Energieflexibilität in der Glasindustrie

Abschlussbericht

Energieflexibilität in der Glasindustrie

Abschlussbericht

Impressum

Herausgeber

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

Abschlussbericht zum Projekt:
Energieflexibilität in der Glasindustrie.

Veröffentlichung:
September 2025

Projektleitung
Hannes Kracht
Frank Veitengruber

Bearbeiter:innen & Qualitätsmanagement:
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski
Fabian Kaindl

Geschäftsleitung
Dr.-Ing. Serafin von Roon
Dr.-Ing. Anna Gruber
Dr.-Ing. Andrej Guminski

Projektpartner
Bundesverband Glasindustrie e. V.

Bitte zitieren als
FfE (2025): Energieflexibilität in der Glasindustrie. Abschlussbericht im Auftrag des Bundesverband Glasindustrie e.V.

Für die inhaltliche Unterstützung und Expertise aus der Praxis bedanken wir uns bei

- Ardagh Group S.A.
- Fives Group
- HEINZ-GLAS GmbH & Co. KGaA
- HORN Glass Industries AG
- SCHOTT AG
- Wiegand-Glas Holding GmbH

... sowie allen weiteren beteiligten, nicht explizit genannten Unternehmen.

Versionsnummer Vorlage: TL20230613

Vorwort

Dekarbonisierung der Glasindustrie: Verlässliche Rahmenbedingungen unter Berücksichtigung technologischer Grenzen für eine erfolgreiche Transformation.

Die deutsche Glasindustrie steht vor der zentralen Herausforderung, ihre Produktion bis 2045 klimaneutral zu gestalten. Die Unternehmen investieren kontinuierlich in neue Technologien, prüfen alternative Energieträger und arbeiten daran, CO_2-Emissionen so weit wie möglich zu vermeiden.

Gleichzeitig müssen wir anerkennen, dass die Handlungsmöglichkeiten durch die physikalischen und prozesstechnischen Rahmenbedingungen der Glasherstellung begrenzt sind. Der zentrale Schmelzprozess ist kontinuierlich, hochtemperaturabhängig und äußerst sensibel gegenüber Schwankungen. Technisch bedingte Einschränkungen führen dazu, dass kurzfristige Lastverschiebungen oder flexible Stromnutzung in der Regel nicht möglich sind, ohne die Produktqualität oder die Lebensdauer der Anlagen zu gefährden.

Diese Studie zur *Energieflexibilität in der Glasindustrie* macht deutlich: Die Branche strebt nach Dekarbonisierung – doch sie braucht dafür verlässliche politische Rahmenbedingungen, die ihre technologischen Realitäten anerkennen. Pauschale Anforderungen an industrielle Flexibilität oder der ersatzlose Wegfall der bisherigen Netzentgeltprivilegien könnten kontraproduktiv wirken, weil sie die ökologisch sinnvolleren Optionen wie Elektrifizierung unwirtschaftlich machen.

Wir hoffen, dass die vorliegende Untersuchung zu einem differenzierteren Verständnis beiträgt – und dazu, dass die Transformation der Glasindustrie weiterhin machbar und zukunftssicher bleibt

Christiane Nelles
Hauptgeschäftsführerin BV Glas

September 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung **6**

Executive Summary **8**

1 Anlass der Studie und regulatorischer Rahmen **10**

1.1 Zielstellung und Methodik der Studie 10

1.2 Regulatorischer Rahmen 10

1.3 Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur 11

2 Grundlagen industrieller Energieflexibilität **13**

3 Status quo der Glasindustrie **14**

4 Transformationspfade der Glasindustrie **17**

5 Kernerkenntnisse der Interviews **19**

5.1 Perspektive der Glaswannenhersteller 19

5.1.1 Glaswannen im Status quo 19

5.1.2 Entwicklung der Glaswannentechnologie 20

5.1.3 Gemeinsamkeiten und Fazit der Glaswannenhersteller 22

5.2 Perspektive der Glasproduzenten 24

5.2.1 Flachglasherstellung 24

5.2.2 Behälterglasproduktion 24

5.2.3 Spezialglasproduktion 25

5.2.4 Nebenprozesse und Speicher 26

5.2.5 Gemeinsamkeiten und Fazit der Glasproduzenten 26

6 Diskussion und Ausblick **28**

7 Literaturverzeichnis **30**

Kurzzusammenfassung

Anlass der Studie ist das geplante Auslaufen der sogenannten „Bandlastregelung“ zum 01. Januar 2026, welche eine Netzentgeltreduktion für stromintensive Verbraucher darstellt. Für Letztverbraucher gilt eine Übergangsfrist bis zum 31. Dezember 2028. Die „Bandlastregelung“ reizt eine möglichst konstante Stromabnahme durch die Verbraucher an. Bei einem Jahresstromverbrauch von über 10 GWh und gleichzeitig über 7.000 Volllaststunden (VLS) werden dabei bis zu 80 % Rabatt auf die Netzentgelte angerechnet. Eine geplante Überarbeitung der Netzentgeltprivilegien unter anderem zur Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung in das Energiesystem soll hingegen Energieflexibilitätspotenziale aktivieren und eine flexible, netzdienliche Stromabnahme incentivieren.

Zur Beantwortung, ob und in welchem Umfang die Glasindustrie solche Energieflexibilitätspotenziale bereitstellen kann, untersucht diese Studie die Prozesse der Glasherstellung im Status quo und gibt einen Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen unter Berücksichtigung möglicher Transformationspfade. Dazu wurden Interviews und Vor-Ort-Begehungen mit Glaswannenherstellern und Glasproduzenten durchgeführt.

Die Glasproduktion ist durch kontinuierliche, energieintensive und temperatursensitive Prozesse geprägt. Das thermische Gleichgewicht der Glasschmelze ist essenziel für die Produktqualität. Anpassungen der Prozessparameter führen in der Regel zu Ausschussproduktion, was Energieflexibilitätspotenziale stark einschränkt. Die absehbare Dekarbonisierung der Branche erfolgt primär durch Elektrifizierung mittels vollelektrischer oder hybrider Schmelzwannen. Diese erhöhen den Strombedarf erheblich, ohne jedoch neue relevante Flexibilitätspotenziale zu schaffen. Hybride Wannen bieten theoretisch Spielraum zur Variation des Strom-Gas-Verhältnisses, doch sind diese Anpassungen technisch komplex, zeitaufwendig und lediglich langfristig umsetzbar, sowie mit Risiken für Effizienz und Lebensdauer verbunden. Sie stellen damit keine Möglichkeit zur Reaktion auf kurzfristig fluktuierende erneuerbare Energieerzeugung dar. Energiespeicher wie Batteriesysteme könnten außerhalb des Kernprozesses Flexibilität ermöglichen, sind jedoch wirtschaftlich und infrastrukturell herausfordernd.

Regulatorische Anreize zur Aktivierung von Energieflexibilitätspotenzialen können nur dann wirksam sein, wenn sie die technischen Grenzen der Glasproduktion berücksichtigen. Eine kontinuierliche, effiziente, qualitativ hochwertige und wirtschaftlich darstellbare Produktion bleibt oberste Priorität. Die individuellen standort- und produktspezifischen Anforderungen der Produzenten sind in der Ausgestaltung von Netzentgeltsystematiken zu berücksichtigen.

Kernergebnisse der Studie

1

Vielfalt der Glasherstellung
Jeder Standort sowie jedes Produkt der Glasindustrie hat eigene, höchst individuelle Anforderungen und Voraussetzungen, um entsprechende Produktqualitäten zu erreichen. Insbesondere zwischen den einzelnen Teilbereichen Flachglas, Hohl-/Behälterglas und Spezialglas muss zwingend unterschieden werden.

2

Technisch bedingt: Geringe Energieflexibilitätspotenziale im Herstellungsprozess
Alle Glasproduktionsprozesse müssen kontinuierlich ablaufen, um das eingestellte thermische Gleichgewicht im Prozess und damit die gewünschte Produktqualität zu erhalten. Änderungen am Prozess haben direkten Einfluss auf die Produktqualität und führen in der Regel zu Ausschussproduktion. Durch die thermische Trägheit im Prozess sowie die zum Teil hohen Verweilzeiten in der Schmelze dauert es mehrere Tage bis Wochen, um Betriebspunkte einzustellen und ein nutzbares, den Qualitätsanforderungen entsprechendes Produkt zu erhalten.

3

Dekarbonisierung: Steigender Strombezug, gleichbleibend geringe Energieflexibilitätspotenziale
Die Dekarbonisierung der Glasindustrie basiert vor allem auf einer verstärkten Elektrifizierung, entweder durch vollelektrische oder hybride Schmelzwannen. Beide Technologien erhöhen den Strombezug der Produktionsstandorte signifikant. Weiterhin müssen die Prozesse jedoch kontinuierlich betrieben werden, um die Produktqualität aufrechtzuerhalten und die Anlage nicht zu schädigen. Dabei ist keine nennenswerte Energieflexibilität in der Leistungszufuhr vorhanden. Ein Wegfall der Bandlastprivilegierung verteuert den Strombezug erheblich und führt insbesondere bei hybriden Schmelzwannen dazu, dass der fossile Erdgaseinsatz die wirtschaftlichere Option ist. Das Ziel der Dekarbonisierung sollte durch entsprechende Anreize, auch in der Netzentgeltsystematik, priorisiert und unterstützt werden.

4

Flexibilität vs. Effizienz, Lebensdauer und wirtschaftliche Auslastung
Anpassungen der Betriebspunkte der Schmelzwanne nehmen in der Regel Stunden bis Tage, zum Teil bis Wochen, ein. Jede Anpassung ist mit Produktausschuss verbunden und verringert die Lebensdauer der Schmelzwannen und ggf. der Transformatoren. Um eine Schmelzwanne wirtschaftlich zu betreiben, muss diese bei möglichst langer Lebensdauer kontinuierlich unter Volllast ausgelastet sein. Jede Anpassung des Betriebspunktes verringert außerdem die Energieeffizienz der Schmelzwanne. Insbesondere hybride Schmelzwannen werden sowohl mit ihrer Wannengröße für die geplante Anzahl an Elektroden als auch in der Größe des Oberofens für die dazugehörige Gasflamme entsprechend eines optimalen Betriebspunktes auf maximale Effizienz ausgelegt und dimensioniert.

5

Kosten und wirtschaftliche Risiken im Stromeinkauf
Die durch den Wegfall der Bandlastprivilegien entstehenden Kosten sind nicht durch alternative Erlösmöglichkeiten, beispielsweise durch eine denkbare Vermarktung am Regelenergiemarkt, kompensierbar. Dazu ist das technisch mögliche Energieflexibilitätspotenzial zur Bereitstellung entsprechender Leistung zu gering. Hinzu kommt, dass die Baseload-Versorgung häufig je nach Risikobereitschaft der Glasproduzenten über langfristigen Stromeinkauf bereits mehrere Jahre im Voraus abgesichert wird, um sich gegen Preisrisiken abzusichern, und nur ein kleiner Teil über den Spotmarkt kurzfristig beschafft wird. Um auf Preissignale reagieren zu können, müsste der Stromeinkauf stärker am Spotmarkt ausgerichtet sein, was zu einem größeren Risiko der Abhängigkeit von kurzfristigen Preisschwankungen führt. Da die Prozesse kontinuierlich betrieben werden müssen und keine relevanten Energieflexibilitätspotenziale aufweisen, müsste dann auch bei kurzfristig hohen Preisen Strom bezogen werden.

Executive Summary

The reason for the study is the planned expiry of the so-called 'band load regulation' on 1 January 2026, which represents a reduction in grid fees for electricity-intensive end consumers. A transition period until 31 December 2028 applies to end consumers. The 'band load regulation' encourages end consumers to consume electricity as consistently as possible. With an annual electricity consumption of over 10 GWh and at the same time over 7,000 full-load hours (FLH), a discount of up to 80 % on grid fees is applied. A planned revision of grid fee privileges, among other things to integrate fluctuating renewable electricity generation into the energy system, is intended to activate energy flexibility potential and incentivize flexible, grid-friendly electricity consumption.

To answer the question of whether and to what extent the glass industry can provide such energy flexibility potential, this study examines the processes of glass production in the status quo and provides an outlook on future developments, taking into account possible transformation paths. To this end, interviews and on-site visits with container glass manufacturers and glass producers are being conducted.

Glass production is characterized by continuous, energy-intensive and temperature-sensitive processes. The thermal equilibrium of the glass melts is essential for product quality. Adjustments to the process parameters usually lead to production rejects, which severely limits the energy flexibility potential. The foreseeable decarbonization of the industry will primarily take place through electrification using fully electric or hybrid melting tanks. These significantly increase electricity demand without creating any new relevant flexibility potential. Hybrid furnaces theoretically offer scope for varying the electricity-gas ratio, but these adjustments are technically complex, time-consuming and only feasible in the long term, as well as associated with risks to efficiency and service life. Energy storage systems such as battery systems could enable flexibility outside the core process, but they are challenging in terms of economics and infrastructure.

Regulatory incentives to activate an energy flexibility potential can only be effective if they take into account the technical limitations of glass production. Continuous, efficient, high-quality and economically viable production remains the top priority. The individual location- and product-specific requirements of manufacturers must be taken into account in the design of network fee systems.

Key Findings of the Study

1

Diversity in glass manufacturing
Each location and each product in the glass industry has its own highly individual requirements and conditions for achieving the desired product quality. It is particularly important to distinguish between the individual sub-sectors of flat glass, hollow/container glass and speciality glass.

2

Technical reasons: Low energy flexibility potential in the manufacturing process
All glass production processes must run continuously in order to maintain the set thermal equilibrium in the process and thus the desired product quality. Changes to the process have a direct impact on product quality and usually lead to production rejects. Due to the thermal inertia in the process and the sometimes long dwell times in the melt, it takes several days to weeks to adjust operating points and obtain a usable product that meets quality requirements.

3

Decarbonization: Rising electricity consumption, consistently low energy flexibility potential
The decarbonization of the glass industry is based primarily on increased electrification, either through fully electric or hybrid melting tanks. Both technologies significantly increase the electricity consumption of production sites. However, the processes must continue to be operated continuously and without significant energy flexibility potential in order to maintain product quality. The elimination of band load privileges makes electricity procurement considerably more expensive and, especially in the case of hybrid melting tanks, means that the use of fossil natural gas is the more economical option. The goal of decarbonization should be prioritized and supported by appropriate incentives, including in the grid fee system.

4

Flexibility vs. efficiency, service life and economic utilization
Adjustments to the operating points of the melting tank usually take hours to days, and in some cases weeks. Each adjustment is associated with product waste and reduces the service life of the melting tanks and, in some cases, the transformers. In order to operate a melting tank economically, it must be continuously utilized under full load for as long as possible. Any adjustment of the operating point also reduces the energy efficiency of the melting tank. Hybrid melting tanks in particular are designed for maximum efficiency, both in terms of their tank size for the planned number of electrodes and in terms of the size of the top furnace for the associated gas flame, in accordance with an optimum operating point.

5

Costs and economic risks in electricity procurement
The costs incurred by the elimination of baseload privileges cannot be offset by alternative revenue opportunities, such as conceivable marketing on the control energy market. The technically feasible energy flexibility potential for providing the corresponding power is too low for this. In addition, baseload supply is often secured several years in advance through long-term electricity purchases, depending on the risk appetite of glass producers, in order to hedge against price risks, with only a small portion being procured at short notice via the spot market. In order to be able to react to price signals, electricity procurement would have to be more strongly oriented towards the spot market, which would lead to a greater risk of dependence on short-term price fluctuations. Since the processes must be operated continuously and do not offer any relevant energy flexibility potential, electricity would then also have to be purchased even if prices were high in the short term.

1 Anlass der Studie und regulatorischer Rahmen

Energieflexibilität im Stromsystem nimmt durch zunehmend fluktuierende Erzeugung der Erneuerbaren Energien eine immer wichtigere Rolle ein. Regulatorische Anreize sollen daher industrielle Energieflexibilitätspotenziale erschließen, müssen dabei aber auch prozessspezifische technische Rahmenbedingungen berücksichtigen.

Als energieintensiver Wirtschaftszweig profitiert die Glasindustrie derzeit von Netzentgeltprivilegien, die einen besonders gleichmäßigen Strombezug anreizen. Gleichzeitig beruht die Glasherstellung auf einem kontinuierlichen Produktionsprozess ohne offensichtliche Energieflexibilitätspotenziale. Um die technischen Voraussetzungen der Glasindustrie in einer Neuregelung der Netzentgeltprivilegien zu berücksichtigen, gibt diese Kurzstudie eine technisch fundierte und sachliche Einschätzung über die aktuellen und zukünftigen Energieflexibilitätspotenziale in der Glasindustrie. Dabei beachtet sie die vielfältigen Aspekte, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen einzelnen Standorten und den Produktzweigen Flachglas, Hohl-/ Behälterglas und Spezialglas.

1.1 Zielstellung und Methodik der Studie

Ziel der Kurzstudie ist es, eine umfassende Einschätzung der aktuellen Energieflexibilitätspotenziale im Status quo, sowie einen Ausblick auf das Zieljahr der deutschen Klimaneutralität 2045 unter Berücksichtigung entsprechender Transformationsoptionen zu geben.

Dabei wird zunächst auf statistische Quellen, Branchen- und Verbandseinschätzungen [1] sowie wissenschaftliche Studien wie [2], [3] oder [4] zurückgegriffen.

Zum anderen werden die Erfahrungen und Expertisen aus der Praxis einbezogen. Dazu werden im Rahmen der Studie fünf verschiedene **Glasproduzenten** aus den Bereichen Flach-, Behälter- und Spezialglas interviewt und die Prozesse teilweise vor Ort besichtigt.

Die **Glasschmelzwanne** ist das Kernstück der Glasherstellung und aus energetischer Sicht der relevanteste Prozessschritt. Daher werden ebenfalls die drei relevanten deutschen Glaswannenhersteller interviewt.

Dieser **Abschlussbericht** enthält zunächst einen Überblick über den regulatorischen Rahmen in Bezug auf Energieflexibilität, den Status quo des Energieverbrauches und die derzeit möglichen Lastflexibilitäten in der Glasindustrie. Die Erkenntnisse aus den Praxisinterviews bilden den Hauptteil der inhaltlichen Betrachtungen. Abschließend folgt ein Ausblick auf das Jahr 2045 und die Auswirkung möglicher Transformationspfade auf Energieflexibilitätspotenziale.

1.2 Regulatorischer Rahmen

Derzeit zahlen Stromkunden Netzentgelte als Preis für die Nutzung der Stromnetze sowie die Bereitstellung einer vertraglich vereinbarten Anschlussleistung durch die Netzbetreiber. Diese Entgelte sind zunächst entfernungsunabhängig und bestehen für die Industrie in der Regel aus einem Arbeitspreis (ct pro kWh) und einem Leistungspreis (ct pro maximal entnommenem kW).

Ausnahmen werden in sogenannten **Sondernetzentgelten** geregelt, welche gewährt werden können, um entweder besonderen Umständen Rechnung zu tragen oder ein bestimmtes Verhalten der Verbraucher anzureizen. Die Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) [12] enthält für Industrie und Gewerbe derzeit zwei Sondernetzentgelte (§ 19 Abs. 2 StromNEV), die gegenläufige Anreize zur Netznutzung setzen: Die sogenannte **Bandlast** und die **Atypik.** Im Jahr 2024 führten diese Sondernetzentgelte zu Entlastungen von > 1 Mrd. € für die Gesamtheit der betroffenen Unternehmen in Deutschland [13]. Diese Entlastungen werden als zusätzliche Kosten auf die weiteren Netznutzer umgelegt.

Bandlast (Stromintensive Netznutzung)
Bei einer konstanten Stromabnahme durch stromintensive Letztverbraucher erhalten diese eine Netzentgeltreduzierung. Diese Regelung kommt bei einem Jahresstromverbrauch von über 10 GWh und gleichzeitig über 7.000 Volllaststunden (VLS) zum Tragen. Die Volllaststunden berechnen sich dabei aus dem Verhältnis des jährlichen Strombezugs zur Spitzenlast.

Bei mindestens 7.000 VLS werden bis zu 80 % Rabatt auf die Netzentgelte angerechnet. Die Regelung wird daher häufig auch als „7.000 h-Regelung" bezeichnet. Weitere Ermäßigungen treten bei 7.500 VLS (bis zu 85 % Rabatt) und 8.000 VLS (bis zu 90 % Rabatt) auf. Das Ziel dieser Regelung ist der Anreiz einer konstant gleichbleibenden Grundlast stromintensiver Letztverbraucher und damit im bisherigen Energiesystem eine Sicherung der Netzstabilität. Durch eine kontinuierliche Abnahme wird die Einspeisung der Grundlastkraftwerke abgenommen und der Netzbetreiber erhält Planungssicherheit der zu erwartenden Abnahmen.

Atypik (Atypische Netznutzung)
Die Atypik setzt einen Energieflexibilitätsanreiz. Ziel ist eine Begrenzung der notwendigen Netzdimensionierung und damit der Netzkosten. Ausschlaggebend für die Netzauslegung ist die zeitgleiche Jahreshöchstlast aller angeschlossenen Verbraucher. Die Atypik-Regelung enthält damit Netzentgeltreduzierungen für Letztverbraucher, wenn sie ihre individuelle Jahreshöchstlast erheblich außerhalb eines oder mehrerer typischer Zeitfenster je Jahreszeit verschieben, zu dem die zeitgleiche Jahreshöchstlast aller Entnahmen aus dem Netz stattfindet. Diese Hochlastzeitfenster sind separat durch jeden Netzbetreiber sowie jede Netz- bzw. Umspannungsebene zu ermitteln. Die Netzentgelte können für den Letztverbraucher damit bis zu 80 % reduziert werden.

1.3 Eckpunktepapier der Bundesnetzagentur

Am 24. Juli 2024 veröffentlichte die Beschlusskammer 4 der Bundesnetzagentur (BNetzA) das „Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich" [13]. Darin werden der Anlass sowie wesentliche Hintergründe und Ziele für eine Neuregelung der Sondernetzentgelte dargestellt. Diese sind im Folgenden zusammengefasst.

Die BNetzA beabsichtigte ursprünglich unter anderem, die Bandlastregelung zum 01. Januar 2026 auslaufen zu lassen. Parallel wird auch die allgemeine Netzentgeltsystematik (AgNes) einer Prüfung unterzogen. Ziel ist es, eine langfristig wirksame Regelung zu schaffen, die den Anforderungen der Energiewende nachkommt und den Unternehmen eine zeitlich unbefristete, planungssichere Grundlage für die anstehenden Investitionen zur Umstellung ihrer Produktionsprozesse gibt. Die notwendigen Anpassungen der Verbraucher sollen innerhalb hinreichender regional- und branchenspezifischer Übergangsfristen ermöglicht werden. Wie weiter unten beschrieben, wird die Überarbeitung der Sondernetzentgelte entgegen der der ursprünglichen Verlautbarungen in den AgNes-Prozess integriert.

Ursache für eine Neuregelung sind die **veränderten Anforderungen im Energiesystem,** insbesondere der Stromerzeugung, durch die Energiewende. Zunehmende fluktuierende Stromerzeugung durch die Erneuerbaren Energien führt zu steigenden Kosten für Netzausbau, Ausgleichsenergie und Engpassmanagement. Diese systemischen Gesamtkosten können durch dynamische Reaktionen der Verbraucher (vor allem stromintensiver Industriebetriebe) auf die jeweils vorherrschende Einspeisesituation gesenkt werden.

Insbesondere die Bandlastkriterien verhindern derzeit eine Flexibilisierung energieintensiver Letztverbraucher, da durch einen flexiblen Strombezug das Erreichen der „7.000 h-Grenze" gefährdet wird. Eine Aufhebung des Bandlastkriteriums würde flexiblen Verbrauchern im Gegenzug zusätzliche Einkünfte, beispielsweise durch Teilnahme am Regelenergiemarkt, ermöglichen.

Auch die Atypik ist in Netzen mit einem hohen Anteil an erneuerbarer Energieeinspeisung kein effektives Instrument zur Netzentlastung mehr, da sich die Erzeugung weg von Grundlastkraftwerken hin zu PV und Windenergie mit täglichen bis saisonalen Schwankungen und Erzeugungspeaks verschiebt und sich die Stromnachfrage zunehmend an der -erzeugung orientieren sollte.

Die geplante Neuregelung soll gezielte Anreize setzen, um positive Effekte zur Integration der Erneuerbaren Energien und systemdienlichem Verhalten der Nutzer zu erzielen.

Damit müssen auch die europäischen und nationalen **gesetzlichen Anforderungen** an die Ausgestaltung von Netzentgelten umgesetzt werden. Insbesondere zwei Grundsätze müssen bei der Ausgestaltung einer neuen Sondernetzentgeltregelung Berücksichtigung finden:

- **Kostenorientierung:**
  Netzentgelte sollen sowohl die Kosten des Netzbetriebs reflektieren als auch durch Preissignale zur Gesamteffizienz des Netzes beitragen. (Art. 18 Abs. 1 UAbs. 2 S. 1 VO (EU) 2019/943)

- **Förderung von Energieeffizienz:**
  Netzentgelte müssen zu einer effizienten und nachhaltigen Nutzung der verfügbaren Energie führen. Insbesondere sollen die Abregelung von Erneuerbaren Energien vermieden und die Marktintegration von erneuerbarem Strom angereizt werden.
  (Art. 18 Abs. 2 S. 1 VO (EU) 2019/943,
  Art. 27 Abs. 7 RL (EU) 2023/1791,
  § 21 Abs. 2 S. 6 EnWG,
  Art. 194 Abs. 1 lit. c) AEUV)

Die finale Ausgestaltung sowie die Umsetzung neuer Anreizmechanismen ist jedoch ebenfalls abhängig von den technischen Möglichkeiten der Letztverbraucher in der Industrie, Mengen- und Preisentwicklungen zu prognostizieren und anschließend flexibel darauf zu reagieren. Das Marktsignal soll dafür gestärkt werden. Gleichzeitig soll das tatsächlich vorhandene und künftig erreichbare Energieflexibilitätspotenzial der individuellen Verbraucher berücksichtigt und realisiert werden.

Von besonderer Relevanz ist dabei, dass Flexibilitätsanstrengungen bei produktionsbedingten Bandlastverbräuchen deutlich herausfordernder als bei anderem Nutzungsverhalten sind.

Um die Gegebenheit der Verbraucher in der Praxis einzubeziehen, fordert die BNetzA zur Stellungnahme für die Neugestaltung der Sondernetzentgelte auf. Dazu werden Leitfragen vorgegeben. Die Fragen zielen dabei auf die aktuellen Produktionsprozesse sowie die Entwicklung innerhalb der nächsten fünf bis zehn Jahre ab. Sie unterteilen sich in drei Themenbereiche:

Mengenpotenziale

- Welchen Zeitraum werden die Rampen des Hoch- und Runterfahrens in Anspruch nehmen?
- Welches Volumen hat die Residuallast, die einem flexiblen Einsatz zugeführt werden kann?
- Kann der Anteil der Residuallast in den verschiedenen Industriezweigen erhöht werden und – wenn ja – inwieweit?

Prognostizierbarkeit von Preisschwankungen

- Inwiefern erfolgen in verschiedenen Industriezweigen in Bezug auf die Residuallasten bereits jetzt Reaktionen auf die Börsenstrompreise?
- Welche Methoden werden bei der Prognose der Preisentwicklungen angewandt und welche Zuverlässigkeit weisen diese vor?
- Wie wird das Potenzial eingeschätzt, die Prognosesicherheit in den nächsten Jahren zu erhöhen?
- Welche Granularität kann bei der Flexibilisierung erreicht werden? Kann eine Reaktion auf viertelstündlicher Basis (Intraday-Preise) umgesetzt werden?

Flexibilisierungsprozesse

- Welche Maßnahmen sind erforderlich, um eine maximale Flexibilisierung der Prozesse zu erwirken?
- Welche Kosten sind mit solchen Maßnahmen verbunden?
- Welchen Zeitraum nehmen diese Maßnahmen in Anspruch?

Verlauf der Diskussion
Der im September 2024 erschienene Zwischenbericht dieser Studie bildete eine erste wissenschaftliche Grundlage für die geforderte Stellungnahme.

Im Juli 2025 hob die Bundesnetzagentur die Übertragung des Festlegungsverfahrens zu Industrienetzentgelten an die gesonderte Beschlusskammer 4 auf. Stattdessen soll die Thematik in der Rahmenfestlegung Allgemeine Netzentgeltsystematik Strom (AgNes) integriert werden. Dafür ist eine eigenständige Anhörung zu Industrienetzentgelten innerhalb des Verfahrens geplant. Der Festlegungsentwurf ist für Ende 2026 geplant.

2 Grundlagen industrieller Energieflexibilität

Lastflexibilität wird in Lastreduktion, Lasterhöhung und Lastverschiebung unterteilt. Dafür stehen den Industriebetrieben verschiedene Energieflexibilitätsmaßnahmen zur Verfügung. Als Schnittmenge aus wirtschaftlichem und praktisch nutzbarem Energieflexibilitätspotenzial ergibt sich das tatsächlich realisierbare Potenzial, welches dann erschlossen werden kann.

Nach VDI Definition ist **Energieflexibilität** „die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und prozesseffizient an Änderungen des Energiemarktes anzupassen. Die Produktqualität muss dabei unverändert bleiben." [5]

Die resultierende Laständerung wird als Änderung der bezogenen Leistung gegenüber dem Referenzbetrieb betrachtet [6]. Es lassen sich drei Möglichkeiten der Lastflexibilität identifizieren (siehe Abbildung 2-1), die auch als Demand Side Management (DSM) bezeichnet werden:

- **Lastreduktion:** Die Reduzierung der bezogenen Leistung, z. B. durch vorübergehende Maschinenabschaltung,
- **Lasterhöhung:** Die Erhöhung der bezogenen Leistung, z. B. die Erhöhung der Produktionsmenge (ggf. mit Zwischenlagerung) und
- **Lastverschiebung:** Anpassung der Produktionszeiten, so dass Lasterhöhung und -reduktion direkt hintereinander ausgeführt werden und sich die Effekte beider Teilmaßnahmen somit kompensieren, ohne dass es in Summe zu einem Produktionsausfall kommt.

Beispiele für Flexibilitätsmaßnahmen sind unter anderem der Wechsel der Energiequellen (Hybridisierung), Energie- oder Produkt(-zwischen)-Speicherung, Änderung der Produktionsreihenfolge oder die Unterbrechung von Prozessen.

Damit ein Energieflexibilitätspotenzial erschlossen und dem Markt zur Verfügung gestellt werden kann, muss die dazugehörige Energieflexibilitätsmaßnahme technisch möglich, in der Praxis umsetzbar und aus Unternehmenssicht wirtschaftlich durchführbar sein. [7]

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel beschrieben, ist eine flexible Anpassung des Strombedarfs zukünftig zunehmend notwendig, um Netzinstabilitäten zu vermeiden. Die verstärkt fluktuierende Erzeugung Erneuerbarer Energien kann zu Ungleichgewichten im Stromnetz führen. Ein flexibler, der Erzeugung angepasster Stromverbrauch hilft dabei, das Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch aufrechtzuerhalten. Somit kann die Stabilität des Stromnetzes gesichert werden. Weitere positive Effekte industrieller Energieflexibilität können unter anderem sein:

- **Kostenoptimierung** aus Sicht der Letztverbraucher durch Strombezug zu Zeiten mit geringeren Strompreisen,
- **Steigende Versorgungssicherheit** durch flexible Anpassungen an Netzschwankungen, um Überlastungen vorzubeugen, sowie die
- **Integration von Erneuerbaren Energien** in das Energiesystem durch Strombezug zu Zeiten mit einer großen Menge verfügbarer erneuerbarer Erzeugung.

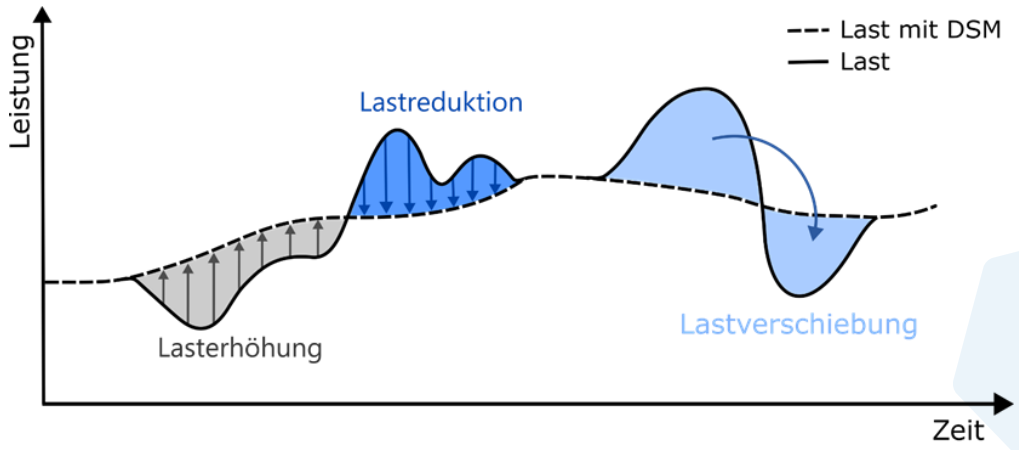

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der Energieflexibilitätsoptionen (Eigene Darstellung, FfE).

3 Status quo der Glasindustrie

Die energieintensive Glasindustrie unterteilt sich in die Produktion von Flachglas, Hohl-/Behälterglas und Spezialglas. Während sich die jeweiligen konkreten Produktionsprozesse für jeden Standort individuell unterscheiden, ist in allen Verfahren der Schmelzprozess der energieintensivste Schritt.

Die Glasindustrie umfasst in Deutschland etwa 400 Betriebe und zählt zu den bedeutendsten Industriezweigen des Landes. Mit rund 54.000 Beschäftigten gehört sie zu den größten Branchen der Industrie. Im Jahr 2024 erzielte die deutsche Glasindustrie einen Umsatz von ca. 11,3 Mrd. € (2023: 12,3 Mrd. €) [14].

Der Glassektor zeichnet sich durch eine breite Produktpalette und zahlreiche Anwendungsfelder aus, die eine heterogene Struktur bedingen. Zum Produktportfolio zählen unter anderem Behälterglas für Nahrungsmittel und Kosmetik, Flachglas für den Gebäudebereich sowie Spezial- und Gebrauchsglas. Die Untergliederung der Glasbranche, beispielsweise anhand der Produktionsindizes (Abbildung 3-1) zeigt, dass die verschiedenen Subbranchen sich losgelöst voneinander entwickeln und differenziert zu betrachten sind.

Jährlich werden in Deutschland etwa 6,7 Mio. t Glas produziert, wobei der größte Anteil auf die Behälterglasindustrie entfällt (ca. 3,8 Mio. t pro Jahr), gefolgt von der Flachglasindustrie (ca. 1,8 Mio. t pro Jahr).

Produktionsindex der Glasindustrie in Deutschland
2021 = 100 | Destatis 42153 -0002 | X13 Jdemetra+ kalender und saisonbereinigt | nach WZ2008 -Klassifikation

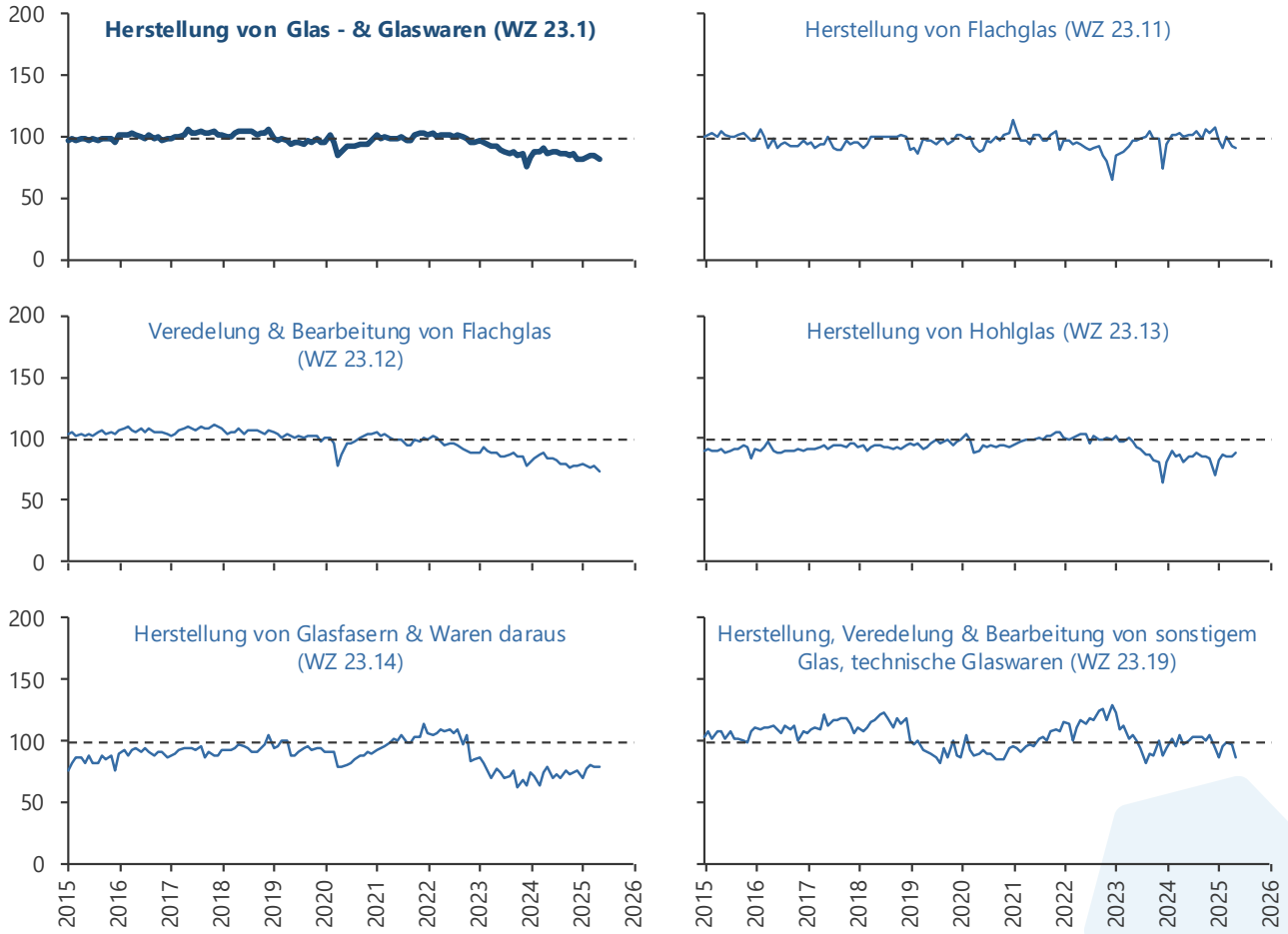

Abbildung 3-1: Produktionsindex der Glasindustrie und zugehöriger Subbranchen in den vergangenen zehn Jahren.

Der Sektor für Spezial- und Gebrauchsglas stellt zwar mengenmäßig mit ca. 0,3 Mio. t pro Jahr nur einen kleinen Anteil der Gesamtproduktion dar, ist jedoch aufgrund der Relevanz der hergestellten Produkte und der hohen Wertschöpfung eine weitere zentrale Subbranche der Glasindustrie. [14]

In diesen drei zentralen Teilbranchen kommen aufgrund der heterogenen Produktgruppen sehr unterschiedliche Produktionstechnologien zum Einsatz, was die Herausforderung der Dekarbonisierung weiter verstärkt. Für die Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie für die deutsche Glasindustrie wurden daher die Teilbranchen Behälterglas, Flachglas sowie Spezial- und Gebrauchsglas jeweils separat untersucht und analysiert. [1] [15]

Der Prozess

Die grundlegenden Schritte der Glasherstellung (siehe Abbildung 3-2) sind in allen Teilbranchen gleich. Zunächst wird ein Gemisch aus Rohstoffgemenge (u. a. Quarzsand, Soda, Kalk) und Scherben angefertigt. Dieses wird anschließend beim energieintensivsten Schritt der Glasherstellung im Schmelzofen eingeschmolzen. Hierbei werden die Rohstoffe zu Glas verflüssigt und anschließend geläutert, um Verunreinigungen zu entfernen und eine gleichmäßige Glasmasse zu erzeugen. Dieser Prozess beansprucht, je nach Art des hergestellten Glases, etwa 60 bis 80 % des gesamten Energiebedarfs in der Glasproduktion, welcher derzeit noch fast ausschließlich durch fossile Brennstoffe gedeckt wird. Maßnahmen, die darauf abzielen, relevante Energieflexibilität zu erschließen, müssen daher vor allem im Bereich des Schmelzprozesses ansetzen.

Nach dem Schmelzprozess folgen weitere Produktionsschritte, die als nachgelagerte Prozesse bezeichnet werden. Dazu zählen beispielsweise das Formen des Glases, das Tempern (eine Wärmebehandlung zur Erhöhung der Festigkeit) oder das Schneiden und Veredeln des Endprodukts. Obwohl auch in diesen Schritten noch fossile Energie zum Einsatz kommt, ist der Energiebedarf deutlich geringer als im Schmelzprozess, und eine Elektrifizierung dieser Bereiche ist ohne größere technologische Hürden umsetzbar.

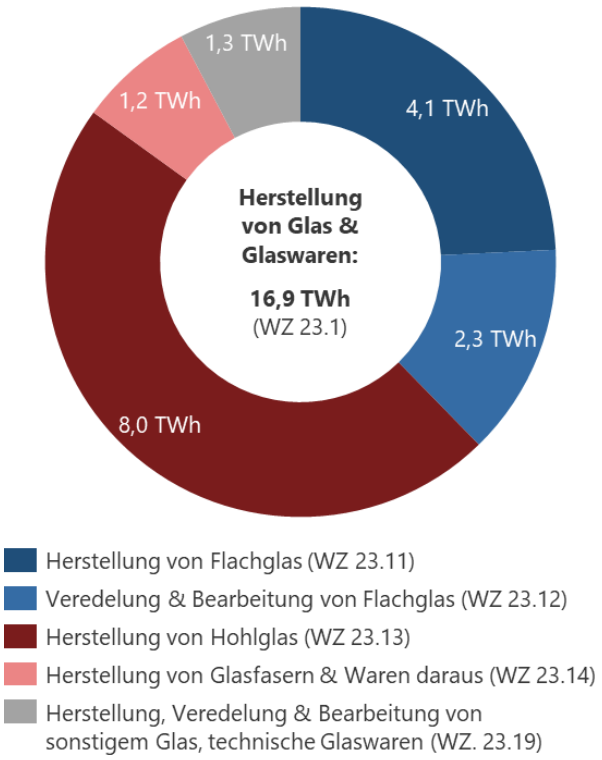

Abbildung 3-3: Endenergieverbrauch der Subbranchen in der Glasindustrie (2023) [11].

Energiebedarf

Der Energiebedarf der Glasindustrie (WZ 23.1: Herstellung von Glas- und Glaswaren) betrug 2023 16,9 Terawattstunden (TWh) und macht damit etwa 3 % des gesamten Energiebedarfs des Industriesektors aus [16]. Der wichtigste Energieträger in der Glasproduktion ist nach wie vor Erdgas, gefolgt von Strom (vgl. Tabelle 3-1) [11].

Der Großteil der Energie, bis zu 85 %, wird für die Bereitstellung von Wärme benötigt. Die hohen Prozesstemperaturen, die für die Glasherstellung erforderlich sind, begründen den sehr hohen Energiebedarf. Fast 90 % der Prozesse erfordern Temperaturen über 500 °C, wobei die Temperatur in den Schmelzwannen, die das Herzstück der Glasproduktion bilden, zwischen 1.400 und 1.650 °C liegt.

Abbildung 3-2: Vereinfachtes Prozessschaubild der Glasherstellung.

Der spezifische Energiebedarf für die Glasherstellung variiert stark und hängt maßgeblich von der Verweildauer des Glases im Produktionsprozess, insbesondere in der Schmelzwanne, ab. Je nach Verweildauer kann sich der Energiebedarf bis zu vervierfachen. Dies verdeutlicht die Komplexität und die Herausforderungen, die mit der effizienten Energienutzung in der Glasindustrie verbunden sind.

Den energetisch größten Anteil nimmt die Herstellung von Hohlglas (47 %) vor der Produktion von Flachglas (24 %) ein (siehe Abbildung 3-3).

Zur Effizienzsteigerung werden im etablierten Stand der Technik Maßnahmen zur Wärmerückgewinnung an allen Glaswannen eingesetzt. Diese ist beispielsweise über Dampfturbinen bis zu einer Temperatur von 400 °C möglich oder durch regenerative Zuluftvorwärmung der Verbrennungsluft. Dennoch ist derzeit Erdgas der dominierende Energieträger, insbesondere für große Schmelzwannen. Vollelektrische Wannen, die als alternative Technologie zunehmend an Bedeutung gewinnen, werden aktuell eher für kleinere Produktionsmengen bzw. kleinere Schmelzwannengrößen eingesetzt, da sie in großem Maßstab derzeit noch weniger effizient bzw. in der Schmelzkapazität limitiert sind. Hybride Schmelzwannen werden sowohl mit Erdgas als auch mit Strom betrieben.

Elektrifizierung – Status quo

Elektrische Schmelzwannen werden bereits in der Glasindustrie genutzt, vor allem bei kleineren Produktionskapazitäten (bis 50 Tonnen pro Tag) für Kosmetik- und Spezialgläser. In der Behälter- und Flachglasindustrie wird das sogenannte „Boosting" angewandt, bei dem 5 bis 15 % der Schmelzenergie zusätzlich elektrisch über Elektroden eingebracht werden, um die Produktionskapazität zu erhöhen und die Glasqualität zu verbessern. Aufgrund der höheren Stromkosten im Vergleich zu Erdgas wird das elektrische Schmelzen bisher nur bei speziellen Gläsern eingesetzt. Vollelektrische Wannen sind in ihrer Schmelzkapazität begrenzt. Große Schmelzwannen für Behälter- und Flachglas können daher nicht rein elektrisch beheizt werden. [3] [1] [15]

Tabelle 3-1: Energieträgereinsatz in der deutschen Glasindustrie im Jahr 2023. [11]

Energieträger	Absoluter Energieeinsatz	Relativer Anteil	davon zur Wärmeerzeugung
Erdgas	12,2 TWh	72 %	50 - 85 %
Mineralölprodukte	0,8 TWh	5 %	
Strom	3,8 TWh	22 %	
Sonstige	0,1 TWh	1 %	
Summe	**16,9 TWh**	**100 %**	**50 – 85 %**

4 Transformationspfade der Glasindustrie

Die Transformation der Glasindustrie ist durch eine Elektrifizierung der Schmelzöfen, den Einsatz von grünem Wasserstoff oder eine hybride Nutzung der beiden Energieträger möglich. Alle Transformationspfade führen zu einem höheren Stromverbrauch der Glasproduzenten.

Die bereits im Jahr 2022 veröffentlichte BV-Glas-Roadmap „Glas 2045 – Dekarbonisierung der Glasindustrie" [1] zeigt neben einem Referenzpfad (Business as usual) drei Treibhausgasminderungspfade auf:

- ein Elektrifizierungsszenario,
- ein Wasserstoffszenario und
- ein Hybridszenario.

Im Referenzpfad ändern sich die Anteile der Wannentechnologien an der gesamten Glasproduktion nicht, während im Elektrifizierungsszenario überwiegend auf vollelektrische Wannen und im Wasserstoffszenario auf hybride H_2-Wannen umgestellt wird (Abbildung 4-1).

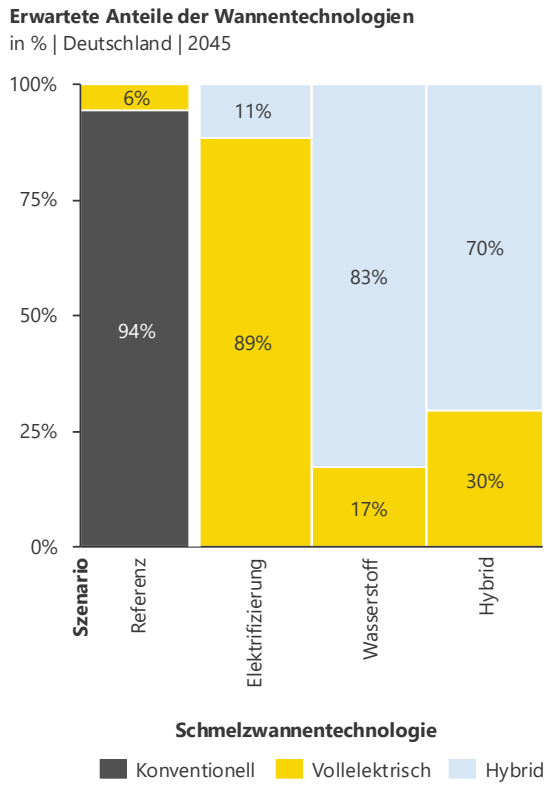

Abbildung 4-1: Anteile der Schmelzwannentechnologien in den Transformationspfaden der BV-Glas-Roadmap [1].

Für das Zieljahr 2045 beträgt der Energieverbrauch im Referenzszenario 14,0 TWh/a, davon entfallen etwa 1,9 TWh/a auf Strom. Die drei betrachteten Transformationspfade (siehe Tabelle 4-1) erreichen alle einen niedrigeren Gesamtenergieverbrauch, zwischen 9,5 TWh/a im Elektrifizierungsszenario und 12,2 TWh/a im Wasserstoffszenario. Der Strombezug steigt jedoch in allen Transformationspfaden stark an. Im Wasserstoffszenario beträgt er 4,3 TWh/a, im Elektrifizierungsszenario sogar 8,7 TWh/a.

Tabelle 4-1: Jährliche Energie- und Stromverbräuche im Jahr 2045 in den Szenarien der BV Glas Roadmap [1].

Szenario	Energieverbrauch	Davon Strom
Referenz	14,0 TWh/a	1,9 TWh/a
Elektrifizierung	9,5 TWh/a	8,7 TWh/a
Wasserstoff	12,2 TWh/a	4,3 TWh/a
Hybrid	10,7 TWh/a	8,3 TWh/a

Deutlich ist, dass in allen betrachteten Transformationspfaden der Strombezug der Glasindustrie wesentlich ansteigen wird. Die Sicherstellung der Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger, insbesondere Strom, ist daher eine der Handlungsempfehlungen der Roadmap. Dazu muss einerseits die Energieinfrastruktur ausgebaut werden und andererseits Strom wirtschaftlich und kontinuierlich zur Verfügung stehen. Die Betrachtung von Energieflexibilitätsoptionen oder neuen Energieflexibilitätspotenzialen durch die Transformation ist kein Teil der Roadmap und soll daher im Folgenden auch unter den Gesichtspunkten der dargestellten Transformationspfade betrachtet werden.

Weitere Forschungstätigkeit in Bezug auf Energieflexibilität in der Glasindustrie

Im Rahmen des Kopernikus-Projektes SynErgie, welches die Flexibilisierung der energieintensiven Industrie untersucht [2], gibt es auch in der Glasindustrie ein Satelliten-Projekt. Im Rahmen des Forschungsprojekts DisConMelter wurde ein gleichnamiger elektrischer Glasherstellungsprozess entwickelt, der es ermöglicht, Behälterglas immer dann zu produzieren, wenn ein Stromüberschuss im Netz herrscht. Der DisConMelter ist eine elektrisch betriebene Schmelzwanne, welche die Glasproduktion flexibler gestalten soll. Das System besteht aus drei Modulen: Im ersten Modul wird Glas geschmolzen, wenn überschüssiger Strom im Netz vorhanden ist. Das geschmolzene Glas wird in Modul 2, einen Glasspeicher, geleitet, der das flüssige Glas bei geringem Energieverlust lagern kann. Der Speicher ist energieflexibel, das heißt, er kann mit wechselnder Last betrieben werden. Schließlich übernimmt Modul 3 die Weiterverarbeitung des Glases in Endprodukte. Die modulare Aufteilung bringt zwei Vorteile: eine flexiblere Energienutzung zur Netzstabilisierung und die Möglichkeit, Nacht- und Wochenendschichten durch temporäre Produktionsunterbrechungen zu reduzieren. Der Prozess konnte in einem Testmodul an der Technischen Hochschule Deggendorf in kleinem Maßstab aufgebaut und betrieben werden. Das Projekt wurde 2019 abgeschlossen. Weitere Entwicklungen Richtung Marktreife sind nicht bekannt.

Auch beim sogenannten FlexMelter [17] der Firma *Nikolaus SORG GmbH* soll eine keramische Wand zwischen dem Gemenge und der Schmelze die Prozesse separieren. Jedoch zeigte die Ofenkonstruktion in der Praxis eine sehr kurze Lebensdauer und durch sich aus der Trennwand lösende Steine im Produkt wurde die erforderliche Qualität gefährdet. Daher ist aktuell keine Rückkehr des FlexMelters absehbar.

5 Kernerkenntnisse der Interviews

Die Glasherstellung ist ein vielfältiger, komplexer Prozess mit individuellen, standortspezifischen Anforderungen. Nach der Änderung von Prozessparametern werden häufig mehrere Stunden bis Tage benötigt, bis sich ein neues thermisches Gleichgewicht einstellt. Anschließend dauert es erneut Stunden bis Tage, bis das Produkt in entsprechender Qualität hergestellt werden kann. Energieflexibilitätsoptionen sind daher prozesstechnisch stark limitiert und derzeit nicht in relevanten Größenordnung erschließbar.

In Online-Interviews und Vor-Ort Prozessbegehungen wurden die Expertise und Perspektive der Akteure aus der Praxis eingeholt. Dazu gehörten **Glaswannenhersteller,** sowie **Flach-, Spezial- und Behälterglasproduzenten.** Der Fokus lag dabei zunächst auf dem Status quo der Glasindustrie und möglichen Energieflexibilitätspotenzialen, die noch nicht erschlossen sind. Weiterhin wurden mögliche Entwicklungspfade betrachtet, um einen Ausblick auf zukünftige Technologien zu geben.

5.1 Perspektive der Glaswannenhersteller

Die interviewten Glaswannenhersteller sind allesamt Unternehmen mit einer über 100-jährigen Tradition und Erfahrung, die ein breites Produktportfolio an Glasschmelzwannen anbieten. Schmelzwannen sollen dabei in der Regel vorrangig drei Kriterien erfüllen:

- Sie müssen möglichst **langlebig** sein und widerständig gegenüber den hohen Temperaturen und den aggressiven Bestandteilen der Glasschmelze,
- sie müssen es den Glasproduzenten ermöglichen, Glasprodukte in der jeweils erforderlichen hohen **Qualität und Reinheit** herzustellen, und
- sie müssen möglichst **energieeffizient** arbeiten, um eine wirtschaftliche Produktion zu ermöglichen.

Dazu sind moderne Schmelzwannen mit einer Vielzahl an Überwachungssystemen ausgestattet, die eine exakte Kontrolle der Schmelzbedingungen ermöglichen.

5.1.1 Glaswannen im Status quo

Im Status quo kommen für die Glasherstellung vornehmlich fünf Wannentypen zum Einsatz, die im Portfolio aller Hersteller ähnlich vorhanden sind.

Vier dieser Wannentypen werden mit **Erdgas** befeuert. Die Flamme brennt dabei über dem Rohstoffgemisch ab, welches dadurch von oben zum Schmelzen gebracht wird. All diese Öfen können durch zusätzliche Elektroden elektrisch unterstützt werden, welche das Gemisch von unten beheizen. Dieser Vorgang wird als *Boosting* bezeichnet und wird bisher insbesondere für Tonnageanpassungen genutzt. Je nach Ofen- und Produkttyp kann durch das Boosting ein zusätzlicher Energieeintrag von ca. 5 bis 25 % (in Einzelfällen auch bis zu 40 %) erreicht werden. Höhere Stromanteile im erfordern ein spezielles Hybridwannendesign (s. u.). Für einige Produkttypen ist kein Boosting möglich.

- Die regenerative **U-Flammenwanne** (end-fired) ist der in der Behälterglasindustrie am weitesten verbreitete Wannentyp. Sie zeichnet sich durch eine sehr kompakte Bauweise aus. Dabei wird am Wannenanfang Erdgas über Brennerlanzen und vorgewärmte Luft über einen über den Brennerlanzen befindlichen Brennerhals eingeblasen. Die daraus entstehende Flamme wird am anderen Wannenende umgelenkt und brennt in U-Form ab. Die Abgase werden über den zweiten Brennerhals aus dem Brennraum geführt. Die zur Befeuerung eingesetzten Brenner werden abwechselnd eingesetzt und alle ca. 20 bis 25 Minuten getauscht, wobei die Flammenführung jeweils umgekehrt wird. Die heißen Abgase werden über Regeneratoren zur Vorwärmung der Verbrennungsluft genutzt. Diese Wannen können, sofern ausreichend Platz vorhanden ist und die Produkte es zulassen, in der Kaltreparatur (laut Hersteller alle 15 bis 20 Jahre bei der Flachglasproduktion bzw. alle 12 bis 15 Jahre bei der Behälterglasproduktion) zur Nachrüstung mit Elektroden vorbereitet und anschließend mit in der Regel max. 20 % Strom betrieben werden. Die Teilelektrifizierung ist begrenzt, da mit steigendem elektrischem Wärmeeintrag die notwendige Flammentemperatur sinkt, bis die Flamme schließlich nicht mehr ausreichend heiß über den gesamten Wannenbereich zirkulieren würde. Durch die nachträgliche Elektrifizierung erhöht

sich die Temperatur und beeinflusst die Strömungskonvektion in der Schmelze, was zu einer verstärkten Korrosion der Wannen führen kann.

- Ebenfalls mit einem Luft-Erdgas-Gemisch wird die regenerativ **querbeheizte Wanne** betrieben. Durch eine seitliche Brenneranordnung entlang der Flussrichtung können größere Beheizungszonen und damit höhere Schmelzkapazitäten von etwa 1.000 bis 1.200 t pro Tag erreicht werden. Für beide Formen der regenerativen Brenner gilt, dass diese langsam hoch- und runtergefahren werden müssen, um das gewünschte thermische Gleichgewicht in der Schmelze einzustellen.
- **Rekuperative Schmelzwannen** basieren ebenfalls auf der Erdgasverbrennung mit Luft, überwiegend mit seitlicher Brenneranordnung, und haben geringere Kapazitäten als regenerative querbeheizte Schmelzwannen. Anstelle von Regeneratoren werden Doppelmantel-/Spalt- oder Rohrbündelrekuperatoren zur Luftvorwärmung genutzt. Diese sind weniger effizient als Regeneratoren. Das Rauchgas hat jedoch anschließend eine höhere Temperatur als bei regenerativen Wannen und kann damit beispielsweise zur Energierückgewinnung mittels Dampfturbine genutzt werden. Rekuperative Brenner müssen kontinuierlich betrieben werden und der Gasstrom kann nur sehr geringfügig verändert werden, da bei stärkerer Reduzierung der Brennerleistung die Brenner aufwendig entfernt werden müssten.
- In **Oxyfuel-Schmelzwannen** wird das Erdgas mit reinem Sauerstoff verbrannt. Die Vorwärmung ist dabei technisch limitiert, da der Sauerstoff sonst zu reaktiv wird und das Erdgas zur thermischen Zersetzung (Vercrackung) neigt. Die Brennerlanzen müssen dabei immer vom Sauerstoff- und Gasfluss gekühlt werden, um nicht durch die Glasschmelze beschädigt zu werden. Durch die Sauerstoffatmosphäre kommt es zu einer nahezu vollständigen Verbrennung, weshalb die Abgase nahezu vollständig aus CO_2 und Wasserdampf bestehen. Dieses Verfahren ist daher am aussichtsreichsten für die Entwicklung potenzieller CO_2-Abscheidelösungen (Carbon Capture) in der Glasindustrie.

Neben den erdgasbefeuerten Wannen sind außerdem bereits **vollelektrische Schmelzwannen** für einige Glastypen im Einsatz. Diese kommen derzeit für die Herstellung von Weißglas oder Spezialglas zum Einsatz, in Einzelfällen auch für Braun- oder Grünglas (derzeit jedoch nur im Ausland). Die Elektroden sind in modernen Wannentypen als Top-Elektroden oder in der Schulter der Seitenwand der Schmelzwanne ausgeführt. Sie ragen durch die Rohstoffdecke in die Schmelze hinein und der Schmelzprozess läuft vertikal von oben nach unten ab, wobei eine geschlossene Rohstoffdecke notwendig ist, um Wärmeaustrag in den kalten Oberofen zu vermeiden („Cold-Top"). Durch den Wärmeeintrag der Top-Elektroden erhöht sich die Temperatur der Schmelze, was den Schmelzprozess vorantreibt. Aufgrund der im Vergleich zu konventionell gasbeheizten höheren Temperatur und Konvektionsgeschwindigkeit der Schmelze wird die Korrosion des Schmelzbeckens verstärkt. Reine Elektrowannen haben daher eine geringere Lebensdauer von in der Regel ca. fünf bis sechs und maximal acht Jahren. Andererseits ist der Wärmeeintrag effizienter als bei gasbeheizten Wannen. Während Brennerwannen Effizienzen von 40 bis 60 % bezogen auf den Brennstoffbedarf aufweisen, erreichen vollelektrische Schmelzwannen eine Effizienz von bis zu 95 %. Diese Wannen werden bisher vor allem im Spezialglasbereich eingesetzt und haben überwiegend eine geringe Kapazität von ca. 10 bis 100 t pro Tag, bei einzelnen Herstellern bis zu 180 t pro Tag. Nach Aussage einiger Glaswannenhersteller könnten vollelektrische Glaswannen in Einzelfällen, sowie nur für bestimmte Glasprodukte bei einen Stromausfall (bis circa max. 90 min) unter Produktionsverlusten wieder angefahren werden, müssen jedoch direkt im Anschluss den Energieverlust überkompensieren, um den ursprünglichen Zustand der Schmelze zu erreichen. Vor- und nachgelagerte Prozessschritte müssten ebenfalls über einen längeren Zeitraum wieder angefahren und eingestellt werden. Für hochqualitative Produkte, insbesondere Spezialglas, sind diese Flexibilitäten jedoch explizit ausgeschlossen. Abschnitt 5.2 betrachtet die zu erwartenden Auswirkungen auf die Produktqualität genauer.

5.1.2 Entwicklung der Glaswannentechnologie

Nach Aussagen der Glaswannenproduzenten und deckend mit den Annahmen der Roadmap des BV Glas [1] spielen zukünftig vor allem drei Wannentypen eine Rolle.

Hybridwannen, die mit einer Kombination aus Erdgas (bzw. perspektivisch Wasserstoff) und Strom betrieben werden, sollen langfristig bis zu 80% des Gesamtenergiebedarfes der Wanne elektrisch decken können. Dabei wird ein Korridor des elektrischen Eintrags von 20 bis 80 % am Gesamtenergieverbrauch angestrebt. Mit steigendem elektrischem Eintrag sinkt auch der Gesamtenergieverbrauch der Wanne, da die elektrische Eintragung mit einer Effizienz von um die 95 % effizienter ist als eine fossile Befeuerung. Bisher werden damit Schmelzkapazitäten von ca. 500 t pro Tag erreicht.

Trotz des angegebenen Korridors werden diese Wannen im konkreten Anwendungsfall weiterhin für einen

optimalen Betriebspunkt ausgelegt, da das Strom-Brennstoffverhältnis das Wannendesign maßgeblich beeinflusst: In herkömmlichen erdgasbefeuerten Öfen brennt die Flamme im Oberofen über dem Rohstoffgemenge bzw. der Schmelze ab. Bei steigendem elektrischem Wärmeeintrag durch von unten in die Schmelze ragende Elektroden sinkt der verbleibende durch die Flamme zu erbringende Wärmebedarf. Damit wird der Oberofen kühler. Bei falscher Auslegung/Betriebsweise bzw. zu hohen Stromanteilen von über 50 bis 70 % (bei Flachglas bereits deutlich früher) kann es passieren, dass der Oberofen kühler als die Schmelze wird. Hinzu kommt, dass durch den notwendigen Mindestabstand zwischen zwei Elektroden die Wanne größer wird und damit eine größere Gemengeoberfläche von der Flamme überstrichen werden muss. Beide Effekte führen dazu, dass die für die gewünschte Glasqualität notwendige Temperaturverteilung zunehmend nicht mehr garantiert werden kann. Einzelne Hersteller bieten ein alternatives Ofendesign an, bei welchem der Gemengeteppich durch eine Flachdecke überdeckt ist, um ein „auskühlen" zu verhindern.

Bei geringeren Stromanteilen von unter 25 % und damit im Übergang zu den bereits bekannten Boosting-Wannen, ist die Betriebsweise der Schmelzwannen auch aufgrund der bereits vorhandenen Praxiserfahrungen besser zu kontrollieren. Mögliche Energieflexibilitätspotenziale durch einen denkbaren variablen Energieträgerwechsel zwischen Strom und Gas sind daher primär in diesem Bereich zu verorten. Dabei ist zwischen Senkung und Erhöhung des Stromanteils (und jeweils konträr dazu des Gasanteils) zu unterscheiden: In diesem Bereich den Stromanteil weiter zu senken ist leichter möglich, als den Stromanteil zu steigern. Bei über 25 % Stromanteil kann eine weitere Erhöhung nur sehr langsam und behutsam durchgeführt werden, da es sonst zu Blasenbildung an den Elektroden kommt. Diese können im Extremfall zu einer Schaumbildung an der Oberfläche der Schmelze führen, welche isolierend zwischen Schmelze und Oberofen wirkt. Der Effekt wird durch den dann abkühlenden Oberofen verstärkt und der Schaum dichtet zunehmend ab. In so einem Fall dauert es mehrere Stunden, um die Schmelze wieder in den gewünschten Zustand zu überführen.

Dass der Energieeintrag aus der Gasfeuerung nicht gleichzusetzen ist mit dem elektrischen Wärmeeintrag zeigt sich auch an der Viskosität der Glasschmelze. Das im hinteren Ofenteil eingelegte Rohstoff- und Scherbengemenge soll trotz kontinuierlicher Nachführung möglichst kompakt im hinteren Ofenteil gehalten werden. Die im konventionellen, (erd-)gasbefeuerten Ofen sehr zähflüssige Schmelze bildet eine Konvektionswalze, die der Gemengebewegung entgegenwirkt und das Gemenge damit wieder in den hinteren Ofenteil schiebt. Die Beheizung per Elektroden führt, wie oben beschrieben, zu höheren Temperaturen in der Schmelze, die damit an Viskosität verliert, wodurch sich der Rückstrom des Gemenges abschwächt. Kommt das noch nicht eingeschmolzene Gemenge zu weit in den vorderen Ofenteil, ist die Glasqualität gefährdet.

Die genannten Aspekte führen dazu, dass die theoretisch denkbaren Energieflexibilitätspotenziale einer hybriden Schmelzwanne durch Energieträgerwechsel in der Praxis nur sehr eingeschränkt umsetzbar sind. Für einzelne Schmelzwannen wurde gezeigt, dass eine geringfügige Senkung der Stromzufuhr um ca. 3 % für fünf Minuten direkt im Anschluss über zehn Minuten mit 1,5 % über dem Ausgangsniveau der elektrischen Leistung überkompensiert werden kann, ohne das Aufrechterhalten der Schmelze zu gefährden, aber mit Veränderungen der Schmelzeigenschaften und damit Auswirkungen auf die Produktqualität. Praktisch wird ein Produktwechsel mit Anpassung der Hybridparameter (Verhältnis Strom/ Gas) in der Regel jedoch nur über Tage bis Wochen durchgeführt. Eine nicht-produktionsbedingte Anpassung dieser Parameter wird in der Praxis bisher vermieden, liegt nach Einschätzung der Glaswannenproduzenten jedoch ebenfalls im Tages- bis Wochenbereich. Es ist davon auszugehen, dass sich mit zunehmender Erfahrung diese Zeiträume leicht verkürzen könnten. Nichtsdestotrotz empfehlen die Glaswannenhersteller den optimalen Produktionspunkt, wenn einmal eingestellt, stabil zu halten, um einen energieeffizienten Betrieb zu ermöglichen, die Schmelzkonvektionen und Produktqualität nicht zu gefährden und die Lebensdauer der Schmelzwanne zu verlängern. Schmelzwannen für die Flach- und Spezialglasproduktion sind als besonders sensibel zu bewerten, da die Schmelze die Formgebung beeinflusst. Sollte eine Anpassung der Hybridparameter erfolgen, ist dies nur mit Produktausschuss möglich und sollte idealerweise nur über mehrere Tage und beispielsweise gleichzeitig zu Produktwechseln durchgeführt werden.

Rein **wasserstoffbefeuerte Schmelzwannen** werden ebenfalls, beispielsweise im Projekt ZeroCO2 [8], erprobt. Im Pilotprojekt wird eine Erdgas-Oxyfuel-Wanne auf Wasserstoff-Oxyfuel umgestellt und mit maximalem Stromeintrag von 50 bis 80 % betrieben. Der Einsatz von Wasserstoff ist jedoch wenn dann nur in der Behälter-/Flaschenglasproduktion auf absehbare Zeit umsetzbar. Zum einen ist die Wärmedichte der Wasserstoffflamme geringer als die der Erdgasflamme. Zum anderen erhöht sich durch den bei der Verbrennung entstehenden Wasserdampf der H_2O-Partialdruck über der Schmelze und führt zu Verunreinigungen bei der Flachglasproduktion.

Die (rein) wasserstoffbefeuerten Schmelzwannen weisen keine relevanten elektrischen Energieflexibilitätspotenziale im Vergleich zu anderen Wannentypen auf. Weiterhin sehen die Glaswannenhersteller eine Zurückhaltung aufgrund von Unsicherheiten bezüglich der wirtschaftlichen Verfügbarkeit von Wasserstoff.

Für die **vollelektrischen Schmelzwannen** werden je nach Hersteller Kapazitäten von 300 bis 400 t pro Tag erwartet. Diese Skalierbarkeit gilt es nun in der Praxis nachzuweisen. Sie ist durch die einzuhaltenden Mindestabstände der Elektroden und der damit erzielbaren Energiedichteverteilung technisch limitiert. Die notwendige elektrische Infrastruktur am Standort muss entsprechend ertüchtigt werden, was mit entsprechend hohen Kosten bzw. Baukostenzuschüssen, beispielswiese für Transformatoren, Schaltanlagen, Netzersatzanlagen, etc., verbunden ist. Eine weitere Herausforderung in der Skalierung der vollelektrischen Schmelzwannen besteht in der chemischen Zusammensetzung der Roh- und Zuschlagstoffe. Da durch die geschlossene Rohstoffdecke ein höherer Anteil des ansonsten in den Oberofen entweichendenden Läutergases in der Schmelze recycelt wird, muss auch die Zugabe entsprechender Zuschlagstoffe angepasst werden.

Die Glaswannenproduzenten gehen davon aus, dass vollelektrische Schmelzwannen zunächst im Behälterglasbereich skalieren werden, bevor ausgereifte vollelektrische Technologien zur Flachglasproduktion verfügbar sein könnten. Vollelektrisierte Öfen weisen nach Angaben der Schmelzwannenproduzenten kein Energieflexibilitätspotenzial im Sinne der Anforderungen der Bundesnetzagentur auf.

5.1.3 Gemeinsamkeiten und Fazit der Glaswannenhersteller

Es ist derzeit nicht absehbar, ob sich eine und wenn ja, welche Technologie am Markt durchsetzen wird. Die Markt- und Technologieeinschätzungen der Schmelzwannenproduzenten gehen von unterschiedlichen Entwicklungen aus. Neben technischen, produktspezifischen Anforderungen an Kapazität und Qualität sind insbesondere die Energieträgerpreise und Anschlussleistungen ausschlaggebend.

Alle Wannentypen, sowohl im Status quo als auch zukünftig, müssen kontinuierlich beheizt werden, um die Glasschmelze mit ihren Konvektionsströmungen aufrechtzuerhalten und damit die notwendigen Verweilzeiten und die gewünschte Glasqualität zu gewährleisten. Eine Variation der Temperaturen bzw. eine flexible Anpassung der Produkte und Produktionsmengen ist damit bei keinem Ofentyp möglich. Nicht optimal eingestellte Parameter im Prozess führen in der Regel zu mindestens ein bis zwei Tagen Ausschussproduktion, je nach Glastyp. Nach Aussagen der Glaswannenhersteller wurden bereits verschiedene Flexibilitätsoptionen geprüft, diese haben sich jedoch nicht als praktikabel erwiesen. Derzeit sind neue Ideen notwendig, um das Thema erneut aufzugreifen.

Ein theoretisches Energieflexibilitätspotenzial bieten jedoch hybride Schmelzöfen durch die Möglichkeit, innerhalb gegebener, enger Grenzen das Verhältnis von Strom und Gas als Energieträger zu variieren. Die Zeitachse dafür beträgt jedoch mehrere Stunden, da die Schmelze eine hohe thermische Trägheit und dazu eine hohe mittlere Verweilzeit (bei Behälterglas im Mittel ca. 24 h) besitzt. Große Wannen, die aufgrund des besseren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses energie-

	U-Flammenwanne	Querbeheizte Wanne	Rekuperative Schmelzwanne	Oxyfuel-Schmelzwanne	Vollelektrische Schmelzwanne
Status Quo	**Erdgasbefeuert:** Die Flamme brennt über dem Rohstoffgemisch ab, welches dadurch zum Schmelzen gebracht wird. **+ Elektrische Zusatzheizung („Boosting"):** Einbringen von bis zu 20 % der Wärmeleistung durch zusätzliche Elektroden von unten möglich. Derzeit v.a. für Tonnage-Anpassungen genutzt.				**„Cold-Top":** Geschlossene Rohstoffdecke und von oben eingeführte Elektroden
	ca. 12- 20 Jahre Lebensdauer Kapazitäten von > 1.000 t/d	ca. 12- 20 Jahre Lebensdauer Kapazitäten bis zu ~1.000 t/d	ca. 10 Jahre Lebensdauer Kapazitäten < 500 t/d	ca. 10-15 Jahre Lebensdauer Kapazitäten bis zu ~1.000 t/d	5-8 Jahre Lebensdauer Geringe Kapazitäten < 180 t/d

	Hybridwannen	Wasserstoffbefeuerte Wannen	Vollelektrische Schmelzwannen	Konventionelle Schmelzwanne + CO_2-Abscheidung
Transformationsoptionen	**Energieträger:** Erdgas (bzw. H_2) + Strom **Ziel:** Bis zu 80% Stromanteil am Gesamtenergiebedarf (Korridor: 20 bis 80%) **Derzeitige Lebensdauer:** bis zu 10 Jahre	Bisher lediglich limitierter Einsatz und nur für bestimmte Glasprodukte denkbar. So ist H_2 ist technisch bei Behälterglas besser einsatzbar als bspw. in der Floatglasherstellung	**Ziel:** Skalierung der Kapazitäten auf 300 - 400 t/d Der Einsatz wird zunächst in der Spezial- & Behälterglasproduktion erwartet, während es für Flachglas mittelfristig nicht absehbar ist.	Die nachgelagerten CO_2-Abscheidung an konventionellen Schmelzwannen ist in der Glasindustrie bisher nicht im industriellen Maßstab erprobt. Aussichtsreichste Schmelztechnologie ist dafür das Oxyfuel-Verfahren, da das entstehende Abgas überwiegend aus Wasserdampf und CO_2 besteht.

Abbildung 5-1: Vereinfachte Übersicht der Schmelzwannen im Status quo sowie möglich Transformationsoptionen. Lebensdauern und Kapazitäten hängen in der Praxis stark vom Glastyp und Produkt ab (siehe Abschnitt 5.2).

effizienter sind, reagieren dabei langsamer als kleine Wannen, die beispielsweise in der Spezialglasherstellung eingesetzt werden. Flexibilitätsintervalle, im Sinne von Abrufdauern und -häufigkeiten, sind damit lediglich im Mehrtages-Rhythmus denkbar. Hinzu kommt, dass ein Wechsel zwischen den Energieträgern immer Einfluss auf die Lebensdauer der Wanne hat und diese senkt.

Durch Produktwechsel können die Wannen im Bereich von +/- 10% Schmelzleistung variieren. Dies ist bereits über elektrische Boostingsysteme möglich. Aufgrund der Trägheit des Prozesses und da die Formgebung die Abnahme aus der Schmelzwanne vorgibt, ist Boosting als Flexibilitätsoption jedoch nur begrenzt einsetzbar.

Die Glaswanne als energieintensivste Anlage in der Glasherstellung weist somit ein geringes Energieflexibilitätspotenzial auf. Durch die Trägheit der Schmelze werden Anpassungen nur langsam über Zeitfenster von Stunden bis Tagen umgesetzt bzw. zukünftig umsetzbar sein. Eine kurzfristige Reaktion auf Strompreise ist damit nur sehr eingeschränkt möglich. Hybride Schmelzwannen setzen sowohl Strom als auch gasförmige Energieträger ein. Eine Anpassung der jeweiligen Energieträgeranteile ist jedoch nur mit An- und Abfahrrampen von langer Dauer möglich, um das Verhalten in der Glasschmelze kontrollieren zu können, und kommt damit praktisch nur für saisonale Anpassungen in Frage.

5.2 Perspektive der Glasproduzenten

Die grundlegenden Herausforderungen in Bezug auf Energieflexibilität sind für die Produzenten aus den Teilbranchen Flachglas, Behälterglas und Spezialglas gleich. Dennoch unterscheiden sich die individuellen Prozesse voneinander und haben jeweils eigene Anforderungen und Charakteristika, wie bereits die unterschiedlichen Eigenschaften der eingesetzten Schmelzwannen (Abbildung 5-2) andeuten.

5.2.1 Flachglasherstellung

Bei der **Flachglasherstellung,** beispielsweise für Fenster, PV-Module oder Glasgebäude, werden in der Schmelze Temperaturen von bis zu 1.600 °C benötigt. Nach der Läuterung beträgt die Auslasstemperatur ca. 1.100 °C. Anschließend wird die flüssige Schmelze für die Formgebung bei ca. 800 bis 1.000 °C auf das Float-Bad geleitet. Dieses verlässt das Glas mit einer Auslasstemperatur von ca. 600 °C. Das Produkt wird schließlich im elektrisch betriebenen Kühlofen kontrolliert auf ca. 60 bis 70 °C abgekühlt, um Spannungen im Glas abzubauen.

Die genutzten Schmelzwannen haben in der Praxis derzeit eine Kapazität von 1.000 t pro Tag und eine Lebensdauer von ca. zehn bis zwanzig Jahren, abhängig von den produzierten Flachglasprodukten. Die Schmelze kann für viele dieser Produkte durch elektrisches Boosting von unten unterstützt werden, wenn die entsprechende Anschlussleistung am Standort verfügbar ist. Die maximal mögliche Boosting-Unterstützung liegt nach derzeitigen Abschätzungen bei ca. 20% und ist noch nicht im industriellen Maßstab erprobt. Für einige bestimmte Flachglasprodukte ist elektrisches Boosting bisher nicht möglich. Aufgrund der geforderten Temperaturverteilung und notwendigen (Konvektions-)Strömungen in der Glasschmelze ist eine signifikante Änderung der elektrischen Zusatzleistung nur über Wochen möglich, um beispielsweise Blasenbildung zu verhindern. Die Flachglasproduktion unterliegt im Vergleich zu sonstigen Glasprodukten sehr hohen Reinheitsanforderungen im Bereich von 0,01 Gispen (Bläschen) pro 100 Gramm Produkt. In der tageweisen Betrachtung ist daher keine maßgebliche Energieflexibilität möglich. Saisonale Planung der Produktion wäre denkbar, jedoch dauern die entsprechend notwendigen Anpassungen ebenfalls Tage bis Wochen, so dass Tonnageänderungen möglichst selten stattfinden sollten. Auch der Einsatz von Wasserstoff als (ergänzender) Brennstoff ist in der Flachglasproduktion aufgrund der hohen Qualitäts- und Reinheitsansprüche nicht absehbar, da der hohe H_2O-Partialdruck zur Blasenbildung des Glases im Zinnbad führen würde.

Weitere Stromverbraucher sind insbesondere die Drucklufterzeuger, welche überwiegend für die Rohstoffentladung eingesetzt werden. Die zugehörigen Energiemengen sind jedoch, vor allem bei steigendem Stromanteil in der Glasproduktion, als sehr gering zu bewerten.

5.2.2 Behälterglasproduktion

Die **Behälterglasproduktion** wird in den konventionellen Schmelzwannen hauptsächlich mit Erdgas und bis zu 10 % elektrischem Boosting betrieben. Diese Wannen könnten bei entsprechender Verfügbarkeit bereits mit bis zu 20 % Wasserstoff als Beimischung befeuert werden und haben eine Lebensdauer von ca. 15 bis 18 Jahren. In der Pilotanlage „NextGen Furnace“ [9] soll zudem der Einsatz von bis zu 80 % Strom erprobt werden, derzeit werden ca. 60 % erreicht. Nach der Schmelze erfolgt die Formgebung über Pressen und Drucklufteinblasung. Anschließend wird ebenfalls über den Kühlofen, gas- oder elektrisch betrieben, teilweise auf max. 550 bis 600 °C aufgeheizt und kontrolliert über ca. 0,5-1,5 h abgekühlt, um Spannungen abzubauen. Auch hier ist die Prozesskette vollständig integriert und muss kontinuierlich betrieben werden, um die Temperaturstabilität und damit die Produktqualität nicht zu gefährden. Das Anfahren neuer Betriebspunkte in der Schmelzwanne kann bis zu vier Wochen in Anspruch nehmen.

Die hybride Schmelzwanne kann theoretisch im Korridor von jeweils 20 bis 80 % zwischen Strom und Gas variieren, ohne die Produktqualität zu beeinträchtigen. Jedoch dauert auch hier eine Einstellung einige Tage bis Wochen und könnte damit lediglich für saisonale Anpassungen genutzt werden. Der Wechsel von einem hohen Stromanteil zu einem hohen Gasanteil ist dabei

Flachglas	Schmelzwannen mit Kapazitäten von bis zu 1.200 t pro Tag	|	Lebensdauer: ca. 14 – 20 Jahre
Behälterglas	Schmelzwannen mit Kapazitäten von ~ 50 - 500 t pro Tag	|	Lebensdauer: ca. 10 – 18 Jahre
Spezialglas	i.d.R. kleinere Kapazitäten von ~ 40 kg bis 160 t pro Tag	|	Lebensdauer: ca. 4 - 6 Jahre

Abbildung 5-2: Status quo der Schmelzwanneneigenschaften nach Produktgruppe.

nach Aussagen der Schmelzwannenhersteller wie unter Abschnitt 5.1.2 beschrieben mit ca. 2 bis 3 Tagen schneller möglich als der Wechsel in die andere Richtung hin zu einem höheren Stromanteil. In ca. 8 bis 10 Tagen kann ein Stromanteil von 50 % erreicht werden, eine weitere Erhöhung dauert dann in der Regel Wochen bis Monate. Eine kurzzeitige Stromreduktion im Bereich der Regelleistung (15 min) ist teilweise möglich, muss dann jedoch über einen längeren Zeitraum hinweg elektrisch über den Normalbetrieb hinaus kompensiert bzw. durch Zusatzfeuerung überkompensiert werden und wird aufgrund von qualitativen Bedenken in der Regel vermieden. Die Übertragbarkeit dieser Energie-flexibilitätsoption auf andere Bereiche der Glasherstellung ist noch nicht geprüft. Im Vergleich zu Lebensdauern der konventionellen Schmelzwannen von ca. 10 bis 18 Jahren wird für die hybride Schmelzwanne im Behälterglasbereich eine Lebensdauer von 10 Jahren angestrebt.

Vollelektrische Schmelzwannen haben durch die abweichenden Strömungsverhältnisse und zum Teil höheren Temperaturen in der Schmelze eine geringere Lebensdauer von circa acht Jahren, wenn sie konstant und linear betrieben werden. Sie bieten jedoch keine Energieflexibilitätspotenziale, da der kontinuierliche Wärmeeintrag zum Aufrechthalten der Schmelze notwendig ist und Strom als einziger Energieträger zur Verfügung steht. Bei einer Reduktion der Stromzufuhr von bis zu 15 Minuten ist es zwar möglich, die Schmelze wieder einzustellen, jedoch ist dies immer auch mit Produktionsausschuss verbunden und jede Anpassung des Betriebspunkts verkürzt die Lebensdauer der Wanne weiter. Hinzu kommt, dass derzeit nicht alle Großtransformatoren für eine flexible Steuerung ausgelegt sind und durch einen reduzierten Betrieb beschädigt werden können. Flexible Großtransformatoren sind jedoch am Markt verfügbar [10].

In der Regel benötigen die Kernprozesse und Produktionslinien der Glasherstellung über 90 % des gesamten Energiebedarfs der Standorte. Die größten weiteren Stromverbraucher sind Druckluftkompressoren, Vakuumerzeugung und/oder elektrische Kühlöfen. Da alle Prozesse für die Produktion zeitkritisch verfügbar sein müssen, ist auch hier kein nennenswertes Energieflexibilitätspotenzial vorhanden.

5.2.3 Spezialglasproduktion

Für die **Spezialglasproduktion** werden alle Wannentypen (Oxyfuel, regenerative Wanne, vollelektrische Wannen sowie jeweils Hybridformen) je nach Anforderungen des zu schmelzenden Glases eingesetzt. Die Wannen sind in der Regel kleiner mit einer Kapazität von ca. 40 kg bis 160 t pro Tag und haben Lebensdauern von 4 bis 6 Jahren aufgrund der chemisch aggressiveren Rohstoffe und höheren Schmelztemperaturen von ca. 1.700 °C. Auch hier läuft der gesamte Prozess von der Rohstoffaufbereitung über die Glasschmelze, das Zieh- und Formgebungsverfahren bis zur Nachverarbeitung integriert und kontinuierlich ab. Die Teilprozesse müssen bis auf wenige °C genau gesteuert werden (teilweise auf wenige 0,1 K genau), um sowohl Anforderungen an die Glasqualität als auch an die Formgebungsverfahren mit Toleranzen im Hundertstel-Millimeterbereich zu erreichen. Diese Anforderungen sind im Spezialglasbereich deutlich fordernder als in den anderen Teilbereichen. Bei Freiformprozessen, z.B. bei der Fertigung von Röhrenglas als Ausgangsmaterial für die Herstellung pharmazeutischer Primärpackmittel, wird die Geometrie lediglich über die Konstanz des Masseflusses des Glases, die temperaturabhängige Viskosität der flüssigen Glasschmelze und über konstante Prozessbedingungen bestimmt. Der gesamte Prozess reagiert dabei sehr sensibel auf Veränderungen der Prozessparameter. So haben bereits einige Minuten Stromausfall mindestens einen Tag Produktionsverlust zur Folge. Durch die prozessbedingt langen Verweilzeiten von ca. drei bis fünf Tagen in der Schmelzwanne und die langen Totzeiten bis zur Einstellung eines neuen thermodynamischen Gleichgewichtes bei Prozessparameteranpassungen wirken sich alle Prozessänderungen bzw. -störungen im Zeitraum von über einer Woche aus.

Hybride Schmelzwannen werden derzeit vor allem für Farbgläser eingesetzt und haben einen Anteil von etwa 30 % Strom zu 70 % Erdgas. Bereits im Kopernikus SynErgie-Projekt wurden Praxisversuche durchgeführt, die jedoch ein verschwindend geringes Potenzial zeigen, wenn die Glasqualität nicht gefährdet werden soll. Vollelektrische Anlagen sind für ausgewählte Spezialglasprodukte ebenfalls möglich. Diese weisen jedoch keine Energieflexibilitätspotenziale auf.

Die Möglichkeit zur Bereitstellung von Minutenreserve durch Schmelzanlagen wurde ebenfalls untersucht. Eine Umsetzung war nicht möglich, da die Randbedingungen (Mindestleistung, Bereitstellungsdauer) nicht erfüllt werden können. Mittels Notstromaggregaten könnte sich in einigen Produktionsstätten an der Bereitstellung von Minuten- und zum Teil Sekundärreserve durch Dritte beteiligt werden. Saisonale Energieflexibilitätsoptionen sind in der Spezialglasbranche nicht umsetzbar, da die spezifischen Markt- und Kundenanforderungen zeitnah gedeckt werden müssen.

5.2.4 Nebenprozesse und Speicher

In den vor- und nachgelagerten Prozessen der Glasherstellung setzen sich dort, wo verfügbar, bereits zunehmend elektrische Lösungen aufgrund der besseren Effizienz durch. So gibt es für die Luft- und Gemengevorwärmung, die aktuell in der Regel durch die Verbrennungsabluft erfolgt, bereits (hybrid-)elektrische Lösungen. Für die Kühlöfen ist nach aktuellem Stand der Technik die elektrische Variante die beste verfügbare Technologie, jedoch überwiegen derzeit noch fossil betriebene Kühlbahnen. Für andere Prozessschritte, wie beispielswiese dem Vorhärten oder Schrumpfen, sind die elektrischen Möglichkeiten noch nicht verfügbar bzw. noch nicht wirtschaftlich einsetzbar.

Weitere Prozesse mit elektrischen Energieflexibilitätspotenzialen kommen zunehmend aus Wärmepumpen für die Gebäudeheizung. Mit steigender Elektrifizierung der Glasschmelzprozesse wird dieser Anteil am Gesamtstromverbrauch jedoch zunehmend irrelevant.

PV-Eigenerzeugung spielt für die Glasproduktionsstandorte aufgrund der geringen verfügbaren Flächen und Ertragspotenziale im Vergleich zu den aktuellen und zukünftigen Energiebedarfen der Standorte eine untergeordnete Rolle. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass eine Eigenerzeugung am Standort in der Regel marktdienlichen Energieflexibilitätsanreizen entgegenwirkt: Soll anhand von (Day Ahead) Preissignalen eine stärkere Stromabnahme der Industriekunden über die Mittagszeit zu niedrigen Preisen angereizt werden, entspricht das genau den Zeitfenstern, in denen auch die Eigenerzeugung vorrangig zum Eigenverbrauch genutzt wird und damit der Netzbezug eigentlich – wenn auch im Vergleich zum Gesamtenergiebedarf nur geringfügig – sinkt.

Unabhängig von den bereits vorhandenen bzw. zukünftig für die Glasherstellung benötigten Prozessen, besteht die Möglichkeit, Energiespeicher an den jeweiligen Produktionsstandorten zu errichten, um flexiblen Strombezug auszugleichen und eine kontinuierliche Produktion zu gewährleisten. In der Glasindustrie kommen dafür zwei Möglichkeiten in Frage, die jeweils mit den Glasproduzenten diskutiert wurden. Eine **Eigenerzeugung von Wasserstoff** zur Speicherung und Nutzung im Prozess bzw. Rückverstromung sehen die Glasproduzenten aufgrund der damit einhergehenden rechtlichen Anforderungen für grünen Wasserstoff nach der europäischen Renewable Energy Directive (RED), sowie der fehlenden Expertise im Elektrolysebetrieb kritisch und nicht praktikabel. Höhere Bereitschaft wird gegenüber **Batteriespeichern** gezeigt, jedoch ebenfalls mit starken Bedenken verbunden. Je nach wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen müsste im Einzelfall geprüft werden, ob ein Batteriespeicher am Standort wirtschaftlich betrieben werden könnte und gleichzeitig die erwarteten Energieflexibilitätsdienstleistungen bereitstellen kann. Eine marktdienliche Fahrweise sowie der Strom(-arbitrage-)handel[1] ist bisher kein (Kern-) Geschäftsbereich der Glashersteller, die in der Regel langfristige Stromeinkäufe tätigen. Neben den wirtschaftlichen Voraussetzungen sind standortspezifische Gegebenheiten zu berücksichtigen. Insbesondere historisch gewachsenen Glasproduktionsstandorten fehlt häufig der Platz für separate, dezentrale Batteriespeicherlösungen. Außerdem müssten die interne und vorgelagerte Netzinfrastruktur ertüchtigt werden, um sowohl die zukünftig voraussichtlich stark elektrifizierte Glasproduktion als auch Ladezyklen des Batteriespeichers hinsichtlich Energiebedarf und Anschlussleistung adäquat abdecken zu können. Entsprechende Netzausbau- und -anschlusszeiträume sind zu berücksichtigen. Sind die techno-ökonomischen Voraussetzungen für einen Batteriespeicher am Standort gegeben, erhöht ein Speicher die Versorgungssicherheit.

5.2.5 Gemeinsamkeiten und Fazit der Glasproduzenten

Trotz Unterschieden in den Details der einzelnen Glasproduktionsprozesse haben alle Teilbranchen gemeinsam, dass sowohl die Kernprozesse als auch die anschließende Formgebung kontinuierlich und ohne Schwankungen der Energieträgerzusammensetzung und der Temperatur gefahren werden müssen. Die Verarbeitungsschritte (Formgebung, Kühlung) müssen direkt im Anschluss erfolgen, solange die Schmelze bzw. Glastropfen noch formbar sind und strengen Temperaturgradienten folgen, um keine Spannungen im Produkt zu erhalten. Daher ist im Produktionsprozess keine Zwischenspeicherung möglich.

Weiterhin sind die Produktionsanlagen in allen Bereichen nur dann wirtschaftlich, wenn sie nahezu voll ausgelastet und durchgängig betrieben werden. Hinzu kommt die Konkurrenz mit zwei weiteren Zielstellungen: Zum einen führt eine flexible Fahrweise bzw. häufige Anpassung der Produktion zu einer sinkenden Energieeffizienz. Zum anderen erfordert das Ziel der Treibhausgasneutralität eine verstärkte Elektrifizierung der Glasproduktion. Damit einhergehend ist ein

[1] Stromarbitragehandel bezeichnet den gezielten An- und Verkauf von elektrischer Energie zu unterschiedlichen Zeiten, um von Preisschwankungen (Preisspreads) am Strommarkt zu profitieren. Strom wird günstig eingekauft, wenn die Preise niedrig sind (z. B. bei hoher Einspeisung erneuerbarer Energien), und teurer verkauft, wenn die Nachfrage steigt und die Preise entsprechend höher sind.

höherer, gleichmäßiger Strombezug bei ebenfalls höherer Anschlussleistung.

Energiespeicherung am Standort, beispielsweise durch Batteriespeicher, scheitert bisher nach Angaben der Unternehmen an der Wirtschaftlichkeit und Größe bei den erforderlichen Energiemengen. Zudem muss dafür die Infrastruktur am Standort in vielen Fällen ertüchtigt werden. Die Komplexität und die Steuerung der Energieinfrastruktur am Standort nimmt durch die Einbindung von Speichern, ggf. PV-Eigenerzeugung und Schmelzwannen zu. Genau wie eine mögliche Eigenerzeugung von Wasserstoff ist der Betrieb von Batteriespeichern mit entsprechender Vermarktung keine Kernkompetenz der Glashersteller.

Selbst bei vorhandener technischer Energieflexibilität erlaubt der Stromeinkauf der Glasproduzenten keine große Reaktion auf kurzfristige Preissignale, beispielsweise am Spotmarkt: Um dem Risiko von hohen, kurzfristigen Preisschwankungen bei zwingend notwendiger kontinuierlicher Stromversorgung der Produktionsanlagen vorzubeugen, wird der Großteil des Stroms langfristig einige Jahre im Voraus bezogen (Hedging).

Abschließend ist festzuhalten, dass Unterschiede zwischen den Produkten, Schmelzwannen und Standorten keine automatische Übertragbarkeit der Erkenntnisse von einem auf alle Glasproduktionsstandorte zulassen und die jeweils spezifischen Voraussetzungen und Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen.

6 Diskussion und Ausblick

Die Transformation der Glasindustrie führt zu einer steigendenden Elektrifizierung. Die Skalierung der entsprechenden Technologien ist noch nicht abgeschlossen, führt jedoch voraussichtlich zu keinen relevanten Energieflexibilitätspotenzialen. Batteriespeicher könnten Energieflexibilitätspotenziale außerhalb der eigentlichen Glasproduktion schaffen, sind aber nicht immer mit den standortspezifischen Voraussetzungen kompatibel.

Die Transformation der Glasindustrie geht mit einer starken Elektrifizierung einher. Der derzeitige Strombedarf von 3,8 TWh [11] wird sich je nach Transformationspfad mehr als verdoppeln. Noch sind nicht für alle Glasschmelzwannen bzw. -produkte vollelektrische Lösungen verfügbar oder befinden sich aktuell noch in der Skalierung. In der Entwicklung der hybriden oder vollelektrischen Schmelzwannen sind dabei Energieeffizienz, Schmelzkapazität und Produktqualität die relevanten Stellgrößen. Ein steigendes Energieflexibilitätspotenzial ist für diese Schmelzwannen nicht zu erwarten, da der Wärmeeintrag auch weiterhin konstant erfolgen muss.

Mit der steigenden Elektrifizierung einhergehend müssen entsprechende Anschlussleistungen an den Standorten ausgebaut werden, um den wirtschaftlich aber auch technisch bedingten kontinuierlichen Prozess der Glasschmelze zu betreiben. Sollten am Standort Batteriespeicher aufgebaut und betrieben werden, eröffnet dies Möglichkeiten zur Nutzung von Energieflexibilitätspotenzialen, geht aber gleichzeitig mit einer weiteren signifikanten Erhöhung der Anschlussleistung des Standortes einher. Die Glasproduzenten müssen in diesem Fall Know-how außerhalb ihres Kerngeschäftes aufbauen, um den Speicher wirtschaftlich und marktdienlich zu betreiben. Fraglich ist, ob eine marktdienliche, an Day-Ahead-Preisen ausgerichtete Fahrweise des Speichers auch in jedem Falle netzdienlich ist.

Aus Perspektive und nach den Erfahrungen der Glaswannenhersteller und Glasproduzenten sind die Energieflexibilitätspotenziale im Glasschmelzprozess technisch bedingt limitiert. Entsprechende Flexibilitätsanreize entfalten daher keine Wirkung. Im energieintensiven Prozess der Glasherstellung ist Energieeffizienz ein wichtiges Merkmal für eine wirtschaftlich kompetitive Glasproduktion. Anpassungen im Schmelzprozess gefährden nicht nur die Produktqualität, sondern mindern immer auch die Energieeffizienz.

Schlussfolgerungen für die Regulatorik

Steigende Anteile fluktuierender Stromerzeugung im Energiesystem können durch die Erschließung von Energieflexibilitätspotenzialen ausgeglichen werden. Im Sinne der Versorgungssicherheit und zur zunehmenden Integration der erneuerbaren Stromerzeuger in das Energiesystem ist es daher aus systemischer Perspektive sinnvoll, theoretisch vorhandene Energieflexibilitätspotenziale anzureizen. Bei der Ausgestaltung dieser Anreize sind jedoch die technischen Limitationen und Charakteristika der verschiedenen in Frage kommenden Prozesse zu berücksichtigen. Die energieintensive, zukünftig zunehmend elektrifizierte Glasproduktion muss kontinuierlich betrieben werden, um die Schmelze zu erhalten und die Schmelzwannen nicht zu beschädigen. Die sehr geringen, nur für einige Glasprozesse und nur kurzzeitig denkbaren Potenziale zur Lastverschiebung, d. h. eine Lastreduktion mit direkt anschließender (Über-)Kompensation, sind nicht zum Ausgleich von Tag-Nacht-Zyklen geeignet. Sie verursachen immer Produktausschuss und gehen mit dem Risiko einher, die Schmelze über Stunden bis Tage hinweg neu einstellen zu müssen. Regulatorische Anreize, die auf die Aktivierung praktisch nicht umsetzbarer Energieflexibilitätspotenziale abzielen, erzielen daher nicht die gewünschte Wirkung.

Außerhalb des Kernprozesses bieten Batteriespeicher die größte Möglichkeit zur Bereitstellung von Energieflexibilitätspotenzialen. Hierzu müssen jedoch die jeweiligen, individuellen Standortbedingungen wie Anschlussleistung, interne elektrische Infrastruktur oder Platzbedarf, berücksichtigt werden und zu erheblichen Einschränkungen dieser Option führen. Bei jeder standortspezifischen Investitionsentscheidung spielen Aspekte wie Dauer und Aufwand der Genehmigungsverfahren, Investitionszuschüsse, oder der Zeitraum zur Bereitstellung der Anschlussleistungen eine entscheidende Rolle. Eine systemdienlichere Alternative könnten stattdessen größere, zentrale Batteriespeicher außerhalb der Produktionsstandorte, beispielsweise an Netzknotenpunkten, darstellen. In jedem Fall müssen Rahmenbedingungen für den sowohl aus Akteursperspektive wirtschaftlichen Betrieb als gleichzeitig auch systemisch sinnvollen Einsatz der Batteriespeicher geschaffen werden.

Kernergebnisse der Studie

1

Vielfalt der Glasherstellung
Jeder Standort sowie jedes Produkt der Glasindustrie hat eigene, höchst individuelle Anforderungen und Voraussetzungen, um entsprechende Produktqualitäten zu erreichen. Insbesondere zwischen den einzelnen Teilbereichen Flachglas, Hohl-/Behälterglas und Spezialglas muss zwingend unterschieden werden.

2

Technisch bedingt: Geringe Energieflexibilitätspotenziale im Herstellungsprozess
Alle Glasproduktionsprozesse müssen kontinuierlich ablaufen, um das eingestellte thermische Gleichgewicht im Prozess und damit die gewünschte Produktqualität zu erhalten. Änderungen am Prozess haben direkten Einfluss auf die Produktqualität und führen in der Regel zu Ausschussproduktion. Durch die thermische Trägheit im Prozess sowie die zum Teil hohen Verweilzeiten in der Schmelze dauert es mehrere Tage bis Wochen, um Betriebspunkte einzustellen und ein nutzbares, den Qualitätsanforderungen entsprechendes Produkt zu erhalten.

3

Dekarbonisierung: Steigender Strombezug, gleichbleibend geringe Energieflexibilitätspotenziale
Die Dekarbonisierung der Glasindustrie basiert vor allem auf einer verstärkten Elektrifizierung, entweder durch vollelektrische oder hybride Schmelzwannen. Beide Technologien erhöhen den Strombezug der Produktionsstandorte signifikant. Weiterhin müssen die Prozesse jedoch kontinuierlich betrieben werden, um die Produktqualität aufrechtzuerhalten und die Anlage nicht zu schädigen. Dabei ist keine nennenswerte Energieflexibilität in der Leistungszufuhr vorhanden. Ein Wegfall der Bandlastprivilegierung verteuert den Strombezug erheblich und führt insbesondere bei hybriden Schmelzwannen dazu, dass der fossile Erdgaseinsatz die wirtschaftlichere Option ist. Das Ziel der Dekarbonisierung sollte durch entsprechende Anreize, auch in der Netzentgeltsystematik, priorisiert und unterstützt werden.

4

Flexibilität vs. Effizienz, Lebensdauer und wirtschaftliche Auslastung
Anpassungen der Betriebspunkte der Schmelzwanne nehmen in der Regel Stunden bis Tage, zum Teil bis Wochen, ein. Jede Anpassung ist mit Produktausschuss verbunden und verringert die Lebensdauer der Schmelzwannen und ggf. der Transformatoren. Um eine Schmelzwanne wirtschaftlich zu betreiben, muss diese bei möglichst langer Lebensdauer kontinuierlich unter Volllast ausgelastet sein. Jede Anpassung des Betriebspunktes verringert außerdem die Energieeffizienz der Schmelzwanne. Insbesondere hybride Schmelzwannen werden sowohl mit ihrer Wannengröße für die geplante Anzahl an Elektroden als auch in der Größe des Oberofens für die dazugehörige Gasflamme entsprechend eines optimalen Betriebspunktes auf maximale Effizienz ausgelegt und dimensioniert.

5

Kosten und wirtschaftliche Risiken im Stromeinkauf
Die durch den Wegfall der Bandlastprivilegien entstehenden Kosten sind nicht durch alternative Erlösmöglichkeiten, beispielsweise durch eine denkbare Vermarktung am Regelenergiemarkt, kompensierbar. Dazu ist das technisch mögliche Energieflexibilitätspotenzial zur Bereitstellung entsprechender Leistung zu gering. Hinzu kommt, dass die Baseload-Versorgung häufig je nach Risikobereitschaft der Glasproduzenten über langfristigen Stromeinkauf bereits mehrere Jahre im Voraus abgesichert wird, um sich gegen Preisrisiken abzusichern, und nur ein kleiner Teil über den Spotmarkt kurzfristig beschafft wird. Um auf Preissignale reagieren zu können, müsste der Stromeinkauf stärker am Spotmarkt ausgerichtet sein, was zu einem größeren Risiko der Abhängigkeit von kurzfristigen Preisschwankungen führt. Da die Prozesse kontinuierlich betrieben werden müssen und keine relevanten Energieflexibilitätspotenziale aufweisen, müsste dann auch bei kurzfristig hohen Preisen Strom bezogen werden.

7 Literaturverzeichnis

[1] Leisin, Matthias: Glas 2045 - Dekarbonisierung der Glasindustrie. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2022.

[2] Laufendes Projekt: Kopernikus SynErgie: Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung - Zweite Förderphase v4.0 (2019 - 2022). München: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2019.

[3] Leisin, Matthias: Branchensteckbrief der Glasindustrie. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), 2019.

[4] Gruber, Anna-Maria: Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien – Dissertation, eingereicht an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU München, durchgeführt an der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mBH: München, 2017

[5] VDI 5207 Blatt 1 - Energieflexible Fabrik - Grundlagen. Ausgefertigt am 2019-10, Version vom 2020-07; Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 2020.

[6] Ausfelder, Florian et al.: Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie - Methodik | Potenziale | Hemmnisse. München, Frankfurt/Main, Stuttgart: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2018.

[7] Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017

[8] ZeroCO2Glas: Entwicklung einer neuartigen, mit Wasserstoff befeuerten, Glasschmelzwanne mit dem Ziel einer CO2-neutralen Behälterglasproduktion. In https://www.iob.rwth-aachen.de/projekte/zeroco2glas/. (Abruf am 2024-09-12); Aachen: RWTH Aachen University, 2022.

[9] NextGen Furnace. In https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/dekarbonisierung-in-der-industrie/projekt/nextgen-furnace/. (Abruf am 2024-09-12); Cottbus: Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien, 2022.

[10] Transformateurs - Bernard Bonnefond. In https://www.bernardbonnefond.com/en/transformateurs/#VARIVOLT. (Abruf am 2025-8-12); Saint Etienne: BERNARD BONNEFOND, 2025.

[11] Jahreserhebung über die Energieverwendung im Verarbeitenden Gewerbe, im Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden - Tabelle 3: Energieverbrauch nach Energieträgern; Wiesbaden: Statisches Bundesamt (DESTATIS), 2025.

[12] Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzentgeltverordnung) (StromNEV). Ausgefertigt am 2005-07-25, Version vom 2022-07-20; Berlin: BMWK, 2022.

[13] Eckpunktepapier zur Fortentwicklung der Industrienetzentgelte im Elektrizitätsbereich. Berlin: Bundesnetzagentur, 2024.

[14] Bundesverband, Glasindustrie: DIE DEUTSCHE GLASINDUSTRIE AUF EINEN BLICK: 2023 UND 2024. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie, 2025.

[15] BV Glas stellt Roadmap zur Klimaneutralität vor. Düsseldorf: Bundesverband Glasindustrie e.V., 2022.

[16] Nutzenergiebilanz: Energieflussbild der Bundesrepublik Deutschland 2023: https://www.bdew.de/media/documents/1_Energieflussbild_Deutschland_2023_TWh_detailliert.svg; Berlin: BDEW, AGEB, HEA, FfE, 2025.

[17] Flexmelter. In https://www.sorg.de/de/melting/flexmelter/. (Abruf am 2025-07-01); Lohr am Main: Nikolaus SORG GmbH & Co. KG, 2025.

www.ffe.de