerweise weniger als 15 MW beträgt. Charakteristisch für die Zementindustrie ist die starke Saisonalität der Produktion, welche sich auch in der Verfügbarkeit von Flexibilität niederschlägt. Die größte Flexibilität ergibt sich bei mittlerer Auslastung, wenn innerhalb eines Tages einerseits Produktionszeiten geplant sind und andererseits geplante Stillstandzeiten existieren, in die die Produktion verschoben werden kann.

Positives Flexibilitätspotenzial entspricht einer Lastreduktion durch Abschalten der Mühlen. Dies ist für die Roh- und Zementmahlung sowohl kurzzeitig, als auch u. U. bis zu zwölf Stunden möglich. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Prozessen können hier also längere Abrufdauern realisiert werden. Voraussetzung ist hierbei die saisonabhängige Möglichkeit zum Nachholen ausgefallener Produktion. Unter Berücksichtigung der Abrufdauer, Mindestbetriebsdauern von etwa vier Stunden und möglicher betriebsbedingter Sperrzeiten könnten Abrufe auch mehrmals täglich erfolgen. Die Zementmahlung könnte durch Anschalten der Mühlen theoretisch auch für die Bereitstellung von negativem Flexibilitätspotenzial genutzt werden. Allerdings sind hierfür ein entsprechender zeitlicher Vorlauf und aus Gründen der Qualitätssicherung des Produkts eine Betriebszeit von mindestens vier Stunden notwendig. Im Falle der Rohmahlung ist eine Lasterhöhung in der Regel nicht möglich.

### **CHLOR-ALKALI-ELEKTROLYSE**

Ähnlich zu Elektrolichtbogenöfen sind auch Anlagen der Chlor-Alkali-Elektrolyse durch vergleichsweise hohe Anschlussleistungen gekennzeichnet. Eine Besonderheit der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist ihre starke Einbindung in den Chemiapark. Aufgrund der unterschiedlichen Folgeprozesse können sich die Flexibilitätspotenziale zwischen den einzelnen Standorten daher deutlich unterscheiden. Darüber hinaus ist Chlor aufgrund gesetzlicher Vorgaben nur in begrenzten Mengen speicherbar. Eine weitere Besonderheit der Chlor-Alkali-Elektrolyse ist die erforderliche Mindestlast von ca. 50 % bezogen auf die installierte Leistung, um einen stabilen Betrieb der Anlage zu gewährleisten. Innerhalb des Intervalls zwischen Mindestlast und installierter Leistung ist prinzipiell jeder Betriebspunkt möglich. Allerdings sind die Rückkopplungen auf die Folgeprozesse zu berücksichtigen.

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf die Flexibilisierung durch Teillastbetrieb und die flexible Nutzung des Chlorspeichers. Aufgrund der hohen Auslastung der Anlagen von über 95 % ist eine Lasterhöhung in der Regel nicht möglich. Positives Leistungspotenzial kann hingegen für kurze Abrufdauern von rund 15 Minuten bereitgestellt werden. Trotz der hohen Anschlussleistung fällt die flexibilisierbare Leistung vergleichsweise gering aus. Dies ist ebenfalls auf die hohe Auslastung zurückzuführen, welche die Möglichkeiten für den Produktionsausgleich nach einer Lastreduktion deutlich einschränkt.

Darüber hinaus wird das Flexibilitätspotenzial maßgeblich durch die Verfügbarkeit speicherbarer Zwischenprodukte bestimmt. Im Falle der PVC-Produktion kann der EDC-Speicher zur Flexibilisierung der Chlor-Alkali-Elektrolyse genutzt werden. So können im Vergleich zu Prozessketten ohne speicherbare Zwischenprodukte sowohl höhere Leistungspotenziale für die Lastreduktion als auch Abrufdauern von bis zu mehreren Tagen erreicht werden. Eine Lasterhöhung ist jedoch auch in diesem Fall aufgrund der hohen Auslastung nicht möglich.

### **ROHSTOFFSCHMELZANLAGE**

Rohstoffschmelzanlagen verfügen über eine recht niedrige Anschlussleistung von wenigen MW. Dementsprechend fällt auch die flexibilisierbare Leistung gering aus. Positives Flexibilitätspotenzial kann durch Teillastbetrieb von bis zu einer Stunde bereitgestellt werden. Für bis zu fünf Minuten ist sogar eine komplette Abschaltung der Anlage möglich. Dies kann bis zu sechs Mal täglich erfolgen. Durch eine Erhöhung der Leistungsaufnahme kann negatives Potenzial für bis zu 15 Minuten abgerufen werden. Länger dauernde Lasterhöhungen sind hingegen nicht möglich.

### **VERGLEICH DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE DER AUSGEWÄHLTEN PROZESSE**

Tabelle 8.1 fasst die Ergebnisse der ausgewählten Prozesse zusammen. Für die flexible Leistung sind je nach Datenverfügbarkeit der Durchschnitt bzw. Median sowie der Bereich zwischen Minima und Maxima bezogen auf das Flexibilitätspotenzial einzelner Anlagen angegeben. Zusätzlich wird das auf Deutschland skalierte Flexibilitätspotenzial bestimmt. Hierfür wird von den Branchenvertretern je Prozess eine typische durchschnittliche Verfügbarkeit der Anlagen angenommen.

Der Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale zeigt, dass Lasterhöhungen generell nur in einzelnen Fällen durchgeführt werden können. Neben prozessspezifischen Restriktionen ist dies hauptsächlich auf die hohe Auslastung der Prozesse zurückzuführen. Elektrolichtbogenöfen und Chlor-Alkali-Elektrolysen sind durch hohe flexible Leistungen, dafür aber auch durch vergleichsweise kurze Abrufdauern gekennzeichnet. Eine Ausnahme bildet nur die PVC-Produktion, bei der durch Speicherung des EDC-Zwischenproduktes prinzipiell Abrufdauern über mehrere Tage möglich sind. Die Anschlussleistungen und damit auch die entsprechenden flexiblen Anteile von Anlagen der Roh- und Zementmahlung sind deutlich geringer. Dafür können hier jedoch sehr lange Abrufe von bis zu zwölf Stunden realisiert werden. Für Rohstoffschmelzanlagen Glasschmelzwannen sind vergleichsweise niedrige flexible Leistungen und mittlere Abrufdauern charakteristisch. Eine Flexibilisierung durch Teillastbetrieb ist nur im Falle der Chlor-Alkali-Elektrolyse, der Glasschmelzwanne und der Rohstoffschmelzanlage möglich.

Tabelle 8.1: Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale (positiv: Lastreduktion, negativ: Lasterhöhung) der ausgewählten Prozesse.

<sup>1</sup> Durchschnitt

<sup>2</sup> Median

<sup>3</sup> Maximalwert für ein integriertes Werk entspricht der Summe aus Roh- und Zementmahlung

	Elektrolichtbogenofen	Glasschmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	Roh- und Zementmahlung	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Rohstoffschmelzanlage
<b>Randbedingungen</b>	Stranggussanlage in ausgelastetem Werk	Kontinuierlicher Betrieb über bis zu mehr als 15 Jahre	Mahlwerk und integriertes Werk	Teillastbetrieb, Chlorspeicher, EDC-Speicher	Voll ausgelastete Anlage
<b>Teillastbetrieb</b>	Nein	EZH: Ja	Nein	Ja	Ja
<b>Technisches Flexibilitätspotenzial</b> <b>Durchschnitt<sup>1</sup>/ Median<sup>2</sup></b>			eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: ca. 3 MW Negativ: ca. 3 MW	Positiv: 13 MW <sup>2</sup> Negativ: 1 MW <sup>2</sup>	Positiv: 0,3 MW Negativ: 0,2 MW
<b>Bereich (Min – Max)</b>			Positiv: 0-11 MW <sup>3</sup> Negativ: 0-8 MW <sup>3</sup>	Positiv: 0-77 MW Negativ: 0-4 MW	Positiv: 0-4 MW Negativ: 0-0,5 MW
<b>Potenzial für Deutschland (Anzahl Werke/ Anlagen   Verfügbarkeit)</b>	Positiv: 766 MW Negativ: – (26   52 %)	Positiv: 25 MW Negativ: 25 MW (≈60   ≤75 %)	je Werk eine große Mühle flexibel betrieben: Positiv: 172 MW Negativ: 172 MW (55   saisonabhängig)	Positiv: 421 MW Negativ: 15 MW (21   95 %)	Positiv: 23 MW Negativ: 3 MW (13   45 %)
<b>Abrufdauer</b>	Wenige Minuten	Minuten	Bis zu 12 h abhängig von Betriebssituation und Produktvorrat ggf. länger möglich	Teillast: 15 Min. EDC-Speicher: bis zu mehreren Tagen	Positiv: 5-60 Min. Negativ: 15 Min.
<b>Abrufhäufigkeit</b>	Mehrmals täglich	Je nach Abrufdauer, ggf. mehrmals täglich	Ggf. mehrmals täglich möglich	Mehrmals täglich	Mehrmals täglich
<b>Besonderheiten des Prozesses</b>	Verfügbarkeit von Flexibilität nur bedingt planbar	Änderung der elektrischen Leistung muss durch Eintrag des fossilen Energieträgers substituiert werden	Starke Saisonalität; Mindestbetriebszeit von 4 h	Starke Einbindung in Prozessketten, Flexibilität abhängig von der Speicherbarkeit der Zwischenprodukte	Produktion in einem kontinuierlichen Chargenprozess

## 8.2 ERFÜLLBARKEIT DER ANFORDERUNGSPROFILE

Tabelle 8.2 gibt, basierend auf den Analysen in den Kapiteln 2 bis Kapitel 6, einen Überblick über die grundlegende Erfüllbarkeit der in Kapitel 1.4 definierten Anforderungsprofile durch die ausgewählten Prozesse der Grundstoffindustrien in ihrer derzeitigen Ausprägung. Es wird ersichtlich, dass diese zu großen Teilen nur zu bestimmten Zeiten (z. B. nur in bestimmten Phasen im Prozessverlauf) und nur für bestimmte Anforderungsprofile zur Bereitstellung von Flexibilität für den Strommarkt geeignet sind.

*Tabelle 8.2: Grundlegende Erfüllbarkeit der Anforderungsprofile in Abstimmung mit dem Betriebsleiter bei aktueller hoher Auslastung, bestehenden Lieferverpflichtungen und ohne Investitionsmaßnahmen.*

Branche	Prozess (Art der Prozesskette)	Anforderungsprofil 1 - Kurzfristige Anpassung der Last - Abrufdauer: 15 min - Vorankündigungszeit: wenige Minuten	Anforderungsprofil 2 - Verschieben der Last über mehrere Stunden - Abrufdauer: 3–12 h - Vorankündigungszeit: 1 Tag	Anforderungsprofil 3 - Reduktion der Last über mehrere Tage - Abrufdauer: 1–5 Tage - Vorankündigungszeit: 2–5 Tage
Stahl	Elektrolichtbogenofen (nur Strangguss)	(✓) <sub>pos</sub>	✗	✗
	Elektrolichtbogenofen (Strang- und Blockguss)	✗	✗	✗
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	✗	✗
Zement	Zementmühlen	(✓) <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>
	Rohmühle	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	(✓) <sub>pos</sub> <sup>S</sup>	✗
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	✓ <sub>pos</sub>	✗	✗
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (EDC-Produktion)	✓ <sub>pos</sub>	✓ <sub>pos</sub>	(✓) <sub>pos</sub>
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	(✓) <sub>pos u. neg</sub>	✗	✗

✓ Erfüllbar

(✓) Abhängig von den spezifischen Anforderungen der Prozesskette nur zu bestimmten Zeiten erfüllbar

✗ Nicht erfüllbar

S Nur an wenigen Standorten erfüllbar

pos/neg Vorwiegende Art der verfügbaren Leistung, positiv: Lastminderung, negativ: Lasterhöhung. Bei hohen Auslastungen meistens asymmetrische Leistungsverfügbarkeit, da hohe, kurze Lastminderungen durch lange, geringe Lasterhöhungen ausgeglichen werden müssen.

### 8.3 HEMMNISSE ZUR HEBUNG DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPOTENZIALE

Die Hemmnisanalyse in den Kapiteln 2 bis Kapitel 6 fokussiert (entsprechend den Vorgaben aus dem zugrunde liegenden Forschungsprojekt) auf prinzipielle Einschränkungen zur Erfüllung der Anforderungsprofile. Diese Einschränkungen wurden bei der Ausweisung der technischen Potenziale in Tabelle 8.1 berücksichtigt. Darüber hinaus bestehen Hemmnisse, die aus dem aktuellen regulatorischen Rahmen und Strommarktdesign erwachsen. Im Verlauf der Analyse wurden ebenfalls einige Hemmnisse letzterer Art erkennbar, die der Hebung prinzipiell verfügbarer technischer Potenziale derzeit noch entgegenstehen. Diese sind in Tabelle 8.3 aufgeführt.

Tabelle 8.3: Hemmnisse zur Hebung grundlegend verfügbarer technischer Flexibilitätspotenziale

Branche	Prozess (Prozesskette)	Art der Flexibilität	Wesentliche Hemmnisse zur Hebung des Potenzials
Stahl	Elektrolichtbogenofen (Strangguss)	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Präqualifizierungsbedingungen <sup>1</sup> ; Wirtschaftlichkeit (erhöhter Wärmeverlust)
Glas	Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	technisch/organisatorisch: Prozesskette darf nicht unterbrochen werden
Zement	Zementmühlen	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Präqualifizierungsbedingungen <sup>1</sup> ; Organisatorischer Aufwand; Wirtschaftlichkeit (verminderte Effizienz, ggf. erhöhter Verschleiß)
		Anforderungsprofil 2 (Verschieben über mehrere Stunden)	Organisatorischer Aufwand, insbesondere Personalplanung; Wirtschaftlichkeit (Personalkosten)
		Anforderungsprofil 3 (Lastreduktion über mehrere Tage)	Personal- und Produktionsplanung; Wirtschaftlichkeit (Anpassung von Betriebsabläufen, Personalkosten)
	Rohmühle	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Organisatorischer Aufwand; Wirtschaftlichkeit (verringerte thermische Energieeffizienz, ggf. erhöhter Verschleiß)
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse (ohne speicherbare Zwischenprodukte)	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Strompreisdesign (Leistungspreis); Netzentgeltordnung (StromNEV §19.2); Organisatorischer Aufwand (Folgeprozesse)
	Chlor-Alkali-Elektrolyse (mit Zwischenprodukt EDC)	Anforderungsprofil 2 (Lastreduktion über mehrere Stunden)	Wirtschaftlichkeit derzeit nicht gegeben
		Anforderungsprofil 3 (Lastreduktion über mehrere Tage)	Wirtschaftlichkeit derzeit nicht gegeben
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	Anforderungsprofil 1 (Regelenergie)	Netzentgeltordnung (StromNEV §19.2); Wirtschaftlichkeit (verminderte Effizienz)

<sup>1</sup> Um wie in Anforderungsprofil 1 vorgesehen Regelenergie anbieten zu können, muss eine Anlage gewisse Kriterien erfüllen und zum Nachweis ein Präqualifizierungsverfahren durchlaufen werden (vgl. <https://www.regelleistung.net/ext/static/prequalification>). U. a. muss die Regelenergie über den gesamten Ausschreibungszeitraum (Werktag, bzw. Woche) verfügbar sein, und es muss sowohl positive als auch negative Regelenergie zur Verfügung gestellt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden dass die derzeitigen Präqualifizierungsbedingungen für Regelernergie in vielen Fällen von den ausgewählten Prozessen nicht erfüllt werden können. Dies gilt insbesondere für die Bedingung der Arbeitsverfügbarkeit von als Minutenreserve angebotener Flexibilität zu 100 % der Angebotszeit sowie das gleichzeitige Vorhalten von positiver und negativer Regelernergie. Dies legt eine Vermarktung der Flexibilität über Aggregatoren nahe.

Des Weiteren ist bei den derzeit durch Flexibilisierung zu erwirtschaftenden Einnahmen eine Wirtschaftlichkeit nicht gegeben, bzw. ein möglicher geringer Gewinn ist mit Unsicherheiten behaftet und würde einen hohen organisatorischen Aufwand erfordern. Notwendig wäre z.B. das Durchlaufen des Verfahrens zur Präqualifizierung für Regelernergie, eine verstärkte innerbetriebliche Abstimmung des ausgewählten Prozesses mit anderen Stromverbrauchern zur Vermeidung von Leistungsspitzen aus Gründen der Netzentgelt-Minimierung, sowie allgemein die Berücksichtigung eines weiteren Steuerungsparameters beim betrieblichen Management. Längere Lastreduktionen führen zu Produktionsverlust und damit einem Verlust an Wertschöpfung und Erlösen.

## 8.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT VON FLEXIBILITÄT

Die wirtschaftliche Analyse beschränkte sich auf aktuelle Flexibilitätspotentiale und berücksichtigt weder Investitionsentscheidungen in neue Kapazitäten oder Speicher, noch Produktionsausfälle.

Wie beschrieben, ist die Grundstoffindustrie prinzipiell durch hohe Auslastungsgrade gekennzeichnet, was bei längerfristig existierenden Lieferverpflichtungen die Möglichkeit zur Flexibilitätserbringung einschränkt, da bei geringeren Auslastungsgraden die anzubietende Flexibilität steigt (dies gilt nur bis zu einem Auslastungsgrad von 50 % im zulässigen Teillastbereich, da so die Flexibilität in beide Richtungen variiert werden kann). Aus wirtschaftlicher Sicht ist allerdings auch zu berücksichtigen ob die Flexibilität in jenen Stunden erbracht werden kann, in welchen sie benötigt wird. Bei geringeren Auslastungsgraden ist bei einer festen Fahrweise der Produktion die Wahrscheinlichkeit geringer in jenen wenigen Stunden des Jahres zu produzieren in denen die Flexibilität am meisten benötigt wird, und damit auch die erzielbaren Erlöse für die Flexibilitätserbringung am höchsten ist. Dies ist insbesondere zum jetzigen Zeitpunkt der Fall, da häufig eine heuristische Ausrichtung an Tag-/Nacht- sowie Arbeitstag-/Wochenendpreisunterschieden vorliegt welche bereits wesentliche Preis-spitzen vermeidet. Diese Heuristik wird jedoch in Zukunft eventuell nicht mehr im selben Maße gelten, da in einem durch erneuerbare Energien dominierten Energiesystem ein deutlich größerer Einfluss von zufällig variierenden Witterungsbedingungen auf Elektrizitätspreise erwartet wird.

Bei einer flexiblen und optimierten Fahrweise, sinken bei geringeren Auslastungsgraden und optimierter Fahrweise die spezifischen Strombeschaffungskosten (pro MWh). Die größten Einsparungen treten bei den ersten Prozentpunkten unter Volllast auf. Mit weiter sinkenden Auslastungen, treten zwar weitere Einsparungen auf, diese fallen jedoch zunehmend kleiner aus. Der Grund ist das, nach technischer Möglichkeit, zuerst jene

Stunden mit den höchsten Elektrizitätspreisen vermieden werden, und die folgenden Stunden weniger Einsparmöglichkeiten bieten.

Dabei ist prinzipiell selbst bei sehr hohen Auslastungsgraden (eingeschränkt durch technische und praktische Hemmnisse) die kurzzeitige Erbringung von einem hohen positiven Leistungspotential (durch Lastreduktion) möglich, solange ein existierender Speicher hinreichend lange wieder aufgebaut werden kann. Mit sinkendem Auslastungsgrad (oder Investition in Überkapazität) und steigenden Speichern steigt auch die Möglichkeit über längere Zeithorizonte – bis hin zum Anforderungsprofil 3 – Flexibilität anzubieten. Dies ist zum Beispiel für die Zementmahlung der Fall.

Bei Teilnahme an Reservemärkten und anderen Systemdienstleistungsprodukten und damit Anforderungsprofil 1 kann eine Konkurrenzsituation zu anderen Anforderungsprofilen auftreten, da bei Reserven ein Leistungsbereich vorgehalten werden muss, welcher nicht für andere Flexibilitätsbereitstellungen verwendet werden kann. Ein gutes Marktdesign würde eine Ko-optimierung zwischen verschiedenen Märkten zulassen. Dies wird im aktuellen Marktdesign dadurch angenähert, dass kürzere Reservezeiträume definiert werden und so je nach Opportunitätskosten an einem oder dem anderen Markt teilgenommen werden kann.

Effiziente Preissignale, welche Opportunitätskosten zwischen der Erbringung von Flexibilität in verschiedenen Anforderungsprofilen (und Märkten) abbilden, können darüber hinaus dadurch verzerrt werden, dass spezifische Ausnahmeregelungen bezüglich des Leistungspreises oder zwischen Systemdienstleistungsmärkten<sup>2</sup> existieren, aber nicht (im selben Maße) für die Erbringung von Flexibilität am Day-Ahead oder Intraday-Markt.

<sup>2</sup> So muss bei gleichzeitiger Teilnahme am Markt für ABLAV und Regelleistungsmärkten keine Abschaltungsleistung erbracht werden, solange Reserveleistung angefordert wird.

Ein eingeschränkter Planungshorizont kann zu einer Verringerung der Kostenreduktion führen. Der Effekt ist umso stärker je kürzer der Planungshorizont ist, und je kleiner der Speicher. Bei größeren Speichern ist der Effekt nicht zu beobachten und bei Planungshorizonten von einer Woche oder mehr fällt er sehr klein aus. Dies deutet auf die Bedeutung von guten Prognosen, der Abschätzung von mittelfristigen Opportunitätskosten am Strommarkt sowie der Bedeutung von Speichern auf die wirtschaftliche Erschließung von Flexibilitätspotentialen hin.

## 8.5 VERGLEICH DER TECHNISCHEN FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN

Die technisch aber auch die wirtschaftlich erschließbaren Flexibilitätspotentiale der ausgewählten Prozesse sind keine statischen Größen. Sie sind, ganz im Gegenteil, einem nicht stetigen, oft sogar disruptiven Entwicklungsprozess unterworfen. Dieser wird einerseits durch technologischen Fortschritt, andererseits durch wirtschaftliche Entwicklungen beeinflusst. Während die mittelfristige Perspektive der Flexibilitätspotentiale hauptsächlich durch konjunkturelle Auslastungsschwankungen bedingt ist, welche bei geringen Auslastungen Flexibilitätspotentiale ermöglichen, wird die langfristige Zukunftsaussicht maßgeblich durch investitionsbedingte Produktions- und Speichererweiterungen sowie technologischen Fortschritt beeinflusst, welche die Erfüllbarkeit verschiedener Anforderungsprofile je nach Prozess erhöhen kann. Da die Zusammenhänge zwischen

der Kapazitätsauslastung und dem erschließbaren sowie technischen Flexibilitätspotential bereits in den vorhergehenden Kapiteln 8.1 und 8.4 erörtert wurde, wird im folgenden Kapitel auf die derzeit in diesem Kontext relevantesten Flexibilitätsperspektiven durch technologische Innovationen in den ausgewählten Prozesse eingegangen.

Trotz ihrer Produkt- und Prozessdiversität sind die Branchen der Grundstoffindustrie durch ihre traditionell geringe Gewinnmarge und den kontinuierlich wachsenden Kostendruck geeint. Einerseits zwingt die, der Grundstoffindustrie inhärente, straffe Kostenstruktur die Industrie dazu, ihre Prozesse dementsprechend anhand der Parameter Effizienz und Kostengestaltung zu optimieren. Andererseits muss die Industrie ihre Prozesse entsprechend den Forderungen europäischer und nationaler Umweltauflagen hinsichtlich Energieeffizienz und CO<sub>2</sub>-Emissionen ständig anpassen und adaptieren. Diese Situation spiegelt sich in der Schwerpunktlegung der Forschungsbestrebungen der Branchen wieder: erforscht werden vorrangig Innovationen zur Effizienzsteigerung und Dekarbonisierung während Forschung zur Flexibilisierung von Prozessen derzeit noch wenig Beachtung findet.

Aufgrund der daraus resultierenden geringen Anzahl an publizierten Flexibilitätinnovationen und den nur spärlichen zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Publikationen zu der meist als Firmengeheimnis gehaltenen Forschung, wurde die Analyse auf alle die Flexibilität beeinflussenden Innovationen erweitert, auch wenn die Flexibilität nicht im Fokus dieser technischen Innovationen steht. Dabei wurden in einem ersten Schritt die relevanten Innovationen je ausgewähltem Prozess beleuchtet, entsprechend ihres Einflusses auf die Lastflexibilität bewertet und in den Marktkontext gesetzt. Daran anschließend wurden die für die Entwicklung der Lastflexibilität bedeutendsten Innovationen entsprechend ihres Zusammenspiels mit der Stromwirtschaft bewertet und die Perspektiven der einzelnen Prozesse beleuchtet. Abschließend wurden die so entwickelten Perspektiven je Branche einander gegenübergestellt und miteinander verglichen.

Die prozessspezifische Untersuchung der Innovationen belegt die Diversität der im Rahmen dieses Projekts betrachteten Branchen: die Art und Anzahl der momentan erforschten Prozessinnovationen je Prozess unterscheiden sich stark. Vorrangigstes Unterscheidungsmerkmal der Innovationen der ausgewählten Prozesse ist der momentane sowie der angestrebte Elektrifizierungsgrad der einzelnen Prozesse. Während einige Prozesse, wie die Elektrostahlerzeugung und die Chlor-Alkali-Elektrolyse, bereits beinahe vollelektrisch betrieben werden, verwenden andere Prozesse, wie die Rohstoffschmelzanlage der Feuerfestindustrie aber auch die Schmelzwannen der Behälterglasindustrie heute nur wenig Strom.

In Tabelle 8.4 sind die im Rahmen dieser Untersuchung als für die Stromlastflexibilität relevant eingestuften Innovationen je Branche aufgeführt.

Bei dem Elektrolichtbogenofen lassen sich Weiterentwicklungen von Lastmanagementsystemen realisieren, die ggf. eine zusätzliche horizontale Vernetzung mit anderen Teilbetrieben der Prozesskette ermöglichen. Als derzeit zwar noch in Forschung befindliche aber im Kontext der Stromlastflexibilität möglicherweise interessanteste technologische Innovation der Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen wurde der Contiarc Ofen iden-

tifiziert. Für die Chlor-Alkali-Elektrolyse konkurrieren drei verschiedene relevante Innovationsansätze welche im Folgenden beleuchtet werden, wovon jedoch lediglich eine derzeit technologisch als auch wirtschaftlich darstellbar ist. Gutbett- und Vertikalwalzmühlen wurden im Rahmen der Studie als zukunftssträchteste Innovationen für Zementmühlen identifiziert.

Da der Stromverbrauch, sowohl für die Gemengeaufbereitung als auch bei der Behälterglasformgebung und den nachfolgenden Prozessschritten (Qualitätsprüfung und Verpackung) in ihrer derzeitigen Betriebsform gering und nicht flexibel ist, konnten für diese Prozesse abseits der Umstellung auf elektrische Prozessführung der Schmelze keine, für die Stromlastflexibilität relevanten, Innovationen identifiziert werden.

Tabelle 8.4: Für die Stromlastflexibilität relevante Innovationen der ausgewählten Prozesse

Industriezweig	Prozess	Flexibilitätsrelevante Innovationen
Stahl	Elektrolichtbogenofen	intelligente Lastmanagement- und Prognosesysteme Contiarc Ofen
Chemie	Chlor-Alkali-Elektrolyse	Doppelmembran (FX-50B) Präkathodendiaphragmas schaltbare Sauerstoffreduktion
Zement	Roh-/Zementmahlung	separate Feinstmahlung, zusätzliche Mahl- und/oder Silokapazitäten
Glas	Behälterglasherstellung	Elektrifizierung elektrische Booster
Feuerfest	Rohstoffschmelzanlage	Innovative Regelungstechnik Elektrifizierung

### ELEKTROLICHTBOGENOFEN

Beim Elektrolichtbogenofen sind Weiterentwicklungen der Last- und Prognosesysteme denkbar, die eine weitere Verbesserung der Vorhersage, Planung und Steuerung des Energiebedarfs unterstützen. Dabei ist auch die horizontale Vernetzung der Einzelbetriebe in der Prozesskette der Elektrostahlherstellung zu berücksichtigen. Ein technologischer Fortschritt in der Anwendung von Elektrolichtbogenöfen wurde durch die Entwicklung des Contiarc Ofens erzielt. Die Funktionsweise basiert auf einem mit Gleichstrom betriebenen kontinuierlich laufenden Lichtbogenofen. Die Elektroden sind dabei durchgehend in der Schmelze eingetaucht. Dadurch kann die Produktivität sowie die Energieeffizienz gesteigert werden. Dies ist jedoch für Werke in Deutschland keine wirtschaftlich verfügbare Technologieperspektive, sondern lediglich eine mögliche Technologie für Neubau-Vorhaben.

### BEHÄLTERGLASHERSTELLUNG

Bei der Glasherstellung spielt die Schmelzwanne eine zentrale Rolle in der Produktion und im Energieverbrauch. Zur Beheizung der Schmelzwannen wird traditionell auf fossile Energieträger, vor allem Erdgas, zurückgegriffen. Lediglich in kleinen und hochspezialisierten Anlagen mit einem Durchsatz von 25–50 t/d werden die Wannen in Deutschland heute elektrisch betrieben. In der EU werden trotz des höheren Wirkungsgrades elektrischer Wannen nur 43 der 628 bestehenden Schmelzwannen elektrisch betrieben. Viele Wannenbetreiber greifen aber auf elektrisches Boos-

ting (EZH) zur (teilweise zeitlich begrenzten) Anpassung des Durchsatzes zurück. [1] Im Zuge der Flexibilitätssteigerung dieser Industrie sollte der Energieträgerwechsel zu Strom, soweit technologisch möglich, jedoch gefördert werden. Lichtbogenöfen für Spezialgläser mit höherer Produktivität existieren (3 Anlagen mit bis zu 180 t/d), deren Einsatz findet allerdings nur geringe Verbreitung (Gründe sind u.a. der hohe spezifische Energieverbrauch und die Kosten für elektrische Energie).

### **ROH- UND ZEMENTMAHLUNG**

Für die Herstellung von Klinker ist das Mahlen der Rohmaterialien und für die Herstellung von Zement insbesondere das Mahlen des Klinkers und der weiteren Zementhauptbestandteile notwendig. Die Rohmahlung erfolgt oft in Gutbett-Walzenmühlen. Das in Deutschland verbreitetste Verfahren für die Zementmahlung sind Kugelmühlen. Der spezifische elektrische Energieeinsatz liegt in der gesamten Prozesskette bei ca. 110 kWh<sub>el</sub>/t Zement, wovon rund 65 % (vgl. VDZ Branchensteckbrief Zement 2016; Kapitel 4.1) auf die Zerkleinerung in Mühlen entfallen. Eine mögliche Innovation zur Steigerung der Flexibilität in der Zementmahlung wäre ein separates Feinmahlen von Fraktionen der Zementhauptbestandteile. Weitere Untersuchungen zu dieser Technologie und ihre praktische Demonstration in einer Pilotanlage sind für die Fortführung des Projektes vorgeschlagen.

### **CHLOR-ALKALI-ELEKTROLYSE**

In der Forschung zur Weiterentwicklung der Chlor-Alkali-Elektrolyse mittels Membranverfahren waren in der jüngsten Vergangenheit drei technologische Neuerungen von besonderem Interesse. Einerseits wurde versucht, mittels der Einführung einer Doppelmembran den Elektrolyseprozess bei geringeren Natriumhydroxidkonzentrationen zu ermöglichen, um so die energieintensive Nachkonzentration durch Abdampfen der Natronlauge zu umgehen. Die industrielle Implementierung dieser neuen Technologie wurde aber wieder aufgegeben. Dies lag einerseits an technischen Problemen, andererseits erweist sich die Nutzung der Doppelmembran nur unter einem vorteilhaften Verhältnis zwischen Strom und Dampfkosten als ökonomisch sinnvoll, da der Vorteil des reduzierten Dampfbedarfs durch den erhöhten Strombedarf der elektrisch weniger effizienten Elektrolyse in der Doppelmembran aufgehoben wird [2]. Ebenfalls aus technischen Gründen aufgegeben wurden Forschungen zum Einsatz von Prækathodendia-phragmas zur Spannungsabsenkung, da die Funktionalität an asbestfreien Membranen nicht nachgewiesen werden konnte [3].

Einen technologischen Sprung welcher auch auf die Spannungsabsenkung abzielt, stellt die schaltbare Sauerstoffverzehrkathode dar (vgl. Kapitel 5.4.3). Durch ein Umschalten zwischen dem „normalen“ Modus und dem Sauerstoffverzehrmodus wird ein Flexibilitätspotenzial erschlossen. Die Ansprechzeit wird aktuell durch die notwendigen Spülvorgänge limitiert, um die Entstehung explosionsfähiger Gemische auszuschließen.

### **ROHSTOFFSCHMELZANLAGE**

Von besonderem Interesse im Kontext der Stromlastflexibilisierung der Feuerfestindustrie sind die vollelektrisch betriebenen Rohstoffschmelzanlagen. Nur in ihnen ist die Realisierung von Hochtemperaturschmelzprozessen möglich. Daher muss der technische Fortschritt der Anlagenhersteller bei allen relevanten Innovationen die Ziele hoher Energieeffizienz und der noch möglichen Energieflexibilisierung im Focus haben. Da die Elektroschmelzanlagen heute aber nur einen geringen Bestandteil der Zulie-

ferindustrie für die Feuerfestindustrie darstellen, sind diesbezüglich keine detaillierten Informationen und Erfahrungen publiziert.

### **ZUSAMMENFASSUNG ZU DEN FLEXIBILITÄTSPERSPEKTIVEN DER REFERENZPROZESSE**

Grundsätzlich können die ausgewählten Innovationen in zwei Kategorien eingeteilt werden: 1. Steigerung der Energieeffizienz und 2. Elektrifizierung. Die Gegenüberstellung der ausgewählten Innovationen der einzelnen Branchen weist darauf hin, dass für Prozesse, welche bereits heute zu einem hohen Grad elektrisiert sind, Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz den größten Einfluss auf die Flexibilitätspotentiale der Branche haben. Denn, werden die elektrisch betriebenen Prozesse effizienter so sinkt in der Regel der Strombedarf und damit sowohl das theoretische als auch das technische Flexibilitätspotential. Dies gilt sowohl für die identifizierten Maßnahmen der Elektrostahlherstellung als auch für den Einsatz der effizienteren Gutbett- und Vertikalwalzmühlen der Zementindustrie. Trotzdem können auch hauptsächlich elektrisch betriebene Prozesse, wie die Chlor-Alkali-Elektrolyse, Gegenstand von Innovationen der ersten und zweiten Kategorie gleichermaßen sein. So führt der Einsatz von Doppelmembranen zu einer Steigerung der Energieeffizienz des Gesamtprozesses, während der Strombedarf durch die steigende Elektrifizierung erhöht wird. In Prozessen von geringem Elektrifizierungsgrad, wie der Behälterglasschmelzwanne, werden lediglich Innovationen zur Erhöhung des Elektrifizierungsgrades bzw. zur vollen Elektrifizierung der Prozesse einen Einfluss auf die Stromlastflexibilität haben, welche aber heute aufgrund der Kostendifferenz zwischen fossilen Brennstoffen und elektrischem Strom nur wenig Beachtung finden. Außerdem gilt zu beachten, dass, ausgehend vom heutigen Energiebedarf der ausgewählten Prozesse, ein vollelektrischer Betrieb dergleichen zu einer signifikanten Erhöhung des deutschen Stromverbrauchs führen würde, welcher wiederum den Flexibilitätsbedarf weiter erhöhen würde. Es müssen daher einerseits Forschungsanreize geschaffen werden, welche neben Effizienzsteigerung und Elektrifizierung auch auf gesteigerte Flexibilität beim Verbrauch von Strom aber auch anderen Brennstoffen abzielen.

## 8.6 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] B.M. Scalet, S. Roudier, M. Garcia Muñoz, L. Delgado Sancho, A.Q. Sissa, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control. Luxemburg, EU Publications Office, 2013
- [2] T. Brinkmann, G. G. Santonja, F. Schorcht, S. Roudier, L. D. Sancho, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-Alkali – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU: Integrated Pollution Prevention and Control. Luxemburg, EU Publications Office, 2014
- [3] Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC) Reference Document on Best Available Techniques for the Production of Chlor-alkali – Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Sevilla, European Commission JRC Institute for Prospective Technological Studies, 2014



KAPITEL 9

## **REGIONALE VERTEILUNG DER UNTERSUCHTEN PROZESSE**

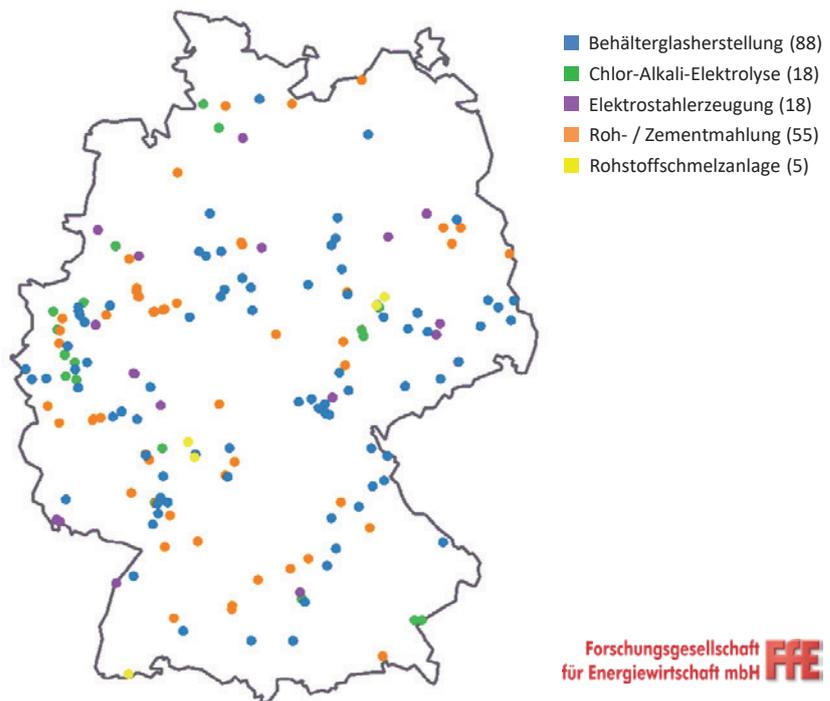
Christa Dufter, Serafin von Roon,  
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München



Um die vorhandenen Flexibilitätspotenziale der untersuchten Prozesse markt- und netzdienlich einzusetzen, ist deren räumliche Position mit entscheidend. Diese ist in Abbildung 9.1 dargestellt. Generell verteilen sich die entsprechenden Standorte relativ gleichmäßig über ganz Deutschland. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich zusätzlich folgendes: Im Norden befinden sich kaum Standorte. Im Ruhrgebiet ist hingegen eine deutliche Konzentration zu erkennen. Prinzipiell bietet die Verteilung über ganz Deutschland jedoch gute Voraussetzungen für den Einsatz von Lastflexibilisierung.

Eine Auswertung nach Branchen zeigt gewisse Unterschiede in der Verteilung der Produktionsstätten auf. Standorte der Behälterglasherstellung und Elektrostahlerzeugung sind relativ gleichmäßig über ganz Deutschland verteilt. Gleiches gilt für die Roh- und Zementmahlung, allerdings ist hier zusätzlich eine Konzentration in Nordrhein-Westfalen zu erkennen. Bei den Standorten der Chlor-Alkali-Elektrolyse zeigt sich eine deutliche Konzentration in der Gegend des Ruhrgebiets. Bei den Standorten der Rohstoffschmelzanlage ist keine eindeutige Verteilung zu erkennen.

Abbildung 9.1: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland



Für eine vereinfachende energiewirtschaftliche Bewertung der Standortverteilung, werden zusätzlich die verorteten untersuchten Prozesse in Beziehung zur Residuallast gesetzt. Abbildung 9.2, Abbildung 9.3 und Abbildung 9.4 zeigen verschiedene Darstellungen der Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios des FfE-Projekts „Merit Order

Netz-Ausbau 2030 (MONA 2030)“ [1]. Die Residuallast bezeichnet die Differenz zwischen Last und möglicher Stromerzeugung aus dargebotsabhängigen Energieträgern wie Wind und Sonne. Übersteigt die Last die Erzeugung aus Erneuerbaren Energien, so spricht man von positiver Residuallast. Negative Residuallast bezeichnet entsprechend eine Situation, in der mehr Strom aus Erneuerbaren Energien erzeugt wird als verbraucht wird.

In Abbildung 9.2 ist die Jahressumme der Residuallast dargestellt. In den rot eingefärbten Gebieten ist die Summe der Last im Jahresverlauf deutlich höher als die erneuerbare Erzeugung. Diese Gebiete befinden sich v.a. im Westen Deutschlands, wo sich auch viele Standorte der untersuchten Prozesse befinden. Auch in den grünen Gebieten ist die Jahressumme der Residuallast positiv, d.h. auch hier übersteigt die Jahressumme der Last die Einspeisung aus Erneuerbaren, allerdings hier nur geringfügig. Die Küstenregion ist aufgrund der Offshore-Windparks durch hohe Überschüsse Erneuerbarer gekennzeichnet. Da sich hier jedoch kaum Standorte der untersuchten Prozesse befinden, wird ihr Beitrag zur Integration der Windenergie in dieser Region eher gering sein.

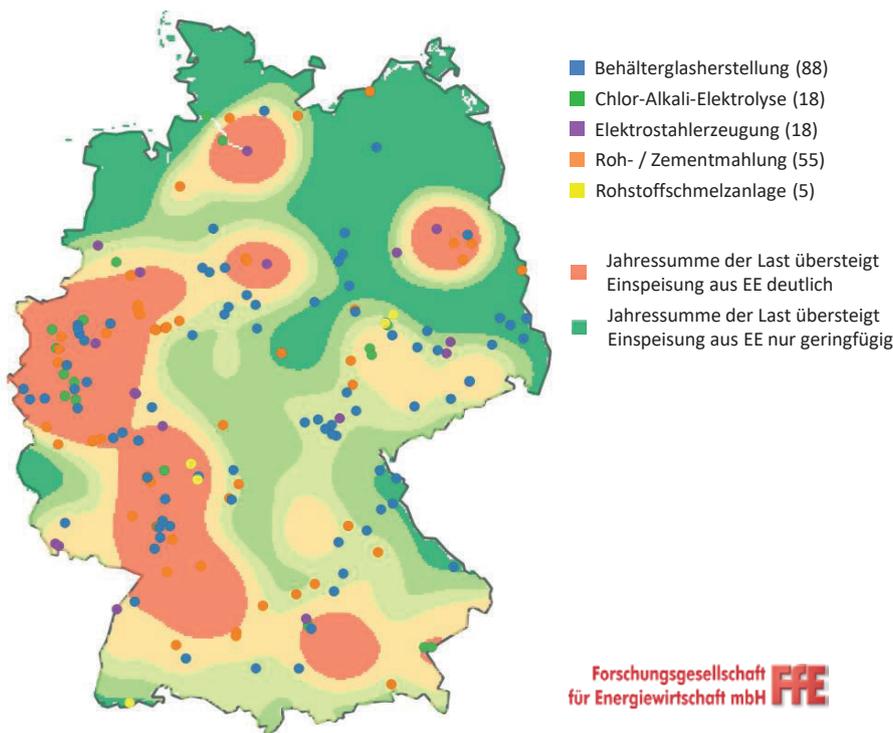


Abbildung 9.2: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland und Jahressumme der Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]

Abbildung 9.3: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland und maximale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]

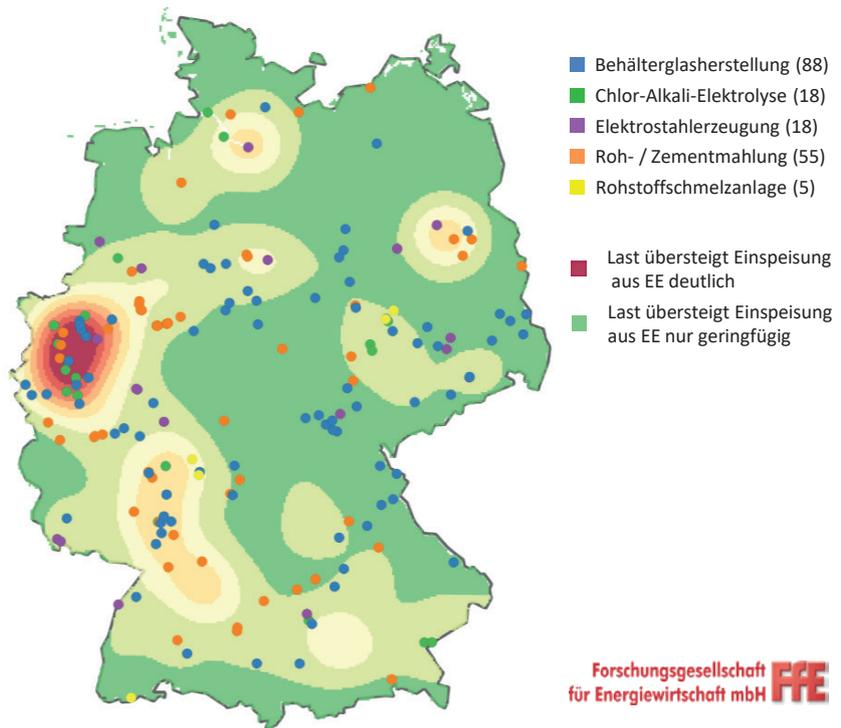
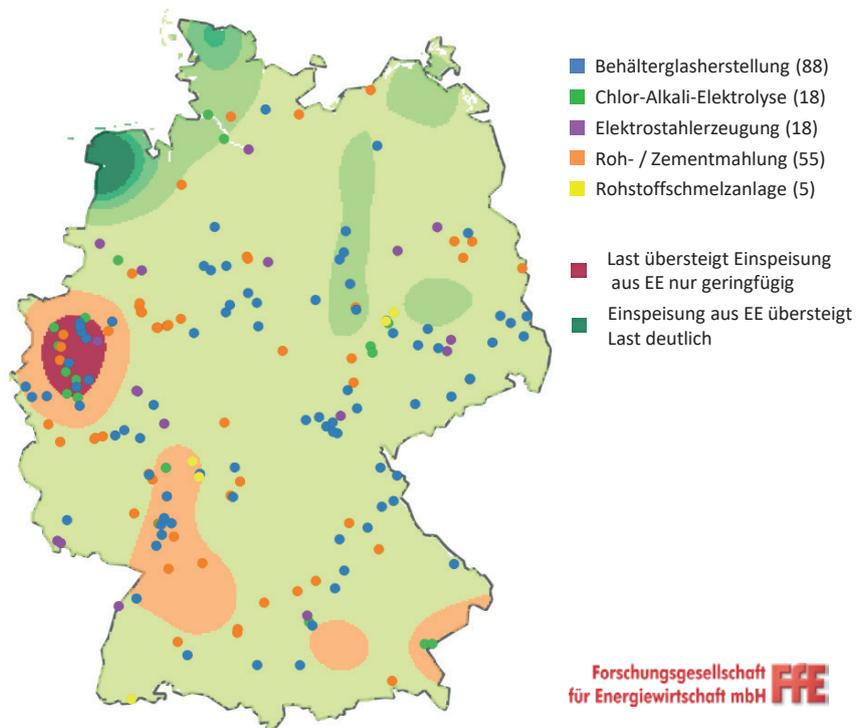


Abbildung 9.4: Standorte der untersuchten Referenzprozesse in Deutschland und minimale Residuallast auf Basis des konservativen Szenarios aus MONA 2030 [1]



In Abbildung 9.3 und Abbildung 9.4 sind diejenigen Stunden in 2030 dargestellt, welche jeweils die maximale und minimale Residuallast aufweisen.

Im Ruhrgebiet könnte die Situation in Stunden mit extrem hoher positiver Residuallast durch Lastreduktion entschärft werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Last bezogen auf die Jahressumme die erneuerbare Erzeugung deutlich übersteigt (siehe Abbildung 9.2). Es gilt also zu vermeiden, dass kritische Situationen durch den zeitlich versetzten Ausgleich der Produktion und einer damit einhergehenden Lasterhöhung zusätzlich verschärft werden.

Standorte in Gebieten mit sehr niedriger minimaler Residuallast (mittelgrün bis dunkelgrün in Abbildung 9.4), können in kritischen Stunden einen Beitrag durch Lasterhöhung leisten. Allerdings sind diese Gebiete teilweise durch deutliche Überschüsse an erneuerbarer Einspeisung im Jahresverlauf gekennzeichnet. So könnte es auch hier durch den zeitlich folgenden Produktionsausgleich durch Lastreduktion zu möglichen kritischen Netzsituationen kommen, die nur noch durch Abregelung erneuerbarer Energien Anlagen gelöst werden können.

Diese Einschätzungen haben jedoch nur indikativen Charakter. Um belastbare Aussagen über die Möglichkeiten zur Integration der untersuchten Flexibilitätspotenziale treffen zu können, sind entsprechende Netzsimulationen erforderlich.

## 9.1 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Regett, Anika; Zeiselmaier, Andreas; Wachinger, Kristin; Heller, Christoph: Merit Order Netz-Ausbau 2030 - Teilbericht 1: Szenario-Analyse. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2017



## KAPITEL 10

# FAZIT UND AUSBLICK

Florian Ausfelder,  
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.,  
Frankfurt am Main

Antje Seitz,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Stuttgart

Serafin von Roon,  
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München

## 10.1 ZIELSETZUNG DER ARBEITEN

Die Grundstoffindustrien sind mit ihren stoffumwandelnden Prozessen sehr energieintensiv. Sie benötigen rund 75 % des gesamten industriellen Energiebedarfs in Deutschland. Ihre Prozesse sind seit Jahrzehnten auf energetische und Rohstoffeffizienz hin ausgerichtet und der Energieeinsatz, in der Regel über Brennstoffe, erfolgt sehr prozessspezifisch, so dass Verallgemeinerungen über die gesamte Grundstoffindustrie oder auch nur über Branchen in der Regel nicht zulässig sind. Die untersuchten Prozesse der einzelnen Branchen zeichnen sich durch ihre Bedeutung in der Branche aus, einen relativ hohen Anteil elektrischer Energie im Prozess zu verbrauchen und/oder sie sind ausreichend repräsentativ für die Branche.

## 10.2 METHODISCHE VORGEHENSWEISE

Für eine strukturierte Untersuchung der Prozesse mit ihren unterschiedlichen Attributen ist eine eindeutige Begriffsdefinition für die Beschreibung der Flexibilitätsoptionen unabdingbar. In den methodischen Kapiteln wurde daher die Grundlage für eine konsistente Beschreibung der Prozesse und ihrer möglichen Wechselwirkungen in Bezug auf Flexibilität gelegt. Dies umfasst sowohl eine eindeutige Definition der Potenzialbegriffe, als auch eine Rahmensetzung. In diesem Kontext wurden exemplarische Anforderungsprofile aus zu erwartenden (Netz-)Situationen abgeleitet, in denen ein entsprechendes Flexibilitätsangebot netzdienlich unterstützt werden kann.

Neben den technischen Möglichkeiten oder Grenzen, die die betrachteten Prozesse aufweisen, wurden auch über technische Aspekte hinausgehende Hemmnisse untersucht, insbesondere regulatorische, betriebswirtschaftliche und organisatorische Hemmnisse, die eine Implementierung von Flexibilitätsoptionen beeinflussen. Diese Hemmnisse spielen eine dominante Rolle bei der Frage, welche der technisch möglichen Flexibilisierungsoptionen praktisch umsetzbar wären.

Diese Anforderungsprofile, die Definitionen und die Hemmnis-Analyse bildeten die Grundlage für ausgiebige Gespräche und Diskussionen mit industriellen Anwendern und Experten. Diese Gespräche fanden teilweise vor Ort in den Betrieben und an den Anlagen oder im Rahmen von persönlichen Treffen und Telefonaten statt. Parallel dazu wurden die wissenschaftlich-technischen Netzwerke der Forschungseinrichtungen der Verbände eingebunden, um die Diskussionsergebnisse zu verifizieren und die Aussagen für die jeweilige Branche zu validieren.

### 10.3 BRANCHENÜBERGREIFENDE ERGEBNISSE

Die Prozesse der Grundstoffindustrie weisen trotz ihrer unterschiedlichen Branchen viele Gemeinsamkeiten auf:

1. Für die Unternehmen hat die möglichst kostengünstige **Einhaltung von Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden** mit dem Produkt zu den entsprechenden Spezifikationen in der vereinbarten Menge und zum vereinbarten Zeitpunkt **immer Priorität vor** energiewirtschaftlichen Maßnahmen, wie dem **Anbieten von Flexibilität**.
2. So werden die Prozesse auf eine möglichst effiziente Betriebsweise am optimalen Betriebspunkt ausgelegt und gemäß der Produktnachfrage betrieben. Das Abweichen von diesem optimalen Betriebspunkt, bzw. der maximalen Auslastung z.B. durch das Anbieten von Flexibilität, führt in der Regel zu einem Verlust an Effizienz im Prozess. Es gibt für die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie daher eine **gegenläufige Wechselwirkung zwischen energetischer Effizienz und Flexibilität**.
3. In den Grundstoffindustrien ist die Produktqualität im Sinne der Spezifikationen des Produktes eine direkte Funktion der Prozessierung, so dass **Änderungen der Prozessbedingungen zu Veränderungen der Produktqualität** führen. Den Einfluss von häufigen, schnellen Laständerungen innerhalb der betrachteten Prozesse auf die Produktqualität gilt es weiter zu untersuchen. In der Grundstoffindustrie muss jedoch davon ausgegangen werden, dass Kundenanforderungen, geltende technische Standards, vertragliche Gewährleistungen und die Nachhaltigkeit der Produktnutzung in der Regel keine Minderung der Produktqualität zulassen.
4. Die **Wechselwirkungen zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und deren Auswirkung auf die Anlagen und ihre kritischen Komponenten** in Bezug auf ihre Eigenschaften und Lebensdauern sind bisher **nicht ausreichend untersucht**.
5. Die Prozesse der Grundstoffindustrie sind eingebunden in Prozessketten, die als Vorketten die Rohstoffe zur Verfügung stellen, und nachgelagerter Prozesse, die das Produkt weiterverarbeiten. Die standortspezifische relative Dimensionierung dieser Verfahrensschritte zueinander begrenzt die Möglichkeiten der Flexibilisierung einzelner Verfahrensschritte. **Die Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind sehr stark von den standortspezifischen Prozessketten und den Möglichkeiten zur Produktspeicherung innerhalb der Prozesskette** abhängig.
6. Die Anlagen der betrachteten Prozesse sind sehr kapitalintensiv und werden daher unter möglichst hoher Auslastung betrieben. Daher sind die **Potenziale zur Lasterhöhung bei hoher Produktnachfrage**, wenn überhaupt vorhanden, **sehr gering**, während die **Potenziale für eine Lastreduktion ohne entsprechenden Ausgleich**, speziell für längere Abrufdauern, **in der Regel mit Produktionsausfall** einhergehen, was in den Kosten für Flexibilitätsangebote berücksichtigt werden muss.
7. Möglichkeiten zur flexiblen Produktion und einer Lastreduktion auf Anforderung ergeben sich bei einzelnen Prozessen, deren Auslegung und Kapazität z.B. saisonbedingt nur eine mittlere Auslastung aufweist. Hierbei kann **durch eine Lastverschiebung sichergestellt werden, dass ausgefallene Produktion innerhalb kürzerer Zeit nachgeholt werden kann**.
8. Die aktuellen Regelungen im Strommarkt führen auch zu Sonderformen der Netznutzung z.B. mit einer möglichst konstanten Abnahme

elektrischer Energie für die Prozesse aus dem Stromnetz oder auch einer reduzierten Abnahme von Strom in definierten Hochlastzeiten. Die Unternehmen betreiben ein aktives Management zur Lastspitzenvermeidung. Insbesondere der mögliche **Verlust der Berechtigung oder des Umfangs individueller Netzentgelte nach §19 Abs. 2 (StromNEV) stellt für die Unternehmen eine erhebliche Hürde** für das Anbieten von Flexibilität dar.

9. Die Unternehmen der Grundstoffindustrie bestehen auf einem **Primat der betrieblichen Erfordernisse** gegenüber dem externen Aufruf von Flexibilitätsoptionen. Die Möglichkeit, die Anfrage zur Bereitstellung einer Flexibilitätsoption aus betrieblicher Notwendigkeit heraus ablehnen zu können, wird als essentiell angesehen und sollte im Mechanismus der Flexibilitätsbereitstellung berücksichtigt sein.
10. Ein wichtiges ökonomisches Hemmnis stellen große Ungewissheiten bei der Entwicklung am Strommarkt dar. Um Flexibilität im Stromeinsatz zu ermöglichen, sind in der Regel **langfristig zu amortisierende Investitionen** nötig. Entsprechend muss eine **ausreichende Planungssicherheit** bestehen, dass diese Investitionen ökonomisch langfristig tragfähig sind.
11. Zusammenfassend sind die **technischen Limitierungen der Prozesse** in der Regel **nicht die entscheidenden begrenzenden Randbedingungen für das Anbieten von Flexibilität**, sondern sie limitieren die Bereitschaft und die Möglichkeiten für das Anbieten von Flexibilitätsoptionen.

## 10.4 BRANCHENSPEZIFISCHE ERGEBNISSE

Neben den oben dargestellten übergreifenden Aspekten haben die Prozesse der einzelnen Branchen ihre individuellen Besonderheiten und Ausgestaltungen, die innerhalb jeder einzelnen Branche zu Besonderheiten und speziellen Rahmenbedingen führen. Diese gilt es in der Diskussion um Flexibilität zu beachten. Im Folgenden werden die speziellen Aspekte der einzelnen Branchen und ihrer Prozesse dargestellt.

### 10.4.1 EISEN- UND STAHLHERSTELLUNG (ELEKTROLICHTBOGENOFEN)

In der Stahlindustrie wurde der Elektrolichtbogenofen als stromintensiver Referenzprozess auf mögliche Flexibilisierungen untersucht. Der Elektrolichtbogenofen ist Teil einer Prozesskette zur Erzeugung von Flüssigstahl, die auf Herstellung von Strangguss oder Blockguss ausgerichtet ist. Der Elektrolichtbogenofen kann ausschließlich eine Lastreduktion zur Verfügung stellen, die durch das Ausschalten des Ofens oder durch Verlängerung einer Betriebsunterbrechung erzielt wird. Eine Lasterhöhung ist entsprechend den untersuchten Anforderungsprofilen technisch nicht mit dem Elektrolichtbogenofen realisierbar.

Die Flexibilität des Elektrolichtbogenofens ist technisch wesentlich von seiner Einbindung in die Prozesskette und von der Produktionsstruktur des jeweiligen Standortes abhängig. Flexibilität ist dann verfügbar, wenn Reserven in der Kapazität und Leistung der Teilanlagen vorhanden sind. Meist werden die Stahlwerke aber mit sehr hoher Auslastung betrieben.

Ein Produktionsausfall ist dann i.d.R. nicht mehr nachholbar. Auch die Dauer von Betriebsunterbrechungen wird aus Gründen der Energieeffizienz der Hochtemperaturprozesse minimiert. Zusätzlich ist die Auftragsabwicklung im Stahlwerk auf differenzierte Produkte mit unterschiedlicher Qualität und Abmessung ausgerichtet. Eine Lagerhaltung wird vermieden, um individuelle Kundenanforderungen kurzfristig erfüllen zu können. Dies führt insgesamt zu Hemmnissen in der Bereitstellung von Flexibilität. Die Bereitstellung von elektrischer Energie ist im Elektrostahlwerk ein wichtiger Kostenfaktor, bei dem die Stromarbeitskosten und die Netzkosten gleichermaßen optimiert werden müssen. Viele Werke praktizieren bereits heute flexible, atypische Sonderformen der Netznutzung mit planbaren Anforderungskriterien. Eine zusätzliche Bereitstellung von beliebig abrufbarer flexibler Regelernergie erfordert eine Anpassung der Regelwerke für die Netznutzung.

### 10.4.2 GLASHERSTELLUNG (ELEKTRISCHE ZUSATZHEIZUNG IN DER BEHÄLTERGLASPRODUKTION)

Zur Beschreibung der Glasindustrie wurde die Behälterglasproduktion im ersten Schritt zur Charakterisierung der Flexibilität hinsichtlich des Einsatzes elektrischer Energie herangezogen. Ein wesentliches Kennzeichen der Glasherstellung ist es, dass der Herstellungsprozess kontinuierlich, ohne Unterbrechung der Energiezufuhr, über Jahre (je nach Glasart zwischen 5 und 18 Jahre) hinweg betrieben wird. Die in sich verzahnte Prozesskette der Glasherstellung bei den heute genutzten Technologien führt dazu, dass bei einer Einflussnahme auf einzelne bzw. Veränderung einzelner Prozessschritte, die Gefahr besteht, den Gesamtprozess und die Produktqualität negativ zu beeinflussen.

Das Schmelzaggregat wird bei der Mehrzahl der Anlagen mit Erdgas als dem wichtigsten Energieträger betrieben. Rund 75 % der Behälterglaswanen besitzen außerdem eine elektrische Zusatzheizung, die bei technologischem Bedarf (hohe Absorption von Wärmestrahlung durch die Schmelze; hoher Durchsatz) üblicherweise 5 bis 15 % des zum Schmelzen benötigten Energieeintrages übernehmen kann. Der Anteil der elektrischen Zusatzheizung kann in gewissem Maße variiert werden und wird von einigen Glasherstellern auch heute schon für Maßnahmen im Rahmen des Lastmanagements zur Verfügung gestellt. In den meisten Fällen besteht die Flexibilität nicht darin, die Leistung völlig herauszunehmen oder einfach zuzuschalten, sondern darin, die genutzte elektrische Energie (um bis zu 1/3) zu vermindern oder ggf. vom aktuellen Niveau auf die installierte Leistung zu erhöhen. Die Änderung der elektrischen Energiezufuhr muss zeitnah (innerhalb weniger Minuten) durch Anpassung der Energiemenge der fossilen Brennstoffe kompensiert werden, so dass der (Gesamt-) Energieeintrag in die Schmelze und damit die Temperaturen sowie die Viskosität der Schmelze konstant bleibt bzw. sich nur geringfügig ändern.

Im weiteren Projektverlauf soll die Herstellung von Flachglas mit dem Floatprozess als formgebenden Schritt ebenfalls untersucht und entsprechende Hemmnisse und Flexibilisierungspotentiale ermittelt werden.

Die Flexibilisierungsmöglichkeiten durch veränderte Auslegung der Schmelzaggregate hinsichtlich EZH-Anteil und die möglichen Grenzen der Hybridisierung der Schmelzanlage bis hin zur vollelektrischen Schmelze sind ebenfalls Gegenstand der nachfolgenden Arbeiten und Untersuchungen im weiteren Verlaufs des Projekts.

Das Satellitenprojekt „DisConMelt“ mit der Kopernikus-Fördernummer S3A bis D läßt bei erfolgreicher Umsetzung bei einem Zeithorizont von ca. 10 Jahren eine erhöhte Flexibilisierung auch für das Anforderungsprofil 2 in einigen Bereichen der Glasherstellung erkennen.

### 10.4.3 ZEMENTHERSTELLUNG (ROH- UND ZEMENTMAHLUNG)

Die Zementunternehmen in Deutschland sind durch die vorausschauende Planung von Stromeinsätzen (Stromfahrpläne) ein klassischer Anbieter von Flexibilität im Strommarkt. Hierbei werden Zementmühlen nach Möglichkeit vorwiegend im Niedertarif (NT) in der Nacht betrieben und Stillstandszeiten im Hochtarif (HT) am Tag angesiedelt (Demand Side Management). Weiterhin werden Lastspitzen durch genaue zeitliche Planung und Steuerung der Einsatzzeiten von Maschinen mit großer Last vermieden.

Die Zementherstellung weist mit ihrem größten elektrischen Energieeinsatz in der Materialzerkleinerung ein hohes technisches Potenzial für eine flexible Laststeuerung durch zeitliche Verschiebung der Produktion auf. Speicherkapazitäten in Silos vor und nach der Zementmahlung und Rohmahlung können in gewissem Umfang eine Entkopplung und Flexibilisierung dieser Teilprozesse erreichen. Besonders die Zementmahlung eignet sich hierfür. Voraussetzung ist die Möglichkeit zum Nachholen ausgefallener Produktion. Bei einem flexiblen Betrieb sind ausreichend lange zusammenhängende Produktionszeiträume von i.d.R. mehr als 4 Stunden erforderlich, um negative Auswirkungen auf die Produktqualität zu vermeiden. Eine sehr kurzzeitige Erhöhung der Last ist deshalb nicht möglich.

Der Zementabsatz und die Zementproduktion unterliegen einer starken Saisonalität. Das größte Flexibilitätspotenzial ergibt sich in der Nebensaison bei mäßiger Auslastung der Zementmahlanlagen. Bei starker Auslastung sind die technischen Potenziale zur Flexibilität i.d.R. nicht verfügbar oder stark eingeschränkt. Hintergrund sind die starke Produktnachfrage und Auslastung der Kapazität und fehlende Zeiten und Kapazitäten zum Nachholen ausgefallener Produktion. Eine langfristige Lastverschiebung für längere Stromknappheitsperioden könnte meist nur durch Anpassung der Produktions- oder Silokapazitäten ermöglicht werden. Die Kosten für eine Vergrößerung oder den Neubau scheinen aus heutiger Perspektive allerdings nicht rentabel. Ein nicht geplanter Personaleinsatz bzw. die zusätzliche Bereitschaft von Personal stellen eine besondere Herausforderung dar. Der personelle und arbeitsorganisatorische Mehraufwand für die Bereitschaft müsste durch die Vergütung für die zusätzliche Flexibilität wirtschaftlich kompensiert werden.

Die bisherigen Ergebnisse zur Einschätzung der Flexibilitätspotenziale werden im weiteren Projektverlauf in Zusammenarbeit mit einem Zementunternehmen anhand von Anlagendaten und Betriebsverläufen genauer

untersucht werden. Als Perspektive zur Flexibilisierung bietet eine separate Feinstmahlung ein großes Potenzial zur Nutzung von zeitlich begrenzten Stromüberschüssen in der Zementindustrie. Für die besonders energieintensive Herstellung der Feinstfraktion des Zements sind nur relative geringe Speichervolumina erforderlich. Weitere Untersuchungen am praktischen Beispiel sind nötig und die Demonstration der Technologie in einer Pilotanlage, um die tatsächlichen Flexibilitätsgewinne sowie die Auswirkungen auf den Prozess und die Produkte praxisrelevant bewerten zu können.

#### 10.4.4 HERSTELLUNG CHEMISCHER GRUNDSTOFFE (CHLOR-ALKALI ELEKTROLYSE)

Die Chlor-Alkali Elektrolyse ist der stromintensivste Prozess der chemischen Industrie. Von den drei gängigen Verfahren ist das Membran-Verfahren am besten zur Flexibilisierung geeignet. Den Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind je nach Verfahren technische und je nach Einbindung in die Standortstruktur und die Prozesskette strukturelle Grenzen gesetzt. Aufgrund der hohen durchschnittlichen Auslastung der Anlagen, steht fast ausschließlich die Lastreduktion ohne Ausgleich als Flexibilitätsmaßnahme zur Verfügung, die allerdings mit einem Produktionsverlust einhergeht. Die Kosten dieses Produktionsverlustes sind entlang der standortspezifischen Wertschöpfungskette zu bewerten. Die Möglichkeiten, Chlorspeicher als Puffer zu nutzen sind aufgrund ihrer originär sicherheitstechnischen Auslegung begrenzt. Eine Besonderheit ist die Polyvinylchlorid (PVC)-Produktion, die über Ethylendichlorid (EDC) als speicher- und handelbares Zwischenprodukt verläuft. Dabei können kürzere Lastreduktionen durch Speicher aufgefangen und eine leichte Erhöhung der Produktionsmenge aufgeholt werden, sowie längere Ausfallzeiten der PVC-Produktion durch Zukauf von EDC vermieden werden. Als Flexibilitätsperspektiven wurden der Aufbau von Überkapazitäten, der Einsatz von Batterien im Kontext eines virtuellen Kraftwerkes und die Nutzung von Sauerstoffverzehrkathoden untersucht. Diese Perspektiven ermöglichen das zusätzliche Anbieten von Lasterhöhungen. Die Wirtschaftlichkeit dieser Perspektiven, bzw. die sich daraus ableitenden Kosten für das Flexibilitätsangebot werden von den jeweiligen Investitionskosten dominiert. Um die Flexibilisierungspotenziale und -perspektiven ausschöpfen zu können, ist sicherzustellen, dass die beteiligten Unternehmen für die Bereitstellung von Flexibilität im Regulierungsrahmen dadurch keine Nachteile erleiden.

#### 10.4.5 HERSTELLUNG VON FEUERFEST-MATERIALIEN (ROHSTOFFSCHMELZANLAGE)

Die Unternehmen der deutschen Feuerfest-Industrie produzieren vielfältige keramische Feuerfestwerkstoffe, die in allen Bereichen der modernen Industriegesellschaft (Stahl, Zement, Chemie, Energie...) in Thermoprozessanlagen gebraucht werden. Zur Realisierung der energetisch günstigen Hochtemperaturprozesse in diesen Anlagen werden oftmals Schmelzrohstoffe zur Herstellung der keramischen Feuerfestwerkstoffe benötigt, die in Schmelzanlagen unter ausschließlicher Verwendung von elektrischer Energie hergestellt werden.

Als stromintensivster Prozess ist ein kontinuierlicher Batchprozess zur Herstellung von Schmelzkorund bei Temperaturen  $>2050\text{ °C}$  betrachtet worden. Er ist energetisch optimiert und ganzjährig voll ausgelastet und wird lediglich durch eine kurze jährliche Revision unterbrochen.

Den Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind vor allem technische Grenzen gesetzt, um den ablaufenden Hochtemperaturprozess nicht zu unterbrechen und das besondere Design des Schmelzaggregates nicht zu gefährden. Die beste Flexibilitätsmaßnahme stellt die kurzzeitige Lastreduktion mit einer Nachfragereduktion für 15 Minuten bzw. einem gänzlichen Ausschalten für 5 Minuten dar. Weitere Lastreduktionen sind nicht möglich, da sie zu einem nicht aufholbaren Produktionsausfall führen würden.

Eine Lastreduktion bis auf null mit entsprechendem Ausfall der Produktion kann auch nicht durch Zukauf des Produktes von anderen Herstellern ausgeglichen werden, da Rohstoffkörnungen nicht 1:1 austauschbar sind und Feuerfestprodukte sehr sensibel auf solche Veränderungen reagieren können.

Starke Lasterhöhungen, mit denen ein früherer oder späterer Produktionsausfall ausgeglichen oder in Produktspeicher produziert werden könnte, kommen wegen der Gefahr der thermischen Überlastung und Beschädigung der Schmelzanlage nicht in Frage.

Eine Standortstruktur mit ausreichenden Lagermöglichkeiten für die benötigten Ausgangsrohstoffe, die Zwischenprodukte und die Endprodukte bietet ein großes Flexibilitätspotenzial bei der Aufbereitung und Verarbeitung der Schmelzprodukte sowie effektive Abläufe in der Logistik des Schmelzbetriebes.

## 10.5 AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Der Vergleich der technischen Flexibilitätspotenziale zeigt, dass Lasterhöhungen generell nur in einzelnen Fällen durchgeführt werden können. Neben prozessspezifischen Restriktionen ist dies hauptsächlich auf die hohe Auslastung der Prozesse zurückzuführen. Elektrolichtbogenöfen und Chlor-Alkali-Elektrolysen sind durch hohe flexible Leistungen, dafür aber auch durch vergleichsweise kurze Abrufdauern gekennzeichnet. Eine Ausnahme bildet nur die PVC-Produktion, bei der durch Speicherung des EDC-Zwischenproduktes prinzipiell Abrufdauern über mehrere Tage möglich sind. Die Anschlussleistungen und damit auch die entsprechenden flexiblen Anteile von Anlagen der Roh- und Zementmahlung sind deutlich geringer. Dafür können hier jedoch sehr lange Abrufe von bis zu zwölf Stunden realisiert werden. Für Rohstoffschmelzanlagen und Glasschmelzwannen sind vergleichsweise niedrige flexible Leistungen und mittlere Abrufdauern charakteristisch. Eine Flexibilisierung durch Teillastbetrieb ist nur im Falle der Chlor-Alkali-Elektrolyse, der Glasschmelzwanne und der Rohstoffschmelzanlage möglich.

Um die vorhandenen Flexibilitätspotenziale der untersuchten Referenzprozesse markt- und netzdienlich einzusetzen, ist deren räumliche Position mit entscheidend. Generell verteilen sich die Standorte der untersuchten

Prozesse relativ gleichmäßig über ganz Deutschland, wobei eine deutliche Konzentration im Ruhrgebiet auffällt. Bei der Auswertung nach Branchen ist zusätzlich Folgendes zu erkennen. Während sich Standorte der Behälterglasherstellung, Elektrostahlerzeugung und Roh- und Zementmahlung weitestgehend gleichmäßig über ganz Deutschland verteilen, befinden sich Standorte der Chlor-Alkali-Elektrolyse vorrangig im Ruhrgebiet. Für die Standorte der Rohstoffschmelzanlage ist keine eindeutige Verteilung zu erkennen.

Für eine vereinfachende energiewirtschaftliche Bewertung werden die Standorte der untersuchten Prozesse zusätzlich in Beziehung zur Residuallast – der Differenz zwischen Last und volatiler Stromerzeugung aus Wind und PV – gesetzt. Im Westen Deutschlands, wo sich auch viele Standorte der untersuchten Prozesse befinden, ist die Last im Jahresverlauf deutlich höher als die erneuerbare Erzeugung. Besonders im Ruhrgebiet könnte die Situation demnach in Stunden mit extrem hoher positiver Residuallast durch entsprechende Abrufe von Lastreduktion entschärft werden. Allerdings gilt es zu vermeiden, dass durch den zeitlich versetzten Ausgleich der Produktion und einer damit einhergehenden Lasterhöhung kritische Situationen in anderen Stunden verschärft werden. Die Küstenregion ist aufgrund der Offshore-Windparks durch hohe Überschüsse Erneuerbarer gekennzeichnet. Da sich hier nur wenige Standorte der analysierten Prozesse befinden, ist ihr Beitrag zur Integration der Windenergie in dieser Region als gering anzusehen.

## 10.6 WAS HEISST DAS AKTUELL FÜR DIE GRUNDSTOFFINDUSTRIE

Die Analyse der ausgewählten Prozesse hat teilweise vorher noch nicht bekannte Flexibilitätpotenziale in den Prozessen identifiziert. Darüber hinaus wurden Erkenntnisse gesammelt, welche Flexibilitätperspektiven in Zukunft erschlossen werden und unter welchen Voraussetzungen ihre Umsetzung geschehen kann. Selbst die Potenziale, die bereits aktuell verfügbar sind, werden nicht in vollem Umfang ausgeschöpft, weil hierzu weder die Notwendigkeit noch die entsprechenden Anreize gegeben sind. Die zunehmende Umstellung der Stromerzeugung auf fluktuierende Quellen wie Wind und Fotovoltaik wird zunehmen und damit auch die Notwendigkeit für Flexibilitätsmaßnahmen. Zu welchem Zeitpunkt und in welchem Umfang dabei der Beitrag der Flexibilisierungsmaßnahmen der Industrie zum Zuge kommt, ist umstritten.

Aus Sicht der betroffenen Unternehmen bietet sich daher im Moment eine Bestandsanalyse ihrer Prozesse in Bezug auf mögliche Flexibilitätpotenziale an, da die standortspezifischen Gegebenheiten in einer übergreifenden Analyse nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Für mögliche zukünftige Flexibilitätperspektiven sind gegebenenfalls Investitionen und die Weiterentwicklung der Regularien notwendig, um diese anbieten zu können. Die Bestandsaufnahme sollte auch spezifisch die Hemmnisse und die Möglichkeiten, diese zu überwinden, innerhalb des Unternehmens erfassen.

## 10.7 HEMMNISSE FÜR DIE UMSETZUNG VON FLEXIBILITÄT

Das Anbieten von Flexibilitätsmaßnahmen ist aktuell keine zwingende Notwendigkeit für die Unternehmen der Grundstoffindustrie. Erste, gemischte Erfahrungen konnten durch die Teilnahme an Regelenergiemärkten gesammelt werden. Dabei stellt sich die Situation für jedes Unternehmen und jeden Betrieb sehr individuell dar. Im Folgenden werden daher die wesentlichen Aspekte erörtert, die nach Auskunft der Unternehmen für eine breitere Bereitstellung von Flexibilität zu beachten sind.

### 10.7.1 TECHNISCH

Die Verfahren der Grundstoffindustrie sind in der Regel auf den kontinuierlichen Betrieb an bestimmten Betriebspunkten ausgelegt und nicht auf einen fluktuierenden Betrieb. Die Prozesse selber können in der Regel in bestimmten Grenzen auf eine fluktuierende Versorgung elektrischer Energie reagieren. Durch die enge Einbindung in vor- und nachgelagerte Prozessketten gibt es nur in Ausnahmefällen die Möglichkeit, den Prozess isoliert zu betrachten, so dass die Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette berücksichtigt werden müssen. Vor- und nachgelagerte (Vor-) Produktspeicher können die für das Anbieten von Flexibilität nötige Entkopplung des betrachteten Prozesses von der Prozesskette ermöglichen. Ansonsten droht für den Fall einer Lastreduktion ohne Ausgleich ein Produktionsausfall. Das Potenzial für eine Lasterhöhung ist abhängig vom Prozess selbst und dessen Auslastung und wird ggfs. von der Produktionskapazität der Folgeprozesse limitiert.

### 10.7.2 REGULATORISCH

Die Energiewende strebt nicht nur einen Wandel in der technischen Struktur des Energiesystems an, sondern sie muss den Übergang zu den neuen Strukturen auch in dem regulatorischen Rahmen abbilden. Ausgehend von einer bedarfsorientierten Stromversorgung aus großen zentralen Kraftwerkseinheiten findet ein Wandel zu einer angebotsorientierten Stromversorgung auf Basis fluktuierender Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien statt. Wie auch im technischen Stromsystem, so spiegelt sich in der regulatorischen Struktur der Übergang wider. So existieren parallel Regularien, die von ihrer Logik her im alten System verankert sind neben jenen, die bereits an das neue Zielsystem angepasst sind. Daraus entstehen Zielkonflikte und sich widersprechende Anreize. In der Übergangszeit werden die wesentlichen Aspekte beider Systeme nebeneinanderstehen und unterschiedliche Relevanz haben. Die Regularien sollten soweit harmonisiert werden, dass Widersprüche in der Übergangszeit minimiert werden und für das Zielsystem Planungssicherheit hergestellt wird. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Regularien für das Energiesystem und insbesondere das Stromsystem sind aktuell sehr häufigen Änderungen unterworfen, was die Planungssicherheit der Unternehmen einschränkt.

### 10.7.3 WIRTSCHAFTLICH

Die oberste Priorität aus Sicht der Grundstoffindustrie ist eine gesicherte, spezifikationsgerechte und kostengünstige Versorgung der Kunden mit den entsprechenden Produkten. Dies setzt umgekehrt eine gesicherte und planbare Energieversorgung für die energie- und kapitalintensiven Prozesse voraus. Sie produzieren mit relativ geringer Wertschöpfung pro eingesetzter Energiemenge, so dass eine sehr hohe Auslastung, angestrebt wird, um die Prozesse wirtschaftlich betreiben zu können.

Die Teilnahme an Energiemanagementmaßnahmen und ein einhergehende Reduktion der Auslastung ist somit nur möglich wenn die Einhaltung von spezifikationsgerechten Lieferverpflichtungen sichergestellt ist.

Darüber hinaus stehen die Erlösmöglichkeiten durch Flexibilitätsangebote prinzipiell in Konkurrenz zu anderen Erlösoptionen, wie z.B. eine höhere Auslastung durch höhere Produktion ohne akute Lieferverpflichtungen, die dann z.B. die auf einem Spotmarkt angeboten werden könnte. Unter den gegenwärtigen Bedingungen sind die Erlöse durch Flexibilitätsangebote jedoch zu gering, um mit den konventionellen Optionen der Erlösmaximierung zu konkurrieren, sodass aktuell keine oder wenn nur geringe Mengen an kurzfristiger Flexibilität an den lukrativeren Regelenenergiemärkten angeboten werden.

Selbst in den stromintensiven Prozessen der Grundstoffindustrie betragen die Stromkosten nur einen (Bruch-)Teil der Produktionskosten. Durch die enge Verknüpfung in den Prozessketten, die Wertschöpfungsketten entsprechen, führt ein Produktionsverlust im Sinne von Verzicht auf Wertschöpfung durch Produktion auch zu deutlich höheren betriebs- und volkswirtschaftlichen Kosten, als es durch die Größenordnung der Stromkosten den Anschein hat. Hinzu kommen ggfs. Investitionen in Anlagen und Kommunikationstechnologie, um zusätzliche Flexibilität anbieten zu können. Diese Kosten müssen mindestens in Form der entsprechenden Vergütung (über)kompensiert werden.

Die Unternehmen wollen in der Regel keine externe Kontrolle der eigenen Prozesse zulassen. In geringem Umfang geschieht dies bereits aktuell bei den Betrieben, die an Regelenenergiemärkten teilnehmen. Die Entscheidung über den Umfang eines externen Zugangs muss auch weiterhin in der Verantwortung der Betriebe liegen.

Aufgrund des hohen Verknüpfungsgrades der Prozess- und Wertschöpfungsketten sowie den Verpflichtungen gegenüber den Kunden, muss die Entscheidung über eine bestimmte Anfrage zur Flexibilitätsbereitstellung beim betroffenen Unternehmen verbleiben. Um dennoch eine gesicherte Flexibilität anbieten zu können, bieten sich das Poolen von möglichen Flexibilitätsmaßnahmen z.B. bei Aggregatoren an. Damit ist zwar selten die komplette mögliche Flexibilität verfügbar, wohl aber eine gesicherte mittlere Flexibilität.

Das Geschäftsmodell zum Anbieten von Flexibilität muss aus Sicht der Unternehmen klar erkennbar sein. Es muss daher sichergestellt werden, dass die entstehenden Kosten in der Bereithaltung der Infrastruktur, aber auch in den Flexibilitätsabrufen überkompensiert werden, da die Unter-

nehmen zusätzlich noch unbekannte Risiken in Bezug auf die eventuelle Schädigung ihrer Anlagen und Anlagenkomponenten ihrer Prozesse im fluktuierenden Betrieb eingehen, mit der Folge eines erhöhten Wartungs-, Reparatur und ggfs. Investitionsaufwands.

Wenn die Flexibilitätsbereitstellung erhebliche zusätzliche Investitionen erfordert, werden diese nur durchgeführt, wenn eine eindeutige Erwartungshaltung bzgl. der Anzahl der Abrufe und der ihrer Kompensation absehbar sind.

#### 10.7.4 KULTURELL

Die Unternehmen der Grundstoffindustrie haben in der Vergangenheit erhebliche Anstrengungen im Bereich der Energieeffizienz und in der Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen unternommen. Dabei wurden die Prozesse in ihren Betriebspunkten optimiert und möglichst vollständig ausgelastet. Die Produktionsmitarbeiter sind stolz auf ihre Prozesse und ihre Fähigkeit, diese Prozesse und die Qualität der Produkte zu beherrschen. Sie werden auch Lösungen für die Herausforderung einer Flexibilisierung ihrer Prozesse professionell erarbeiten und umsetzen.

Nichtsdestotrotz verstehen sich die Unternehmen der Grundstoffindustrie als produzierende Unternehmen und nicht als Energiemanagementdienstleister. Diese „dies ist nicht mein Geschäftsmodell“ Haltung ist in den Unternehmen noch recht verbreitet und steht einem verstärkten Einsatz von Flexibilitätsmaßnahmen im Wege. Häufig sind es die kleineren Unternehmen, die betriebsintern flexibler reagieren können und sich auf die neuen Möglichkeiten einlassen, statt nur die Risiken zu betonen.

## 10.8 ZUKÜNFTIGE PERSPEKTIVEN

Diese bisherige Analyse hat die Flexibilitätspotenziale und -perspektiven in der Grundstoffindustrie auf Basis von ausgewählten Prozessen erfasst. Die Untersuchungen haben einige neue und weiterführende Fragestellungen zur praxisrelevanten Bestimmung der Flexibilitätspotenziale ergeben. Im Fokus stand dabei die Validierung der Methodik und erste Einschätzungen der Flexibilitätspotenziale und ihrer Voraussetzungen und Hemmnisse in Bezug auf die betriebliche Praxis.

Die Arbeiten werden daher fortgesetzt und der erfolgreiche Ansatz, branchenübergreifend die Potenziale und Perspektiven in den Prozessen der Grundstoffindustrie methodisch zu erfassen, fortgeführt. Die Erkenntnisse werden gemeinsam diskutiert und durch die Netzwerke der Forschungseinrichtungen der Branchenverbände mit den Unternehmen reflektiert, um eine möglichst konsistente und realistische Darstellung zu erreichen.

Die Methodik wird weiterentwickelt, um auch Wärme und Brennstoffe als Energieeintrag zu berücksichtigen. Dabei wird dem Wechselspiel zwischen Prozesswärme und Strom eine besondere Bedeutung zukommen und der Aspekt der Energiespeicherung, neben der Speicherung elektrischer Energie auch den Einsatz von Hochtemperatur-Wärmespeichern umfassen. Die Ausweitung der Methodik im wirtschaftswissenschaftlichen Bereich wird die Rolle der Aggregatoren in der Vermittlung von Flexibilität zwischen Netz und Unternehmen integrieren.

**IMPRESSUM****HERAUSGEBER**

Dr. Florian Ausfelder  
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e. V.  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Dr. Antje Seitz  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)  
Pfaffenwaldring 38–40  
70569 Stuttgart

Dr. Serafin von Roon  
Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München  
Am Blütenanger 71  
80995 München

**VERANTWORTLICH IM SINNE DES PRESSERECHTS**

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e. V.  
Dr. Florian Ausfelder  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

**GESTALTUNG/SATZ**

Technische Universität Darmstadt  
Sandra Antes, Andreas Bonin, Emily Broschk  
Institut für Produktionsmanagement,  
Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)  
Eugen-Kogon-Straße 4  
64287 Darmstadt

**GEFÖRDERT VOM**

Bundesministerium für Bildung und Forschung

**BETREUT VOM**

Projektträger Jülich

Erschienen im Februar 2018 in Frankfurt am Main

1. Auflage | ISBN: 978-3-89746-206-9

## BRANCHEN-ÜBERGREIFENDE ERGEBNISSE

1. **Die Einhaltung von Lieferverpflichtungen gegenüber den Kunden hat immer Priorität vor dem Anbieten von Flexibilität.**
2. Es gibt für die untersuchten Prozesse der Grundstoffindustrie eine **gegenläufige Wechselwirkung zwischen energetischer Effizienz und Flexibilität.**
3. **Änderungen der Prozessbedingungen führen zu Veränderungen der Produktqualität.**
4. **Die Wechselwirkungen zwischen häufigen, schnellen Laständerungen und deren Auswirkung auf die Anlagen und ihre kritischen Komponenten sind bisher nicht ausreichend untersucht.**
5. Die Möglichkeiten zur Flexibilisierung sind sehr stark von den **standortspezifischen Prozessketten und den Möglichkeiten zur Produktspeicherung innerhalb der Prozesskette** abhängig.
6. Die **Potenziale zur Lasterhöhung bei hoher Produktnachfrage sind sehr gering**, die **Potenziale für eine Lastreduktion sind in der Regel mit Produktionsausfall** verbunden.
7. Bei Lastverschiebung muss **sichergestellt werden, dass ausgefallene Produktion innerhalb kürzerer Zeit wieder nachgeholt werden kann.**
8. Der mögliche **Verlust der Berechtigung oder des Umfangs individueller Netzentgelte nach §19 Abs. 2 (StromNEV)** stellt eine erhebliche Hürde für das Anbieten von Flexibilität dar.
9. Die Unternehmen der Grundstoffindustrie bestehen auf einem **Primat der betrieblichen Erfordernisse** gegenüber dem externen Aufruf von Flexibilitätsoptionen.
10. Für **langfristig zu amortisierende Investitionen** wird eine **ausreichende Planungssicherheit** benötigt.
11. **Technische Limitierungen der Prozesse** sind in der Regel **nicht entscheidend für das Anbieten von Flexibilität.**

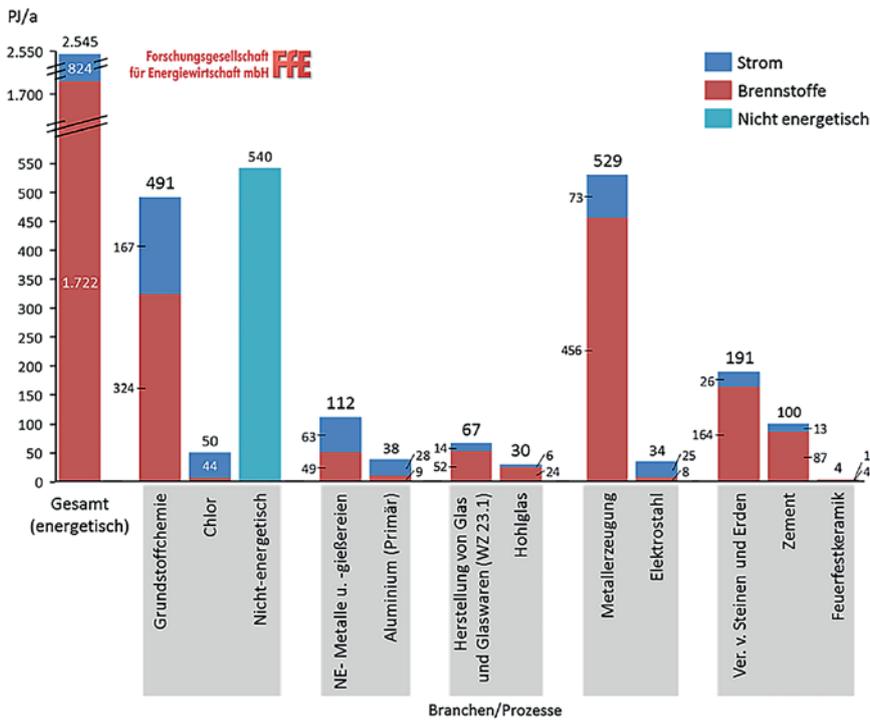


Abbildung 1: Energieeinsatz in der Grundstoffindustrie 2015 (AGEB, FhG ISI)

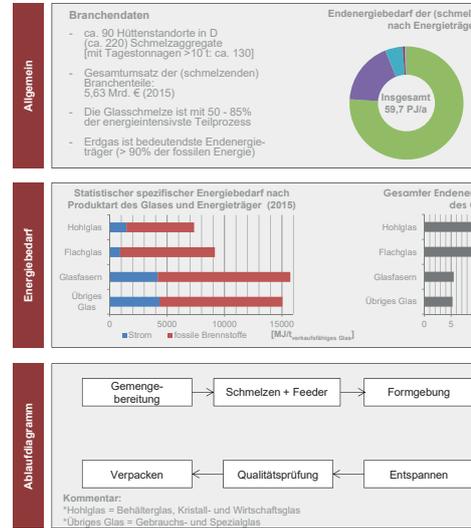


Abbildung 3.1: Branchensteckbrief Glasindustrie (Schmelzbetriebe) [2015]

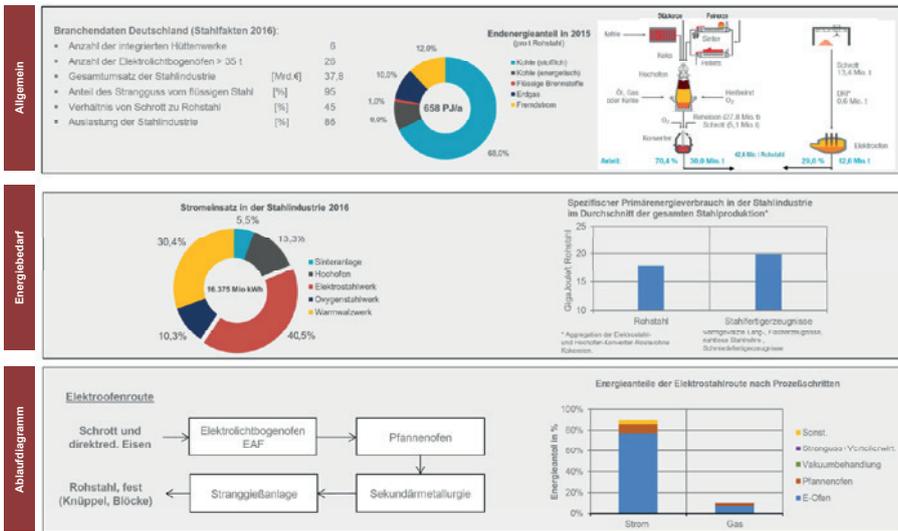


Abbildung 2.4: Branchensteckbrief Stahl

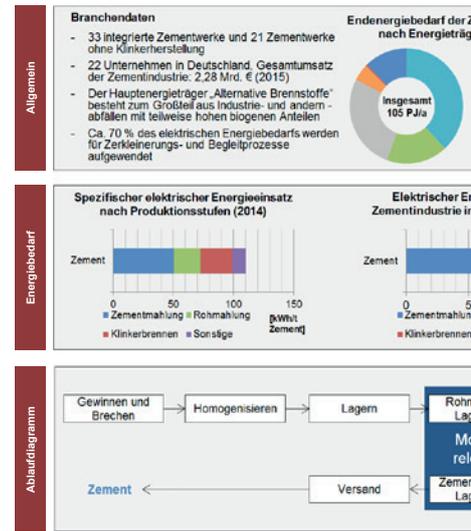
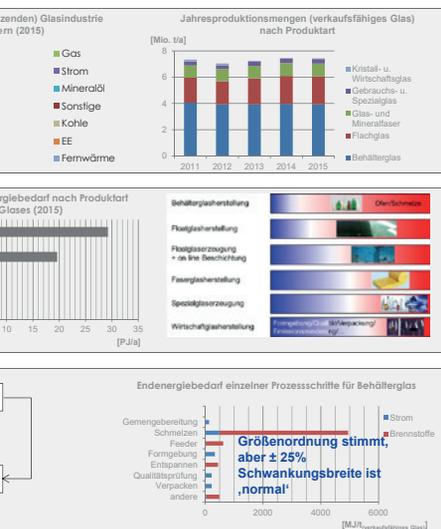
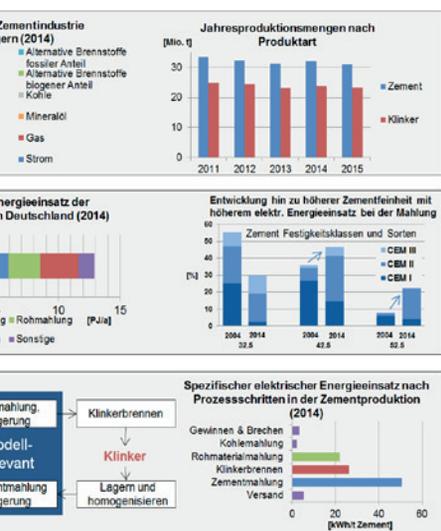


Abbildung 4.3: Branchensteckbrief zur Zementindustrie



Allgemein	<b>Branchendaten</b>	<b>Energieverbrauch der chemischen Industrie</b>	<b>Prozessbeschreibung</b>								
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Größter Stromverbraucher der chem. Industrie</li> <li>1308 GW (ohne Nebenaggregate), =11 TWh/a Strombedarf (ca. 2% des dt. Stromverbrauchs)</li> <li>Jährliche Produktionsmenge: 4 Mio. t Cl<sub>2</sub></li> <li>21 Anlagen an 17 Standorten</li> <li>Kontinuierlicher Prozess, Auslastung ≥95%</li> <li>Anorganische Grundchemikalie mit standort-spezifischer Einbindung in Folgeprozesse</li> </ul>		<p><b>Allgemeine Reaktionsgleichung:</b></p> $2 \text{ NaCl} + 2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2 \text{ NaOH}$ <p>Verfahren (% der installierten Kapazität):</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Membran-Verfahren (70%)</li> <li>Diaphragma-Verfahren (23%)</li> <li>Amalgam-Verfahren (8%)</li> </ol>								
Auslastung und Effizienz		<b>Das Wichtigste in Kürze</b>	<b>Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität</b>								
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mögliche Flexibilität hängt von Auslastung ab</li> <li>Laständerungen ändern die Produktmenge</li> <li>Muss zeitnah kompensiert werden, um Folgeprozesse zu versorgen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Die CAE ist ein kontinuierlicher Prozess, verknüpft mit Folgeprozessen im Verbundstandort</li> <li>Flexibilitätsoptionen standortspezifisch</li> <li>Über- oder Unterproduktion muss sehr zeitnah kompensiert werden</li> <li>Begrenzung der Flexibilitätsoptionen durch Bedingungen des §19.2 StromNEV</li> <li>PVC Produktion verläuft über EDC als speicherbares Zwischenprodukt → eröffnet Flexibilitätsperspektiven</li> </ul>	<p>Spezifische Effizienz der Elektrolyse nimmt mit abnehmender Stromstärke zu</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>bei geringerer Leistung ist Elektrolyse spezifischer effizienter</li> <li>Nachholung der Produktion erfordert mehr Strom für die gleiche Menge Chlor</li> <li>Lasteniedrigung schneller möglich als -erhöhung</li> </ul>								
Flexibilitätspotenziale und -perspektiven	<b>Schematische Darstellung der VCM-Produktion auf Basis des Vinnolit-Prozesses</b>	<b>Flexibilitätspotenziale und -perspektiven</b>	<b>Teillastpotenzial</b>								
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Teillastbetrieb</li> <li>Nutzung von Ethylendichlorid (EDC) als speicherbares Zwischenprodukt für Polyvinylchlorid (PVC) Standorte</li> <li>Schaltbare Sauerstoffverzehrkathoden (SVK) erlauben kontinuierliche Chlorproduktion unter Variation der Wasserstoffproduktion → bis zu 20% Lastreduktion, abhängig vom Wasserstoffbedarf des Standortes</li> </ul>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Technisches Potenzial</th> <th>Negativ</th> <th>Positiv</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Typische Anlagen-größe in MW</td> <td>30 – 150</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Potenzial in MW oder %</td> <td>-10-50% bedingt Nachholung der Produktion</td> <td>±5%, abhängig von Auslastung</td> </tr> </tbody> </table>	Technisches Potenzial	Negativ	Positiv	Typische Anlagen-größe in MW	30 – 150		Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion
Technisches Potenzial	Negativ	Positiv									
Typische Anlagen-größe in MW	30 – 150										
Potenzial in MW oder %	-10-50% bedingt Nachholung der Produktion	±5%, abhängig von Auslastung									

Abbildung 5.2: Branchensteckbrief Chemische Industrie Chlor-Alkali Elektrolyse



Allgemein	<b>Branchendaten</b>	<b>Jahresproduktionsmengen nach Produktart</b>	<b>Endverbraucher feuerfester Erzeugnisse</b>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>61 Betriebe und assoziierte Unternehmen</li> <li>Gesamtumsatz der Keramikindustrie: 5,3 Mrd. € (2015), davon 1,5 Mrd. € für feuerfeste keramische Werkstoffe</li> <li>Keramikprodukte und Rohstoffe decken das gesamte Spektrum der spezifischen Energieverbräuche zur Produktion ab</li> <li>Die energieintensivsten Prozessschritte in der Feuerfest-Keramikindustrie sind die Sinterbrände</li> </ul>		
Energiebedarf	<b>Statistischer spezifischer Energiebedarf nach Keramik-Produkten (2014)</b>	<b>Gesamter Endenergiebedarf nach Keramik-Produkten (2014)</b>	<b>Energieträger zur Feuerfest-Produktion</b>
			<p>Gas 82,5%, Öl 1,9%, Strom 15,6%</p>
Ablaufdiagramm	<b>Produktionsprozess</b>	<b>Ablaufdiagramm</b>	
	<p><b>Rohstoff-Schmelzprozess</b></p> <pre> Naturliche Rohstoffe / Synthetische Rohstoffe → Masseaufbereitung für Produkte → Formgebung → Trocknen → Sinterbrand → Nachbearbeitung → Verpacken → Versenden           </pre> <p><b>Rohstoffgewinnung, -transport, -lagerung</b></p> <pre> Rohstoffgewinnung, -transport, -lagerung → Aufbereitung / Mischen → Schmelzprozess → Brechen / Mahlen / Klassieren → Verpacken → Versenden           </pre>		

Abbildung 6.2: Branchensteckbrief für die Feuerfest-Industrie

## ÜBER DIESES BUCH

Die energieintensiven Prozesse der Grundstoffindustrie stellen einen Großteil des industriellen Strombedarfs in Deutschland. Der zunehmende Beitrag fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung im Stromsystem führt absehbar zu einem erhöhten Bedarf an flexibler Leistung. Dies erfordert ein fundamentales Umdenken in der Art und Weise, wie Strom in den Prozessen der energieintensiven Grundstoffindustrie genutzt wird. Ausgehend von einer branchenübergreifenden Methodik werden jeweils in ausgewählten Prozessen aus der Eisen- und Stahl-, Glas-, Zement-, Chemie- und Feuerfestindustrie aktuelle und zukünftige Flexibilisierungsoptionen umfassend untersucht und durch die Branchennetzwerke validierte technische Flexibilisierungspotenziale ausgewiesen. Neben den prozessspezifischen technischen Limitierungen werden auch übergeordnete Aspekte, wie regulatorische und betriebswirtschaftliche Hemmnisse analysiert. Dabei werden nicht nur die Erkenntnisse der einzelnen Branchen zusammengefasst, sondern branchenübergreifend die Herausforderung und Rahmenbedingungen herausgearbeitet. Dieser Bericht gibt damit einen fundierten Überblick über die Möglichkeiten und Limitierungen, die sich für eine Flexibilisierung der Prozesse der Grundstoffindustrie ergeben.



**DR. FLORIAN AUSFELDER**

ist seit 2017 Teamleiter und Themensprecher für den Bereich „Energie und Klima“ in der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Er hat Chemie in Karlsruhe studiert und in Edinburgh in Physikalischer Chemie promoviert. Nach Post-Doc-Aufenthalten in den USA und Spanien trat Dr. Ausfelder 2007 als wissenschaftlicher Mitarbeiter in die DECHEMA ein, wo er verschiedene Gremien und Forschungsprojekte im Energiebereich betreut.



**DR. ANTJE SEITZ**

leitet seit 2011 die Abteilung Thermische Prozesstechnik am Institut für Technische Thermodynamik des DLR. Sie hat Verfahrenstechnik an der Universität Stuttgart studiert und dort auch promoviert. Frau Dr. Seitz verantwortet am DLR und in der Helmholtz Gemeinschaft die Entwicklung thermischer Energiespeicher und deren Integration in industrielle und Kraftwerksprozesse. In nationalen und internationalen Netzwerken fördert sie den Austausch zwischen Industrie und Forschung, um innovative thermische Energiespeichersysteme für die Transformation des Energiesystems nutzbar zu machen.



**DR. SERAFIN VON ROON**

ist seit 2011 Geschäftsführer der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. Er hat Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin studiert und an der TU München promoviert. Von 2003 bis 2011 verantwortete er an der FfE e.V. die Themen System- und Marktanalysen. Seine Forschungsschwerpunkte sind industrielle Energiewirtschaft sowie Systemintegration von erneuerbaren Energien. Seit 2016 hat er einen Lehrauftrag an der TU München.



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

BETREUT VOM

