







Stuttgart, Düsseldorf, November 2022



Zitationsvorschlag:

Leisin, Matthias; Radgen, Peter: Glas 2045 - Dekarbonisierung der Glasindustrie. IER, Universität Stuttgart, Studie im Auftrag des Bundesverband Glasindustrie e.V., Stuttgart, 2022.

Copyright Flachglasfoto:

Crédit: The European Patent Office in Rijswijk designed by Ateliers Jean Nouvel and Dam & Partners Architecten. Copyright: European Patent Office. Photo by Ossip van Duivenbode.

Copyright Foto: SCHOTT AG

Vorwort der Autoren

Energieeffizienz, Klimaschutz und erneuerbare Energie sind die Schlüsselwörter für eine nachhaltige Entwicklung.

Alle Sektoren und damit auch die Glasindustrie müssen zum Gelingen der erforderlichen Transformation beitragen. Der Bundesverband Glasindustrie als Verband der Glashersteller in Deutschland hat uns im Herbst 2021 beauftragt eine Roadmap zu erstellen, welche die erforderlichen Transformationsschritte ermittelt, damit die Glasindustrie die weitgehende Dekarbonisierung bis zum Jahr 2045 erreichen kann. Dabei startet die Analyse des Transformationsprozesses mit einer standortgenauen Analyse der Ist-Situation, von der ausgehend für jeden einzelnen Standort mögliche Konzepte hinsichtlich Technik und zeitlicher Umsetzung betrachtet wurden. Dies war möglich, da der überwiegende Teil der Glashersteller bereit war, uns im Rahmen des Roadmap-Prozesses die erforderlichen Daten zur Verfügung zu stellen. Für das damit zum Ausdruck gebrachte Vertrauen der Unternehmen möchten wir uns an dieser Stelle nochmals explizit bedanken.

Es dürfte allen Beteiligten klar sein, dass der vollständige Umbau der Glasindustrie zur Dekarbonisierung nicht ohne zusätzliche Kosten umgesetzt werden kann. Die Anpassungen und Weiterentwicklung der Glasherstellung erfordert erhebliche Anstrengungen durch die Unternehmen in einem schwierigen Marktumfeld mit vielen Unsicherheitsfaktoren.

Potentiale im Bereich der Kreislaufwirtschaft sind bereits zu großen Teilen umgesetzt und tragen damit schon heute zu einer Reduzierung der Emissionen bei. Der Werkstoff Glas kann bei ausreichender Sorten- und Farbreinheit beliebig oft und ohne Qualitätsverlust wiederverwendet werden. Bessere Sortier- und Aufbereitungsverfahren werden es ermöglichen, den Recyclinganteil schrittweise weiter zu erhöhen.

Der wesentliche Schlüssel für die Dekarbonisierung in der Glasindustrie liegt im Wechsel der Energieträger für die Bereitstellung der thermischen Energie durch Strom und grüne Gase (Wasserstoff, Biogas, synthetisches Methan). Die Umstellung der Prozesse erfordert vielfach den Aufbruch in technisches Neuland, da Lösungen bisher noch nicht oder nicht in der erforderlichen Größe eingesetzt werden. Nicht übersehen werden dürfen die bei der Glasherstellung zwangsläufig anfallenden prozessbedingten Treibhausgasemissionen, für die es bis heute noch keine Lösungen gibt. Aktuell und vermutlich auch zukünftig ist in Deutschland die langfristige Speicherung von CO2 nicht zulässig. Darüber hinaus gibt es auch keine Infrastrukturen für den Transport zu geeigneten Lagerstätten im Ausland. Eine Nutzung oder der Abtransport des CO₂ erscheint an einigen Glasstandorten potenziell denkbar, lässt sich aber nicht auf alle Standorte übertragen. Die Umstellung der Produktionsprozesse in der Glasindustrie auf CO2 freie Energieträger erfordert zusätzliche Investitionen von 2 bis 5 Milliarden Euro bis 2045.

Gleichzeitig steigen trotz Effizienzgewinnen durch die neuen Technologien die Energiekosten deutlich an. Als im europäischen und teilweise auch im internationalen Wettbewerb stehende Branche kann die Glasindustrie Kostensteigerungen im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung nicht oder nur begrenzt an die Endkunden weitergeben.

Seit Beginn des Roadmap-Prozesses im Jahr 2021 haben sich die Rahmenbedingungen zusätzlich drastisch verändert. Auch wenn sich durch den Einmarsch Russlands in der Ukraine die Preise des Energieträgers Erdgas zum Teil verzehnfacht haben, so sind auch die Preise der anderen Energieträger, wenn auch etwas verzögert, in ähnlicher Weise gestiegen. Erst der zukünftige massive Ausbau erneuerbarer Energien wird dazu beitragen, die Wettbewerbssituation der umweltfreundlichen Technologien in der Glasindustrie zu verbessern. Der Anstieg der Strompreise ist bereits moderater als bei den Gaspreisen ausgefallen. Dies eröffnet neue Spielräume für das zeitliche Vorziehen von Investitionen für das elektrische Schmelzen.

Der Staat sollte diese grüne Transformation der Glasindustrie mit Investitions- und Betriebsbeihilfen unterstützen. Damit kann der Transformationsprozess abgesichert, beschleunigt und gleichzeitig den Glasunternehmen in Deutschland die erforderliche Investitionssicherheit gegeben werden.

Stuttgart, den 30.11.2022

Inhalt

1 Zusammenfassung und Ergebnisse	4
2 Einführung und Ziele der Roadmap	11
3 Übersicht der deutschen Glasindustrie und Herausforderungen 3.1 Branchenstruktur 3.2 Herausforderung Dekarbonisierung	13
4 Methodik und Vorgehensweise des Roadmap-Prozesses 4.1 Fokussierung auf wichtigste Branchen und den Schmelzprozess 4.2 Ablauf und Grundlagen des Roadmap-Prozesses	21
5 Dekarbonisierungstechnologien	29
5.1 Vollelektrische Schmelzwanne	
5.2 Einsatz von treibhausgasneutralen Gasen	
5.3 Hybridwannen	
5.4 Oxy-Fuel-Wanne und CCU und/oder CCS	
5.5 Einsatz kohlenstoffarmer und kohlenstofffreier Rohstoffe	
6 Transformationspfade	47
6.1 Rahmenbedingungen und grundlegende Annahmen	
6.1.1 Ausgangslage der Glasindustrie als Startpunkt der Transformation	
6.1.2 Annahmen zur Entwicklung der deutschen Glasindustrie	
6.1.3 Entwicklung der Infrastruktur und Netze	
6.1.4 Entwicklung Energieträgerpreise und CO2-Zertifikate	
6.2 Referenzpfad	
6.3 Treibhausgas-Minderungspfad Elektrifizierung	
6.4 Treibhausgasminderungspfad Wasserstoff	
6.5 Treibhausgasminderungspfad Hybridszenario	
6.5.1 Behälterglas	
6.5.2 Flachglas	
6.5.3 Gebrauchs- und Spezialglas	
6.5.4 Gesamte Glasbranche	
6.6 Vergleichende Darstellung der Ergebnisse	
6.6.1 Minderung der CO ₂ -Emissionen	
6.6.2 Strom- und Wasserstoffbedarf	
6.6.3 Erforderliche Investitionen für die Transformation	

7 Politische Handlungsoptionen und Empfehlungen	88
7.1 Handlungsoptionen	
7.2 Handlungsempfehlungen	
7.2.1 Sicherstellung der Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger	
7.2.2 Ausbau der Energieinfrastrukturen	
7.3 Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der Deutschen Glasindustrie	
7.3.1 Klimaschutzverträge - Carbon Contracts for Difference (CCfD)	
7.3.2 Investitionsförderung für die dekarbonisierte Glasproduktion	
7.4 Stand der Umsetzung	
8 Literaturverzeichnis	94
9 Anhang	96
9.1 Beteiligung der Glasunternehmen an der Darstellung des Status Quo	
(Teilnahme an Fragebogen)	
9.2 Prognostizierte Entwicklung der Energieträger und CO2-Zertifikate	
9.3 Entwicklung des Stromsektors bzw. CO2-Emissionsfaktors für Strom	

1 Zusammenfassung und Ergebnisse

Deutschland hat sich auf den Weg gemacht bis 2045 treibhausgasneutral zu werden.

Das erfordert Anstrengungen in allen Sektoren.

Insbesondere im Bereich der Industrie stellen sich hier spezifische Herausforderungen, nicht nur hinsichtlich des Einsatzes neuer Technologien, sondern auch beim Erhalt der wirtschaftlichen Stärke der deutschen Industrie. Ohne eine erfolgreiche Dekarbonisierung des Industriesektors wird es keine erfolgreiche Energiewende in Deutschland geben. Insbesondere die energieintensiven Zweige der Industrie, zu welcher die Glasindustrie gehört, stellt dieser komplexe Transformationsprozess vor große Herausforderungen.

Die Glasindustrie mit ihren ungefähr 400 Betrieben ist eine der bedeutendsten Industriebranchen in Deutschland und gehört mit ca. 56.000 Beschäftigten zu den größten Sektoren der Industrie. Im Jahr 2021 erwirtschaftete die deutsche Glasindustrie einen Umsatz von knapp 10 Mrd. Euro.

Der Glassektor mit seiner breiten Produktpalette und vielfältigsten Anwendungsfeldern weist eine heterogene Struktur auf. Zum Produktportfolio gehören Gläser wie Behälterglas für Nahrungsmittel und Kosmetik, Flachglas für den Gebäudebereich sowie Spezial- und Gebrauchsgläser. In diesen Teilbranchen kommen sehr unterschiedliche Technologien zum Einsatz, wodurch die Dekarbonisierung zusätzlich an Komplexität gewinnt. Jährlich werden in Deutschland ca. 7,4 Millionen Tonnen Glas hergestellt. Der größte Anteil hiervon entfällt auf die Behälterglasindustrie (4,1 Millionen Tonnen pro Jahr), gefolgt von der Flachglasindustrie (2,1 Millionen Tonnen pro Jahr). Der Sektor Spezial- und Gebrauchsglas ist aufgrund der Bedeutung der hergestellten Produkte sowie der hohen Wertschöpfung eine weitere Kernbranche der Glasindustrie. Für die Entwicklung der Dekarbonisierungsroadmap für die deutsche Glasindustrie wurden deshalb

die Teilbranchen Behälterglas, Flachglas sowie Spezial- und Gebrauchsglas jeweils eigenständig analysiert.

Bei der Herstellung von Glas in Deutschland entstehen jährlich ca. 4 Millionen Tonnen CO₂. Diese sind im Wesentlichen der Befeuerung der Schmelzwannen mit Erdgas sowie den prozessbedingten Emissionen durch die chemischen Reaktionen der eingesetzten Rohstoffe zuzuordnen. In den drei untersuchten Branchen werden zum Untersuchungszeitpunkt 55 Produktionsstandorte mit insgesamt 122 Schmelzwannen zur Glasherstellung betrieben, vergleiche Abbildung 1.

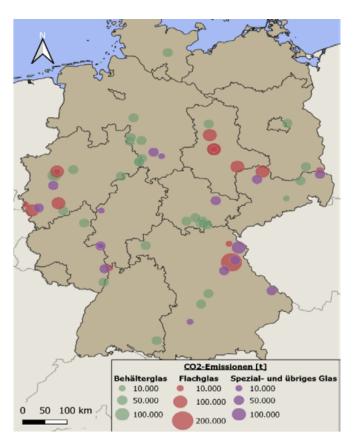


Abbildung 1: Deutsche Glaswerke mit zugehörigen CO₂-Emissionen im Jahr 2019

Die Glasindustrie verzeichnet seit Jahrzehnten Fortschritte bei der Reduzierung des Energieverbrauchs und der CO2-Emissionen durch die Glasherstellung. Die bis 2045 erforderlichen Schritte zur Dekarbonisierung sind jedoch nicht alleine durch weiter stattfindende inkrementelle Verbesserungen zu erzielen. Die geforderte signifikante Reduktion der Emissionen ist nur durch die Umstellung der Herstellprozesse auf innovative und ${\rm CO}_2$ -neutrale Schmelzverfahren zu erreichen.

Diese notwendige technologische und zum Teil disruptive Umrüstung der Glaswerke stellt die Glasindustrie vor eine große Herausforderung. Die Glasproduktionsstandorte wurden über einen langen Zeitraum auf einen Betrieb mit gasförmigen Brennstoffen ausgelegt und optimiert. So sind mittlerweile der Großteil der internen Produktionsschritte energetisch miteinander verbunden und nutzen beispielsweise die Abwärme der heißen Abgase aus den Schmelzwannen.

Eine erfolgreiche Dekarbonisierung wird dabei nur gelingen, wenn die ökonomischen Auswirkungen des Einsatzes von dekarbonisierten Schmelzverfahren die Wettbewerbsfähigkeit der Glasindustrie nicht negativ beeinflussen. Investitionen in innovative und CO2-neutrale Schmelzverfahren, die zu einem grundlegenden Umbau und Ersatz des gegenwärtigen Anlagenparks führen, dürfen kurz und mittelfristig nicht zu Wettbewerbsnachteilen führen. Die Belastungen durch die deutlich höheren Kosten der neuen Technologien sollten ganz oder zumindest teilweise ausgeglichen werden. Dies gilt auch für erhöhte Betriebskosten durch die im Vergleich zum Erdgas deutlich teureren, aber emissionsfreien Energieträger Strom und Wasserstoff. Durch den internationalen Wettbewerb bei der Glasherstellung kann die Glasindustrie die Mehrkosten nur selten direkt an die Endabnehmer weitergeben, die ökonomischen Auswirkungen der erforderlichen Transformationsprozesse stellen deshalb die deutschen Glashersteller vor eine existenzielle Herausforderung.

Methodisches Vorgehen

Die Dekarbonisierung der deutschen Glasindustrie wurde detailliert für die einzelnen Produktionsstandorte analysiert und aufbereitet. Auf Basis von Betriebsdaten wurden die Glaswerke der Branchen Behälterglas, Flachglas sowie Spezial- und Gebrauchsglas über deren Produktions-

charakteristika wie Wannenanzahl, Wannenart, Produktionsmengen und Energieverbrauch in einem Transformationsmodell analysiert. Die Auswahl von geeigneten Dekarbonisierungsmaßnahmen für die jeweiligen Standorte wurde anhand der folgenden drei Kriterien vorgenommen:

- Verfügbarkeit und Eignung der Technologie für das zu fertigende Glasprodukt
- Verfügbarkeit der geeigneten (Energie-) Infrastruktur für den Einsatz emissionsfreier Energieträger
- Bereits kommunizierte oder geplante Dekarbonisierungsmaßnahmen der Glashersteller

Für die Analyse im Rahmen des Roadmapprozesses wur-den 4 Szenarien mit unterschiedlichen energetischen Schwerpunkten entwickelt. Im Referenzszenario ("BAU") werden keine wesentlichen Veränderungen gegenüber dem aktuellen Stand der Technik in den einzelnen Glaswerken unterstellt. Dieses Szenario dient als Vergleichsrahmen für die Analyse der alternativen Entwicklungspfade, für die die Veränderungen im Bereich Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Kosten gegenüber dem Referenzszenario berechnet wurden.

Für die Analyse wurden die beiden Extremszenarien ("Elektrifizierung" und "Wasserstoff") erstellt, in welchen der Schwerpunkt auf Technologien mit Einsatz von Strom bzw. Wasserstoff gelegt wurde. Einen mittleren Transformationspfad bildet das "Hybridszenario" ab, für das kein exogener Schwerpunkt auf einen Energieträger oder eine Technologie vorgegeben wurde, sondern alle betrachteten Dekarbonisierungsmaßnahmen zum Einsatz kommen können.

Kernergebnisse

Der Einsatz und die Gewichtung der untersuchten Dekarbonisierungsmaßnahmen variieren je nach Transformationspfad. Tabelle 1 fasst die Kernergebnisse für die vier untersuchten Szenarien zusammen.

Für das Hybridszenario zeigt Abbildung 2 die Entwicklung der Produktionskapazitäten je Technologie bis 2045. Die heute betriebenen Technologien werden dabei bis 2045 vollständig durch Hybridwannen, Super-Hybridwannen und vollelektrische Schmelzwannen ersetzt. In den Hybrid- und

Transformationspfad		(S) BAU	<i>J</i> Elektrifizierung	(H _J) Wasserstoff	CO ₂) Hybridszenario
Anzahl Wannen	Konventionell	115	0	0	0
	Elektrisch	7	108	21	36
	Hybrid (H ₂)	0	1	96	7
	Super-Hybrid (H ₂)	0	13	5	79
Energieverbrauch [PJ/a]	Erdgas	43,3	0,0	0,0	0,0
	Wasserstoff	0,0	2,8	28,4	8,7
	Strom	7,0	31,3	15,5	30,0
	Gesamt	50,3	34,1	43,9	38,7
CO2-Emissionen [Mio. t/a]	Energiebedingt	2,4	0,0	0,0	0,0
	Prozessbedingt	0,8	0,8	0,8	0,8
Kumulierte Investitionen [Mrd. €]		1,6	5,6	3,2	4,9

Tabelle 1: Kernergebnisse für das Jahr 2045 der vier betrachteten Szenarien BAU, Elektrifizierung, Wasserstoff und Hybridszenario

Super-Hybridwannen wird als gasförmiger Energieträger bis spätestens 2045 auf Wasserstoff umgestellt, sodass die energiebedingten $\rm CO_2$ -Emissionen bei der Glasherstellung auf null zurückgehen.

Infolge des Austausches der konventionellen Schmelzwannen durch ${\rm CO_2}$ -neutrale Schmelztechnologien wird der Erdgasverbrauch bis 2045 vollständig durch die grünen Energieträger Strom und Wasserstoff substituiert. Der Strombedarf steigt je nach Szenario auf 15,5 – 31,3 PJ und der Wasserstoffbedarf auf 2,8 – 28,4 PJ pro Jahr.

Der Einsatz der Energieträger Strom und Wasserstoff führt zu einem vollständigen Entfall der energiebedingten $\rm CO_2$ -Emissionen. 2045 verbleiben lediglich prozessbedingte $\rm CO_2$ -Emissionen in Höhe von 780.000 Tonnen pro Jahr aufgrund mangelnder Alternativen bei den Rohstoffen. Für die Vermeidung prozessbedingter Emissionen wären Infrastrukturen für Transport und Speicherung von $\rm CO_2$ erforderlich, die bis 2045 an den meisten Glaswerken nicht verfügbar sein werden. Für die Glasindustrie ist deshalb bis 2045 keine vollständige Dekarbonisierung möglich, sondern lediglich eine Reduktion der $\rm CO_2$ -Emissionen um 79 %.

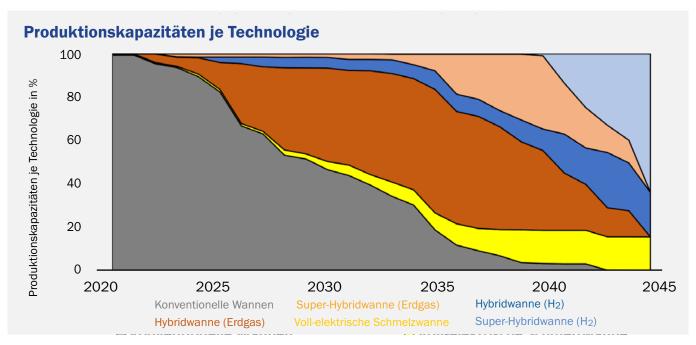


Abbildung 2: Entwicklung der Produktionskapazitäten je Technologie in den Branchen Behälterglas, Flachglas sowie Spezial- und Gebrauchsglas im Hybridszenario

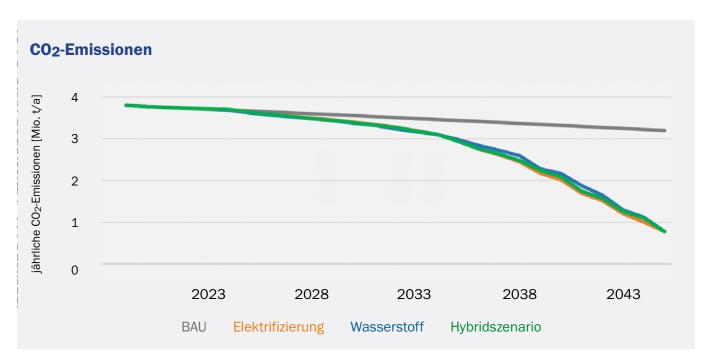


Abbildung 3: Entwicklung der jährlichen CO2-Emissionen in den vier betrachteten Szenarien BAU, Elektrifizierung, Wasserstoff und Hybridszenario

Zur Umrüstung des aktuellen Anlagenparks der Glasindustrie auf Hybrid- und vollelektrische Schmelzwannen sowie zur Anpassung der betriebsinternen und der vorgelagerten Energieinfrastrukturen sind Investitionen in Höhe von 3,2 – 5,6 Milliarden Euro bis 2045 erforderlich. Diese Investitionssumme übersteigt die Kosten im Referenzszenario (BAU) um den Faktor 2 bis 3,5. Die untere Grenze von 3,2 Milliarden Euro gibt den Investitionsbedarf im Wasserstoff-Szenario wieder und ist auf den deutlich geringeren Aufwand zur Umstellung der Schmelzwannen und der umliegenden Energieinfrastruktur durch eine Anpassung der bestehenden Gasleitungen zurückzuführen. Die Umsetzung ist allerdings aufgrund der schwer abschätzbaren flächendeckenden Wasserstoffverfügbarkeit mit Unsicherheiten behaftet.

Die Umsetzung der aufgezeigten Transformationspfade stellt die Unternehmen der Glasindustrie neben technischen zusätzlich auch vor ökonomische und regulatorische Herausforderungen. Die Vorgabe der Klimaneutralität bis 2045, die in Deutschland mit dem Klimaschutzgesetz rechtlich verankert wurde, setzt ein klares Ziel. Zum Erreichen dieses Klimaziels sollten geeignete Rahmenbedingungen geschaffen werden, die eine Transformation ermöglichen und eine Abwanderung oder Betriebsstillegungen verhindern.

Dies betrifft dabei nicht nur finanzielle Aspekte, sondern insbesondere auch den Ausbau der erforderlichen Energieinfrastrukturen zur Bereitstellung der CO₂ neutralen Energieträger. Diese müssen in ausreichender Menge und zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitstehen. Die Dekarbonisierung der Glasherstellung wird zu einem Anstieg der spezifischen Produktionskosten führen. Ein Ausgleich der betrieblichen Mehrkosten durch Klimaschutzverträge (CCfD) und/oder eine Investitionsförderung zur Umsetzung von Dekarbonisierungsmaßnahmen sind besonders geeignet, die finanziellen Belastungen der Unternehmen durch die Herausforderungen der Dekarbonisierung abzufedern.

2 Einführung und Ziele der Roadmap

Der Industriesektor ist eine tragende Säule für den Erfolg und Wohlstand in Deutschland.

Gleichzeitig gehört er neben dem Energiesektor auch zu den größten CO₂-Emittenten des Landes.

Im Rahmen der Pariser Klimakonferenz im Jahr 2015 hat sich die Mehrheit der Industriestaaten dazu verpflichtet, den Ausstoß von Treibhausgasen deutlich zu reduzieren und die Weltwirtschaft klimafreundlicher zu gestalten (BMUV 2015). In Deutschland führt dies seit Jahren zu einer Transformation des Energiesystems weg von fossilen und hin zum Einsatz Erneuerbarer Energieträger. Dies senkt die CO₂-Emissionen und soll zur Klimaneutralität des Energiesektors führen.

Auch die übrigen Verbrauchssektoren Verkehr, Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte müssen ihren Beitrag zum Erreichen des Ziels Treibhausgasneutralität bis Mitte des Jahrhunderts leisten. Dies wurde 2021 nach dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts in der Neufassung des Klimaschutzgesetzes verankert, welches das Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 vorgibt und den Staat dadurch verpflichtet, das uneingeschränkte Ausleben der Freiheitsgrundrechte zukünftiger Generationen zu gewährleisten. (Bundesministerium der Justiz 2021).

Für den Industriesektor bedeutet dies, dass ein nahezu vollständiger Umbau, Rückbau und Neubau der aktuell betriebenen Produktionsanlangen innerhalb der nächsten zwei Jahrzehnte umzusetzen sind, um die Klimaziele zu erreichen.

Die Glasindustrie gehört zu den energieintensiven Industriesektoren in Deutschland. Zur Glasindustrie gehören die Herstellung von Behälterglas, Flachglas, Gebrauchs- und Spezialglas sowie Glasfasern. Bei der Herstellung dieser Produkte kommen hauptsächlich Erdgas und Strom als Energieträger zum Einsatz, was direkte CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Gas und indirekte CO₂-Emissionen

durch den Einsatz von Strom verursacht. Für die Herstellung von Glas wurden über Jahrzehnte die verbrennungsbasierten Produktionsverfahren ausgelegt und optimiert. Eine Dekarbonisierung durch eine disruptive Prozessumstellung auf neue Verfahren mit anderen Energieträgern, wie bspw. eine Elektrifizierung der Schmelzwannen, ist mit erheblichem Aufwand und Herausforderungen verbunden.

Trotz dieser Herausforderungen ist klar, dass es gilt, einen gangbaren Weg zu skizzieren, auf dem die kontinuierliche und schrittweise Umsetzung hin zu einer weitestgehenden Defossilierung der Energiebereitstellung erreicht werden kann.

Die vorliegende Roadmap stellt mögliche Szenarien zur CO2-Reduktion bis zum Erreichen der Treibhausgasneutralität der deutschen Glasindustrie im Jahr 2045 dar. Hierzu werden verschiedene mögliche Dekarbonisierungspfade aufgezeigt und transparent dargestellt. Die Analysen wurden standortscharf für die derzeitigen Glaswerke durchgeführt, sofern die Daten bereitgestellt oder ermittelt werden konnten. Ziel der Roadmap ist es, möglichst realistische Transformationspfade aufzuzeigen, die sowohl technische Restriktionen, aber auch ökonomische Parameter berücksichtigen.

Die Ergebnisse dieser Roadmap sollen sowohl den Glasunternehmen in Deutschland als auch den politischen Entscheidern als Orientierungshilfe bei der Planung und Gestaltung der anstehenden Dekarbonisierung in der Glasindustrie helfen, sachgerechte Entscheidungen zu treffen. Das Ziel einer Roadmap kann dabei niemals sein, einen genauen Fahrplan zu erstellen, sondern die verschiedenen Optionen zur CO₂-Minderung und deren Auswirkungen

auf den Energieverbrauch, die CO₂-Emissionen sowie die Betriebs- und Investitionskosten qualitativ zu beschreiben und in ihren Wirkungen quantitativ abzuschätzen.

Aufbauend auf den berechneten Auswirkungen beim Beschreiten der Transformationspfade werden notwendige Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Transformation der Glasindustrie identifiziert und ausgearbeitet. Diese zeigen auf, welche Unterstützung die Glasindustrie beim Transformationsprozess hin zur Treibhausgasneutralität benötigt und mit welchen Politikinstrumenten dieser Prozess sinnvollerweise begleitet werden sollte.

Diese Roadmap soll zudem dazu beitragen, für die Diskussion über Herausforderungen der Glasunternehmen, aber auch der Gesellschaft in Deutschland infolge des Dekarbonisierungsprozesses zu sensibilisieren. Hierzu wird gezielt auf den Aufwand und mögliche Hemmnisse zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes beim Glasherstellungsprozess hingewiesen. Die disruptive Veränderung eines bestehenden und laufenden Produktionsprozesses wird Aus-

wirkungen auf den Energieeinsatz in jedem Glaswerk in Deutschland und somit auch auf die umliegende Energieinfrastruktur sowie auf vor- und nachgelagerte Prozessschritte haben.

Diese Roadmap ist im Auftrag des Bundesverbandes Glasindustrie (BV Glas) entstanden. Die zugrundeliegenden Annahmen sowie Ergebnisse der einzelnen Fragestellungen wurden in intensiven Diskussionen mit dem Begleitkreis, bestehend aus Mitgliedsunternehmen des BV Glas, erarbeitet. Darüber hinaus wurden intensive Gespräche mit einzelnen Glasherstellern und Anlagenbauern geführt.

Die vorliegende Roadmap stellt mögliche Szenarien zur CO₂-Reduktion bis zum Erreichen der Treibhausgasneutralität der deutschen Glasindustrie im Jahr 2045 dar.

3 Übersicht der deutschen Glasindustrie und Herausforderungen

Die industrielle Herstellung und Weiterverarbeitung von Glas hat sich im 19. Jahrhundert in Europa angesiedelt und etabliert.

Die Glasindustrie in Deutschland hatte dabei einen starken Einfluss auf die Weiterentwicklung und Optimierung des Herstellungsprozesses und gehört auch heute noch zu den forschungsstärksten Branchen weltweit. Hierdurch können immer hochwertigere und anspruchsvollere Glasprodukte erzeugt werden, welche sowohl im alltäglichen Gebrauch als auch in speziellen Anwendungen weltweit eingesetzt werden und dies bei einem deutlichen Rückgang des Energieeinsatzes.

Trotz dieser Fortschritte bleibt der Glasherstellungsprozess energie- und emissionsintensiv und so sieht sich die Glasindustrie mit der Herausforderung konfrontiert, die Prozesse und Abläufe zur Herstellung von Glas bis 2045 vollkommen umzugestalten und vollständig treibhausgasneutral zu gestalten.

3.1 Branchenstruktur

Die Glasindustrie zählt zu den energieintensiven und umsatzstärksten Industriesektoren in Deutschland und ist damit eine wichtige Säule des Industriestandorts Deutschland. Im Jahr 2019 waren insgesamt 56.000 Beschäftigte in 394 Betrieben angestellt. In diesen Betrieben wurden insgesamt 7,46 Mio. Tonnen Glas jeglicher Form mit einem Produktionswert von 9,48 Mrd. Euro hergestellt. (2021 BV-Glas-Jahresbericht 2020).







Abbildung 4: Kennzahlen der deutschen Glasindustrie (2019)

Das Produkt Glas ist ein universeller Gebrauchs- und Baustoff und kann in den unterschiedlichsten Bereichen eingesetzt werden. Einzelne Glasprodukte können anhand ihrer Eigenschaften, der chemischen Zusammensetzung oder den Anwendungsfeldern klassifiziert werden. Im Rahmen dieser Analyse wird der Fokus auf die in Tabelle 2 aufgelisteten Glasprodukte gelegt. Auf diese entfällt sowohl von der produzierten Menge, dem erzielten Umsatz, dem Energieeinsatz sowie den anfallenden CO₂-Emissionen der Hauptanteil der Glasindustrie. Die Kategorisierung der Glassorten orientiert sich an der Einordnung des Bundesverbands Glasindustrie (2021 BV-Glas-Jahresbericht 2020).

Behälterglas	Verpackungsglas für Getränke und Nahrungsmittel Verpackungsglas für Kosmetik und Arzneimittel
Flachglas	Floatglas
Gebrauchs- und Spezialglas	Technische Gläser Wirtschaftsgläser ¹ Wasserstoffglas

Tabelle 2: Wesentliche Produktgruppen der Glasindustrie

Im Rahmen der durchgeführten Analysen wurden die Produktionsstätten (tägliche Produktionsmenge größer als 10 Tonnen verkaufsfähiges Glas) von Behälterglas, Flachglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas in Deutschland untersucht, welche in der Liste der emissionshandelspflichtigen Anlagen der Deutschen Emissionshandelsstelle geführt werden. (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt).

In Abbildung 5 sind die betrachteten Glasstandorte geographisch mit den zugehörigen emittierten Mengen an CO₂ dargestellt, die im Rahmen der Roadmap berücksichtigt wurden. Insgesamt sind in die Analyse Daten von 57 Glaswerken eingeflossen, wovon 29 Werke der Behälterglasbranche, 11 Werke der Flachglasbranche und 17 Werke der Gebrauchsund Spezialglasbranche zuzuordnen sind. Die Produktionsstandorte verteilen sich dabei über ganz Deutschland, wobei sich einige regionale Cluster von Glaswerken, u.a. in Nordrhein-Westfalen, im Weser-Bergland und im Thüringer Wald, gebildet haben.

¹ Wirtschaftsgläser werden in der Regel der übergeordneten Glassorte "Hohlglas" zugeordnet. In dieser Studie wurde die Glassorte aufgrund ihres erhöhten spezifischen Energiebedarfs beim Herstellungsprozess in die Kategorie Spezial- und Gebrauchsglas eingeordnet.

In diesen 57 Glaswerken werden insgesamt 122 Schmelzwannen zur Glasherstellung betrieben. Von diesen 122 Schmelzwannen dienen 57 Schmelzwannen der Herstellung von Behälterglas. Bei diesen Behälterglaswannen handelt es sich überwiegend um erdgasbetriebene U-Flammenwannen mit Regeneratoren. Für die Herstellung von Flachglas sind 13 regenerative Querbrennerwannen im Einsatz. Für die Herstellung von Gebrauchs- und Spezialglas sind 52 Schmelzwannen in Betrieb, wovon der Großteil als regenerative Querbrenner- und U-Flammenwannen sowie als Oxy-Fuel-Wannen ausgelegt ist.

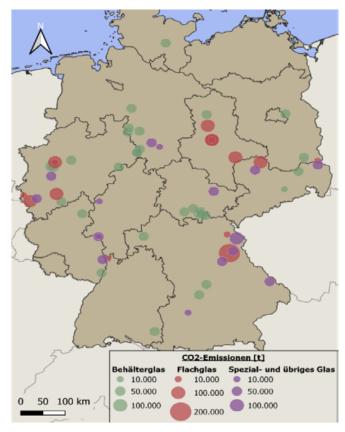


Abbildung 5: Deutsche Glaswerke mit zugehörigen CO₂-Emissionen im Jahr 2019 (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt)

Wirtschaftsfaktor Glas im Spiegel des deutschen Außenhandels²

Die deutsche Glasindustrie nimmt aktiv am deutschen Außenhandel teil, sowohl in Bezug auf Exporte als auch in Bezug auf Importe. Viele der hergestellten und weiterverarbeiteten Produkte werden exportiert und sorgen für einen positiven Außenhandelssaldo.

Die Exportsumme von Glaswaren aus Deutschland betrug 2019 insgesamt 6,9 Mrd. Euro. Hierbei waren die produktübergreifenden wichtigsten Handelspartner Frankreich (10,7%), die Niederlande (8,5%) und die USA (8,1%).

Mit dem Export von Behälterglas wurde dabei ein Umsatz von 1,06 Mrd. Euro erzielt. Der größte Exportanteil entfiel dabei auf ungefärbte Glasbehältnisse und gefärbte Glasflaschen. Die wichtigsten Ausfuhrländer waren Frankreich mit einem Anteil von 22,3% am Gesamtexport, die Niederlande mit 14,2% und Belgien mit 12,8%. Im Bereich Flachglas betrug der Exportwert 657 Mio. Euro. Dieser wurde überwiegend durch den Verkauf von nicht beschichtetem Flachglas erlöst. Hauptimportländer waren Polen (9,1%), Frankreich (8,7%) und Österreich (8,5%). Im Bereich Gebrauchs- und Spezialglas³ wurden Glasprodukte im Wert von 1,19 Mrd.

 $^{^{2}}$ Für die in dieser Roadmap betrachteten Glassorten

³ Ohne Wirtschaftsglas

Euro exportiert. Diese Exporte bestanden hauptsächlich aus Glaswaren für Laboratorien. Hauptabnehmer dieser Produkte waren hierbei die USA (15,3%), Frankreich (8,6%) und das Vereinigte Königreich (7,5%). (2021 BV-Glas-Jahresbericht 2020)

Trotz des positiven Außenhandelssaldos wurden im Jahr 2019 Glaswaren im Wert von 5,69 Mrd. Euro importiert. Die Einfuhrquote (Anteil des Importwertes am Inlandsverbrauch) betrug 49,8%. Die wichtigsten Einfuhrländer für Glaswaren waren China (10,8% am gesamten Importumsatz), Polen (10,0% am gesamten Importumsatz) und die USA (8,6% am gesamten Importumsatz).

Die Schwerpunkte der Einfuhrländer unterscheiden sich dabei je nach Glassorte. Im Bereich Behälterglas wurden 2019 Produkte im Wert von 381 Mio. Euro importiert. Der Großteil entfiel dabei auf gefärbte und ungefärbte Glasflaschen und Glasbehältnisse für pharmazeutische Produkte. Wesentliche Lieferländer waren hierbei Polen mit 16,4%, Frankreich mit 13,1% und Italien mit 12,0%. Im Bereich Flachglas wurden Glasgüter mit einem Wert von insgesamt 188 Mio. Euro importiert. Dabei handelte es sich vor allem um beschichtetes und nicht-beschichtetes Flachglas. Zu den wichtigsten Lieferländern von Flachglas gehörten Frankreich (34,5%), Italien (10,1%) und Polen (9,8%). Im Sektor Gebrauchs- und Spezialglas³ betrug der Wert der Einfuhren 641 Mio. Euro. Bei diesen Einfuhren handelt es sich überwiegend um Glaswaren für Laboratorien. Die Hauptexportländer waren die USA (24,8%), China (9,4%) und Kroatien (8,2%).

Glasherstellungsprozess

Bei der Glasherstellung handelt es sich um einen mehrstufigen Hochtemperaturprozess, der aus den folgenden Prozessschritten besteht:

- · Gemengebereitung
- Schmelzen
- Formgebung
- Kühlung
- Weiterverarbeitung

Aufgrund der hohem erforderlichen Prozesstemperaturen für das Aufschmelzen der Rohstoffe ist die Herstellung von Glas energieintensiv.

In Abbildung 6 ist schematisch das Produktionsverfahren von Behälterglas mit den einzelnen Prozessschritten dargestellt. Der Produktionsprozess für andere Glassorten wie bspw. Flachglas oder Gebrauchs- und Spezialglas, unterscheidet sich dabei im Wesentlichen in den Prozessschritten der Glasformung und der Weiterverarbeitung sowie im Bereich der Prozessparameter. Ansonsten ist der Prozessablauf relativ identisch.

In der **Gemengebereitung** werden die verschiedenen Rohstoffe vermischt und die gewünschte Zusammensetzung eingestellt. Der Hauptbestandteil von Glas ist Siliciumdioxid (SiO₂), welches durch den Rohstoff Sand eingebracht wird. Zusätzlich werden Karbonate eingesetzt, welche zum einen als Flussmittel dienen oder bestimmte Eigenschaften des Glases beeinflussen können. Als Flussmittel kommt in der

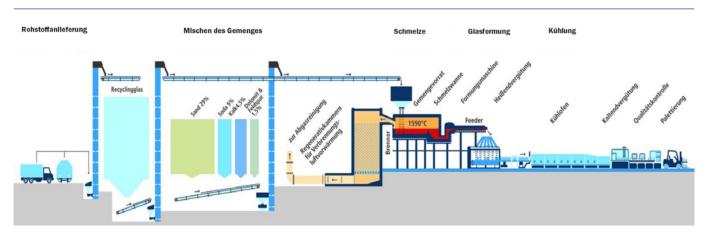


Abbildung 6: Glasherstellungsprozess (Quelle: BV Glas)

Regel Natriumoxid (Na₂O) zum Einsatz, welches über den Rohstoff Natriumcarbonat (Na₂CO₃) bereitgestellt wird und die Schmelztemperatur des Gemenges reduziert. Zur Einstellung bestimmter chemischer Eigenschaften wie bspw. die chemische Beständigkeit, Festigkeit oder Härte des Glases, werden sog. Stabilisatoren eingesetzt. Diese Stabilisatoren bestehen aus Erdalkalioxiden, welche vor allem durch die Rohstoffe Kalkstein (CaCO₃) und Dolomit (CaCO₃•MgCO₃) ins Gemenge eingebracht werden. Darüber hinaus können noch weitere spezifische Additive eingesetzt werden, um die Farbe oder sonstige produktspezifische Eigenschaften des Glases einzustellen.

In Deutschland werden anstelle der einzelnen Rohstoffe zu großen Anteilen Scherben als Ausgangsstoffe für die Glasherstellung genutzt. Das Scherbenglas kann dabei sowohl aus externen Scherben, sog. Fremdscherben (aufbereitetes Altglas) und internen Glasscherben, sog. Eigenscherben (Ausschuss aus der eigenen Produktion), bestehen.

Gerade bei Einsatz von Fremdscherben sind die Anforderungen an Zusammensetzung, Farbe und Fremdstoffen der Scherben von Bedeutung, damit die gewünschten Glaseigenschaften erreichbar sind.

Die Zusammensetzung des Gemenges unterscheidet sich dabei je nach Produkt und Anwendungsfall. So können die Anteile an Scherbenglas abhängig von der geforderten Glasqualität sowie dem Einsatz an Rohstoffen zur Einstellung der Schmelztemperatur (Flussmitteln) oder der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Produktes (Stabilisatoren) variiert werden. Grundsätzlich trägt der Einsatz von Scherben zur Reduzierung des Energiebedarfs bei, sodass der Scherbenanteil, soweit technisch möglich, maximiert werden sollte.

Der **Schmelzprozess** des Gemenges ist bei der Glasherstellung der mit Abstand energieintensivste Prozessschritt und kann als "Herzstück" des Produktionsprozesses bezeichnet werden. Die benötigte Energie zum Aufheizen und Einschmelzen des Gemenges sowie die Energie zur Läuterung der Glasschmelze wird in den meisten Fällen durch die Verbrennung eines gasförmigen Energieträgers in der Schmelzwanne bereitgestellt. Die notwendigen chemischen Umwandlungen zur Ausbildung der Glasphase laufen bei rela-

tiv hohen Temperaturen ab, sodass innerhalb der Schmelzwanne Temperaturen von bis zu 1600°C erforderlich sind. Nachdem das Gemenge geschmolzen wurde, müssen die bei der Stoffumwandlung in der Schmelze entstehenden Gase aus der Schmelze entfernt werden, die ansonsten zu sichtbaren Blasen im Endprodukt führen. Diesen Schritt nennt man Läuterprozess. Der Läuterprozess kann je nach Qualitätsanforderung für das Produkt unterschiedliche Verweildauern erforderlich machen, da mit steigender Verweilzeit mehr entstandene Gasblasen aus der Schmelze entfernt werden können.

Dem Schmelz- und Läuterprozess folgt der Formgebungsprozess, bei welchem das noch geschmolzene Glas in die gewünschte Produktform gebracht wird. Dies kann entweder durch Blas-, Press- oder Ziehverfahren erreicht werden. Im Bereich Flachglas wurde für die Formgebung ein spezielles Verfahren zur Herstellung von Flachglas entwickelt, in welchem das geschmolzene Glas über die Oberfläche eines Zinnbades gezogen wird. Beim Formgebungsprozess spielt die Temperatur und die Zähigkeit der Glasschmelze eine maßgebliche Rolle, sodass eine Hauptaufgabe darin besteht, die Glasschmelze auf die zur Formgebung notwendige Temperatur zu bringen und zu halten.

Nachdem das Glas die finale Form erhalten hat, muss es in **Kühlöfen** kontrolliert abgekühlt werden. Auch wenn man von Kühlöfen spricht, werden diese nicht gekühlt, sondern beheizt. Dies ist notwendig, da im gefertigten Glas durch zu schnelles Abkühlen Spannungen auftreten würden und hierdurch Schäden entstehen können. Die Kühlöfen sind in der Regel als kontinuierliche Tunnelöfen ausgelegt, welche entweder durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder elektrisch beheizt werden.

Im letzten Arbeitsschritt wird das geformte und abgekühlte Glas weiterverarbeitet und verpackt. Hierbei können je nach gewünschten Anforderungen an das Produkt unterschiedliche Prozessschritte zum Einsatz kommen. (Schaeffer und Langfeld 2014)

3.2 Herausforderung Dekarbonisierung

Die Umstellung einer gesamten Branche auf eine treibhausgasneutrale Produktion ist mit großen Anstrengungen und Herausforderungen verbunden.

Sowohl der Glasherstellungsprozess als auch die Glaswerke wurden über Jahrzehnte auf das Schmelzen des Glases in verbrennungsbasierten Wannen ausgelegt. Dieser Prozess wurde sowohl energetisch als auch verfahrenstechnisch so weit optimiert, dass der Energieverbrauch stetig reduziert werden konnte. Zudem sind viele Prozesse energetisch miteinander verknüpft worden, sodass bspw. die Abwärme aus den Schmelzwannen in weiteren Prozessschritten eingesetzt und genutzt wird.

Der anstehende Transformationsprozess ist somit mit industriellen, technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Herausforderungen verbunden, welche nachfolgend erläutert werden.

Industrielle Herausforderungen

Die Dekarbonisierung der Glasindustrie erfordert einen disruptiven Wechsel von etablierten Produktionstechnologien auf Technologien und Produktionsprozesse, die meist noch

Der Endenergiebedarf der Glasindustrie wird aktuell zu 80% durch den Energieträger Erdgas gedeckt.

nicht großtechnisch erprobt sind. Deshalb muss sich der Glassektor bei laufendem Betrieb neu aufstellen und innovative Technologien testen und implementieren. Diese Transformation findet dabei unter der Prämisse statt, dass weder heutige Produktionsstandorte geschlossen noch deren Produktionskapazitäten signifikant reduziert werden.

Zusätzlich zu den Herausforderungen der mittelfristig erforderlichen Dekarbonisierung kommen die aktuellen Entwicklungen bei der sicheren Versorgung mit Gas und der Preisentwicklung des Energieträgers hinzu, denn die Glasindustrie hat aktuell eine große Abhängigkeit vom Energieträger Erdgas. Der Endenergiebedarf der Glasindustrie wird aktuell zu 80% durch den Energieträger Erdgas gedeckt (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021). Hierdurch hat sich der ökonomische Spielraum für die Glashersteller drastisch verringert und es müssen kurzfristige Investitionen getätigt werden, um massive Schäden an den Produktionsanlagen bei Ausfall der Gasversorgung zu verhindern. Die Umstellung des Endenergieträgers bei der Glasherstellung kann im optimalen Fall gleichzeitig einen Beitrag zur Dekarbonisierung leisten.

Nicht außer Acht gelassen werden darf der zeitliche Entscheidungs- und Umsetzungsrahmen zur Dekarbonisierung der Produktionsstandorte. Die typischen Re-Investitionszyklen für Schmelzwannen, dem entscheidenden Anlagenteil der Glasherstellung, liegen zwischen 12 und 15 Jahren. Dies bedeutet, dass für eine mögliche Dekarbonisierung bis 2045 in manchen Bereichen gerade noch ein bis zwei Zeitfenster für einen disruptiven Technologiewechsel beim Ersatz der heutigen Schmelzaggregate vorliegen. Zu berücksichtigen ist, dass die zeitliche Umsetzung für die Umrüstung auf eine neuartige Technologie von der Entscheidungsphase bis zur Inbetriebnahme zwischen 5 und 7

Jahren dauern kann. Diese beiden zeitlichen Restriktionen zeigen deutlich, dass die Glashersteller spätestens zum Ende dieses Jahrzehnts Entscheidungen über die technologische Neuausrichtung ihrer Werke vorbereiten und treffen müssen, um einen entsprechenden Umrüstungsplan rechtzeitig umsetzen zu können.

Technische Herausforderungen

Als mögliche und wahrscheinliche Maßnahme zur Dekarbonisierung zählt die Elektrifizierung von Schmelzwannen. Hierdurch würde sich das gegenwärtige Schmelzkonzept grundlegend von einer verbrennungsbasierten hin zur elektrischen Wärmebereitstellung ändern. Dieser Technologiewechsel hätte zum einen verfahrenstechnische Auswirkungen auf die Schmelzwanne und deren Strömungsverhalten. Zum anderen würde sich auch die Energiebereitstellung in den folgenden Prozessschritten verändern, da die Abwärme aus den verbrennungsbasierten Schmelzwannen prozessübergreifend genutzt wird. Durch den Entfall der Abgasströme aus der Verbrennung fällt bei elektrischen Schmelzwannen in deutlich geringerem Maße nutzbare Abwärme an. Diese fehlenden Abwärmemengen aus dem Schmelzprozess führen in den restlichen Prozessschritten zu einem Anstieg der erforderlichen externen Energiezufuhr.

Für die Herstellung einzelner Glasprodukte (überwiegend im Bereich Spezialglas) werden bereits vereinzelt vollelektrische Schmelzwannen zur Glasherstellung eingesetzt. Hierbei handelt es sich meist um Schmelzwannen mit kleinerer Schmelzleistung. Für große Schmelzleistungen und bestimmte Glassorten kann für das elektrische Schmelzen noch keine vollständige Marktreife festgestellt werden. So besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf beim Einsatz dieser Technologie für bestimmte Rohstoffzusammensetzung mit zu niedriger elektrischer Leitfähigkeit und für Wannen mit Schmelzkapazitäten von mehr als 400 Tonnen pro Tag.

Selbst wenn die Energieversorgung für die Glasherstellung vollständig defossilisiert wird, verbleiben in der Glasindustrie, wie in wenigen anderen Industriesektoren (z.B. Zement und Kalk), prozessbedingte CO₂-Emissionen. Diese werden in den Schmelzwannen durch die Reaktion der eingesetzten Karbonate gebildet. Die prozessbedingten Emissionen können einen Anteil von 20% (Mittelwert für Behälterglas) bis

30% (Mittelwert für Flachglas) an den Gesamtemissionen haben. Diese prozessbedingten CO₂-Emissionen können nur schwer vermieden werden, da die Umwandlungsprodukte der Karbonate für die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Glasprodukte unverzichtbar sind. Für die gegenwärtig eingesetzten Karbonate gibt es heute noch keine alternativen Rohstoffe, sodass deren Substitution für eine vollständige Dekarbonisierung im Glassektor derzeit nicht absehbar ist.

Ökonomische Herausforderungen

Da zur Dekarbonisierung der Glasindustrie die aktuellen Produktionsanlagen durch treibhausgasneutrale zu ersetzen sind und es sich hierbei um innovative und forschungsintensive Technologien handelt, werden deren Investitionen deutlich höher ausfallen als für die vergleichbaren konventionellen Anlagen. Zudem sind Anpassungen an der werksinternen und umliegenden Energieinfrastruktur für den Betrieb mit grünen Energieträgern erforderlich, was zusätzlich Investitionen in die Energieinfrastrukturen erfordert. Für die Dekarbonisierung eines Produktionsstandortes zur Glasherstellung sind allein für die baulichen Maßnahmen für die Schmelzwannen samt Energieinfrastruktur mit Investitionen im zweistelligen Millionenbereich je Standort zu rechnen. Dies wird vor allem kleine und mittelständische Unternehmen sowie Konzerne mit mehreren Standorten vor finanzielle Herausforderungen stellen, insbesondere in einem Umfeld mit steigenden Kapitalbeschaffungskosten.

Zusätzlich wird der Einsatz der teureren grünen Energieträger Strom und Wasserstoff zu einer signifikanten Steigerung der spezifischen Produktionskosten führen. Diese betrieblichen Mehrkosten führen zu einem Nachteil im Wettbewerb mit internationalen Konkurrenten, die ihre Produkte unter weniger anspruchsvollen Rahmenbedingungen produzieren können.

Gesellschaftliche Herausforderungen

Für ein erfolgreiches Gelingen der Dekarbonisierung in der Glasindustrie müssen die Unternehmen sowohl die technischen als auch die ökonomischen Hemmnisse überwinden. Ob dies gelingen kann, ist auch abhängig von der Stimmung in der deutschen Gesellschaft und der gesellschaftlichen Bedeutung des Klimaschutzes. Die zur Dekarbo-

nisierung zwingend benötigten grünen Energieträger Strom und Wasserstoff müssen in ausreichender Menge und zu jedem Zeitpunkt des Jahres verfügbar sein. Werden die prognostizierten benötigten Mengen an Strom und Wasserstoff der anderen Sektoren in Deutschland mitberücksichtigt, so muss die Ausbaugeschwindigkeit der erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa deutlich gesteigert werden.

Zum anderen müssen diese grünen Energieträger die jeweiligen Glaswerke auch erreichen können, wofür die vorgelagerten Stromnetze stark ausgebaut und ein flächendeckendes Wasserstoffnetz verfügbar sein muss. Die Akzeptanz der Gesellschaft für den Umbau der Industrie in Deutschland ist deshalb für die erfolgreiche Transformation der Glasindustrie hin zur Treibhausgasneutralität unabdingbar.

Die Akzeptanz der Gesellschaft für den Umbau der Industrie in Deutschland ist deshalb für die erfolgreiche Transformation der Glasindustrie hin zur Treibhausgasneutralität unabdingbar.

4 Methodik und Vorgehensweise des Roadmap-Prozesses

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen erläutert, das zur Erstellung der Dekarbonisierungs-Roadmap für die Glasindustrie zu Grunde liegt.

Dazu wurden in einem ersten Schritt eine Abgrenzung der Glasprodukte und der Bilanzierungsrahmen für die CO₂-Emissionen festgelegt. Auf Basis der Technik- und Produktionsdaten des Anlagenbestandes (Basisjahr 2019) wurden mögliche Transformationspfade modelliert, die zum

bestmöglichen Erreichen der Klimaneutralität führen. Für diese Transformationspfade wurden die energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen berechnet und dem Status Quo gegenübergestellt.

4.1 Fokussierung auf wichtigste Branchen und den Schmelzprozess

In dieser Roadmap werden mögliche Pfade zur Dekarbonisierung der deutschen Glasindustrie aufgezeigt. Der Fokus liegt dabei auf der Herstellung von Glas und somit auf den Produktionsstandorten der deutschen Glaswerke. An diesen Standorten wird Behälterglas, Flachglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas hergestellt. Produktionsstandorte für Glaswolle sowie Standorte, an welchen Glaswaren nur veredelt oder weiterverarbeitet werden, wurden aufgrund ihres untergeordneten Anteils des Energieverbrauchs und der entstehenden CO₂-Emissionen nicht in den Transformationspfaden berücksichtigt.

Wesentlicher und energieintensivster Schritt bei der Herstellung von Glas ist der Schmelzprozess. Auf das Aufschmelzen der Rohstoffe zu Glas und die anschließende Läuterung des Glases entfallen je nach Glassorte ca. 60 - 80% des gesamten Energiebedarfs bei der Glasherstellung.

Indiesen Prozessschritten wird der überwiegende Teil der fossilen Brennstoffe eingesetzt. Die Dekarbonisierung der Glasherstellung setzt deshalb im wesentlichen Maßnahmen voraus, die zu einer signifikanten CO₂-Einsparung innerhalb

Wesentlicher und energieintensivster Schritt bei der Herstellung von Glas ist der Schmelzprozess. des Schmelzprozesses führen. Auch in den nachgelagerten Produktionsschritten wird derzeit fossile Energie eingesetzt, allerdings ist dieser Anteil gegenüber dem Schmelzprozessuntergeordnet und eine Elektrifizierung ohne größere technologische Herausforderungen möglich. Im Rahmen des Roadmap-Prozesses wurde deshalb vereinfachend angenommen (siehe 6.1.1), dass diese Prozessschritte elektrifiziert werden und entsprechend bis 2045 durch die vollständige Dekarbonisieung des Stromsektors diesen Prozessschritten keine CO₂-Emissionen mehr zuzuordnen sind.

Der wesentliche Faktor zur Dekarbonisierung des Glasherstellungsprozesses sind somit die direkten und indirekten CO₂-Emissionen, die bei der Produktion von verkaufsfähigem Glas in den deutschen Werken durch den Schmelzund Läuterprozess verursacht werden. Bei den direkten CO₂-Emissionen in einem Glaswerk handelt es sich sowohl um energiebedingte als auch um prozessbedingte Emissionen. Die energiebedingten Emissionen entstehen durch die Verbrennung fossiler Energieträger zur Wärmebereitstellung, in der Glasindustrie überwiegend Erdgas. Zum anderen entstehen durch chemische Reaktionen der ein-

gesetzten Rohstoffe in den Schmelzwannen prozessbedingte Emissionen. Diese direkten CO₂-Emissionen fallen nach der Kategorisierung des GHG Protocol (World Resources Institute 2011) in den Scope 1. Die indirekten CO2-Emissionen für den Bezug von Strom und Wärme sind dem Scope 2 zugeordnet und fallen nicht am Standort der Glasherstellung an, sind der Produktion aber direkt zuzuordnen. Im Rahmen dieser Roadmap wird dabei davon ausgegangen, dass die Ziele der vollständigen Dekarbonisierung der Stromerzeugung bis zum Jahr 2045 erreicht werden, sodass die Scope 2 Emissionen der Glasindustrie entsprechend gegen null gehen. CO2-Emissionen, die nicht dem Glasherstellungsprozess direkt zugeordnet werden können, bspw. bei der Rohstoffgewinnung, dem Transport von Glasprodukten oder die während der Nutzungsphase der hergestellten Produkte anfallen, werden gemäß GHG Protocol dem Scope 3 zugeordnet. Diese sind nicht Teil dieser Analyse.

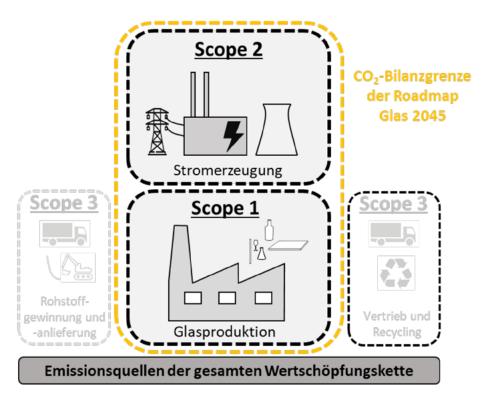


Abbildung 7: CO₂-Bilanzgrenze dieser Roadmap

4.2 Ablauf und Grundlagen des Roadmap-Prozesses

Das Vorhaben der transparenten und quantifizierten Darstellung des Transformationsprozesses der Glasindustrie wurde in mehreren Arbeitsschritten umgesetzt. Die Kernelemente sind dabei die Datenbeschaffung und Analyse zur Ist-Situation in der deutschen Glasindustrie, die Analyse technischer Optionen zur Dekarbonisierung der Prozesse sowie die Entwicklung von Transformationspfaden mit dem zeitlichen Ablauf für den Umbau der einzelnen Produktionsstandorte. Die einzelnen Arbeitsschritte sollen nachfolgend detaillierter beschrieben werden.

Stand der Dekarbonisierung in der deutschen Glasindustrie – eine Positionsbestimmung

Um den Startpunkt für die verstärkten Anstrengungen zur Dekarbonisierung zu ermitteln, wurde eine detaillierte Datenaufnahme für die Produktionsstandorte der Glasindustrie durchgeführt. Als Basisjahr wurde das Jahr 2019 gewählt. Dieses Basisjahr dient als Referenzpunkt für die entwickelten Transformationspfade. Die Wahl des Referenzjahres 2019 erfolgte, weil in diesem Geschäftsjahr die Sondereinflüsse Corona und Ukraine-Krieg noch keine Relevanz hatten. Somit wird vermieden, dass diese Sondereffekte die Transformation zu stark verzerren. Erste Daten für das Jahr 2020 wären zwar aktueller und damit grundsätzlich besser als Startjahr geeignet gewesen, wenn es die Sondereinflüsse nicht gegeben hätte. Für das Referenzjahr 2019 standen zum Beginn der Arbeiten an der Roadmap zudem alle wichtigen statistischen Zahlen zur Glasindustrie zur Verfügung. Die Produktionsstandorte wurden dem Jahresbericht des BV Glas (2021 BV-Glas-Jahresbericht 2020) entnommen und mit der Liste mit CO₂handelspflichtigen Anlagen der Glasindustrie der Deutschen Emissionshandelsstelle (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt) abgeglichen. Für die ermittelten Standorte wurden produktionsspezifische Werte erfasst und in ein eigens entwickeltes Transformationsmodell für die deutsche Glasindustrie implementiert. Neben der Anzahl der betriebenen Schmelzwannen wurden für diese Wannen weitere Daten wie die produzierte Glassorte, die Produktionsmenge, der Typ der Schmelzwanne, die ein-

gesetzten Energieträger und der Energieverbrauch erhoben. Darüber hinaus wurden Daten zum Rohstoffeinsatz, dem Energieverbrauch der sonstigen Produktionsanlagen sowie Angaben zur Energieinfrastruktur an den Standorten zusammengetragen.

Die Erhebung der Daten für die einzelnen Werke erfolgte mit Hilfe von Online-Fragebögen, die an die Mitgliedsunternehmen des Bundesverbands Glasindustrie versandt wurden. Durch die sehr gute Unterstützung durch den Bundesverband Glasindustrie und dessen Mitgliedsunternehmen wurde eine hohe Beteiligungsquote erzielt, so dass der überwiegende Teil der Glaswerke in einer hohen Detailtiefe im Transformationsmodell abgebildet werden konnte. Für die Werke, für die keine Daten gemeldet wurden, wurden die Datenlücken durch eigene Recherchen so weit möglich geschlossen und verbleibende offene Datenpunkte mit branchentypischen Durchschnittswerten geschlossen.

Auf dem Weg zur treibhausgasneutralen Glasindustrie – Entwicklung von Transformationspfaden

Für die Entwicklung und Analyse möglicher Transformationspfade und zur Quantifizierung der Auswirkungen auf Energieverbrauch, CO₂-Emissionen und Kosten wurde ein Transformationsmodell für die deutsche Glasindustrie entwickelt. Ausgehend von der ermittelten Ausgangssituation unter Berücksichtigung aller Schmelzwannen in

Deutschland wurde für jede einzelne Wanne ein spezifischer Transformationspfad entwickelt, der sowohl den Stand der Entwicklungen bei den Dekarbonisierungstechnologien als auch die Reinvestitionszyklen der einzelnen Wannen berücksichtigt.

Modellierung der Dekarbonisierungsmaßnahmen

Für eine Reduktion der CO₂-Emissionen beim Glasherstellungsprozess wurden mögliche Dekarbonisierungsmaßnahmen analysiert. Aus der Vielzahl der Technologien wurden diejenigen ausgewählt, die zu einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen im Schmelzprozess führen. Bei den nachgelagerten Produktionsprozessen fallen derzeit zwar ebenfalls direkte CO₂-Emissionen durch die notwendige Wärmebereitstellung an, allerdings lassen sich diese Prozesse mit relativ geringem Aufwand bereits mit heute verfügbaren Technologien elektrifizieren, auch wenn dies zu deutlich erhöhten Betriebskosten führt. Deshalb wurde eine vollständige Dekarbonisierung dieser nachgelagerten Prozessschritte durch eine schrittweise und vollständige Elektrifizierung bis 2045 im Modell berücksichtigt. Für die ausgewählten Dekarbonisierungsmaßnahmen im Schmelzprozess wurden spezifische Energieverbräuche, Investitionen und bestehende technische Hürden ermittelt. Für die spezifischen Energieverbräuche wurde dabei sowohl zwischen Glassorten als auch zwischen Wannengrößen differenziert, so dass produktionsspezifische Unterschiede beim Herstellungsprozess von bspw. Behälterglas für Nahrungsmittel und für Pharmazieprodukte zutreffend abgebildet werden. Dies gilt u.a. für die Größenabhängigkeit des spezifischen Energieverbrauchs einer Schmelzwanne, der mit zunehmender Wannengröße abnimmt. Die spezifischen Energieverbräuche wurden zudem auf 0% Scherbeneinsatz normiert. Auf Basis dieser Werte wurde dann der spezifische Energieverbrauch der einzelnen Wannen unter Berücksichtigung des aktuellen und zukünftigen Scherbeneinsatzes abgeleitet. Eine Erhöhung des Scherbenanteils führt dabei immer zu einer Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs und der prozessbedingten CO₂-Emissionen.

In mehreren Gesprächen mit Herstellern von Glaswannen wurden die identifizierten Dekarbonisierungsmaßnahmen in Bezug auf Entwicklungsstand, Energieverbrauch und Kosten diskutiert und die für die Modellierung getroffenen Annahmen verifiziert. Dabei wurde auch über Personalkapazitäten bei den Wannenbauern gesprochen, die maßgeblich die Geschwindigkeit der möglichen Transformationsgeschwindigkeit bestimmen werden.

Die spezifischen Energieverbräuche wurden auf 0% Scherbeneinsatz normiert.

Entscheidungsfaktoren für die Wahl geeigneter Dekarbonisierungsmaßnahmen

Kernaspekt bei der Entwicklung der Transformationspfade ist die individuelle Technologieauswahl im Modell für die einzelnen Standorte. Maßgeblich beeinflusst wird der Dekarbonisierungspfad durch die Entscheidung, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Technologie die bisherige CO2-verursachendeSchmelztechnologieanden Produktionsstandorten durch "grüne" Schmelzwannen abgelöst wird. Aufgrund der großen Investitionsvolumina wurde dabei von der Prämisse

ausgegangen, dass der Ersatz einer Schmelzwanne erst am Ende seiner Wannenreise (Ende der Lebensdauer, Zeitpunkt für die Kaltreparatur) geschieht.

Dabei gibt es drei maßgebliche Faktoren, die die Technologiewahl für die einzelnen Standorte beeinflusst. Dies sind:

1. Technologieverfügbarkeit der Dekarbonisierungsmaßnahmen

Als erstes Kriterium für einen möglichen Einsatz der betrachteten Dekarbonisierungsmaßnahme wurde deren technische Verfügbarkeit festgelegt. Diese Technologieverfügbarkeit wird durch den jeweiligen Entwicklungsstand der Technologie über den Technology Readiness Level (TRL) abgebildet. Befindet sich eine Technologie aktuell noch im Entwicklungs- und Forschungsstadium (TRL 1-5), wird ein wahrscheinlicher Zeitpunkt des Markteintritts durch Erreichen der Technologieverfügbarkeit (TRL ≥ 6) basierend auf verfügbaren Literaturangaben festgelegt. Dabei wird die Anwendbarkeit der Technologie für das am jeweiligen Standort hergestellte Glasprodukt berücksichtigt. So weisen einige Glassorten durch ihren Rohstoffeinsatz oder die besonderen Qualitätsanforderungen an das Produkt höhere Anforderungen an die eingesetzten Schmelztechnologien auf.

Ebenso spielen die verfügbaren Leistungsgrößen eine Rolle. Einige Glassorten werden in Schmelzwannen mit einer Schmelzleistung von bis zu 1000 Tonnen pro Tag hergestellt, sodass eine ausreichende Skalierbarkeit der einzusetzenden Technologie gewährleistet sein muss. Dies kann zu Verzögerungen bei der Verfügbarkeit einzelner Technologien beitragen.

2. Anforderungen an vorgelagerte und interne Energieinfrastrukturen

Technologische Maßnahmen zur Dekarbonisierung des Schmelzprozesses erfordern die Substitution der bisher eingesetzten fossilen Energieträger. Der Einsatz der Technologien ist deshalb nicht nur von der Verfügbarkeit geeigneter Technologien, sondern auch von der Möglichkeit der Bereitstellung des benötigten Energieträgers abhängig. Die dem Glaswerk vorgelagerte Energieinfrastruktur, bspw. Stromleitungen und -anschluss mit entsprechenden Kapazitäten, oder die Verfügbarkeit von Verteilnetzen für CO2-neutrale Brennstoffe (z.B. Wasserstoff) spielen eine entscheidende Rolle beim Einsatz von grünen Energieträgern. Hierzu wurden sowohl der Status Quo der Versorgungsinfrastrukturen als auch die Netzausbaupläne für die Energienetze in Deutschland analysiert (siehe Kapitel 6.1.3). Mit Hilfe eines geografischen Informationssystems (GIS) wurden die Entfernungen zwischen den nächstgelegenen Anschlussknotenpunkten und den Glaswerken ermittelt, die maßgeblich die Kosten des Ausbaus bestimmen und somit bei der Bewertung für einen Energieträgerwechsel berücksichtigt werden müssen.

3. Firmenspezifische Planungen und Umsetzungskonzepte

Als exogener Faktor bei der Auswahl von Dekarbonisierungsmaßnahmen für einzelne Standorte wurden zudem interne Unternehmenspläne und -vorgaben berücksichtigt, soweit diese nicht einer Zielerreichung für die gesamte Glasbranche entgegenstehen. Im Rahmen von Gesprächen mit einzelnen Unternehmen, aber auch durch Auswertung von Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichten und Pressemitteilungen wurden diese Planungen ermittelt.

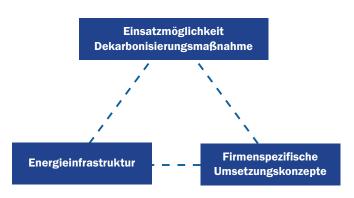


Abbildung 8: Einflussfaktoren auf die Investitionsentscheidung bei der Auswahl der Dekarbonisierungstechnologie für die einzelnen Standorte

Erstellung der Transformationspfade

Zur Erstellung der Transformationspfade für die Glasindustrie wurde ein eigenes Tool aufgesetzt, in welchem die Entwicklung der einzelnen Glassektoren im Zeitraum 2020 bis 2045 dargestellt werden kann. Die Transformationspfade werden durch eine manuelle Eingabe der Dekarbonisierungsmaßnahmen für jeden Standort und jede Schmelzwanne sowie unter Festlegung diverser Annahmen erstellt und hieraus die Veränderungen auf den Energieverbrauch, die CO₂-Emissionen und die Kosten berechnet. Nachfolgend wird auf die Kernpunkte bei der Erstellung der Transformationspfade eingegangen.

Zunächst wird für jede Glasbranche die jährliche Produktionskapazität pro Technologie angegeben. Für jedes Glaswerk wird identifiziert, welche Menge Glas durch eine bestimmte Produktionsroute unter dem Einsatz der definierten Schmelztechnologien hergestellt wurde und jeweils deutschlandweit aufsummiert. Die ermittelte Produktionsmenge pro eingesetzter Technologie ist die Kerngröße der Transformationspfade, da mit dieser in Verbindung mit den spezifischen Werten der eingesetzten Technologien der Energieverbrauch, die CO₂-Emissionen und die Kosten berechnet werden können. Die Produktionskapazitäten je Technologie für das Referenzjahr wurden aus den ermittelten Werten des detaillierten Status Quo berechnet. Die Entwicklung der Produktionsmenge je Technologie wird darauf aufbauend durch die zuvor beschriebene multikriterielle Analyse bestimmt.

Auswirkungen der Transformation auf die Glasunternehmen in Deutschland

Neben einer normalen Fortschreibung von Energieverbrauch, Emissionen und Kosten bei der Glasherstellung führt eine durch äußere Faktoren bestimmte Transformation zu erheblichen Veränderungen gegenüber dem Status Quo.

Im Rahmen des Transformationsmodells erfolgt die Berechnung der Auswirkungen durch die Dekarbonisierung der Prozesse. Berücksichtigt werden dabei die hergestellte Glassorte, die Wannengröße und der eingesetzte Scherbenanteil.

Die Entwicklung der standortspezifischen CO₂-Emissionen wird basierend auf dem Energie- und Rohstoffeinsatz berechnet. Die energiebedingten CO₂-Emissonen werden anhand von Menge und Art der eingesetzten Energieträger und den zugehörigen Emissionsfaktoren berechnet. Für die indirekten, energiebedingten CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Strom wird die Entwicklung des spezifischen Emis-

sionsfaktors für den deutschen Strommix verwendet. Besondere Liefervereinbarungen an einzelnen Standorten blieben unberücksichtigt, d.h. für alle Standorte wurde mit den gleichen spezifischen CO₂- Mengen pro kWh Strom gerechnet. Die Menge an prozessbedingten CO₂-Emissionen wird mithilfe der Reaktionsgleichungen für die chemische Umwandlung der eingesetzten Karbonate berechnet.

Zur Berechnung der ökonomischen Auswirkungen durch den Transformationsprozess werden die spezifischen Produktionskosten bei der Herstellung einer Tonne verkaufsfähigen Glases und die jährlichen Investitionen im Bereich der Schmelzwannen ermittelt.

Die spezifischen Produktionskosten bilden die Betriebskosten zur Herstellung einer Tonne verkaufsfähigen Glases ab. Diese spiegeln somit die jährlichen Gesamtkosten des Glaswerkes in Relation zur hergestellten, verkaufsfähigen Glasmenge wider. Die jährlichen spezifischen Produktionskosten (OPEX) setzen sich aus den folgenden Posten zusammen:

$$OPEX = K_{Energie} + K_{CO_2} + K_{Rohstoffe} + K_{Personal} + K_{O\&M}$$
 [\$\int \text{tverkaufsfähiges Glas}\$] (1)

Die Energiekosten (KEnergie) setzen sich aus den Kosten für die bezogenen Energieträger zusammen. Diese werden anhand des berechneten jährlichen Energieverbrauchs berechnet. Die CO₂-Kosten (K_{CO₂}) beschreiben die anfallenden Kosten durch den Kauf von CO2-Zertifikaten für die direkt emittierten CO₂-Emissionen. Diese werden Anhand der Menge der emittierten CO₂-Emissionen und des jährlichen Durchschnittswertes für CO2-Zertifikate berechnet. Die Kosten für Rohstoffe (K_{Rohstoffe}), Personal (K_{Personal}) und Betrieb und Instandhaltung ($K_{O\&M}$) wurden aus der statistischen Fachreihe zur Kostenstruktur der Unternehmen für die einzelnen Glasbranchen herangezogen (Statistisches Bundesamt (Destatis)). Zur Berechnung der spezifischen Kosten pro Tonne produziertes Glas wurden die angegebenen jährlichen Kosten auf die in dem Bezugsjahr produzierte Glasmenge bezogen.

Bei der Berechnung der Investitionen für die jeweiligen Schmelztechnologien wird zwischen dem Aufwand für eine Kaltreparatur und dem der Neuinstallation der Schmelzwanne unterschieden. Bei der Kaltreparatur einer Schmelzwanne erfolgt die Erneuerung einer bestehenden Schmelzwanne während einer Betriebsunterbrechung. Diese Kaltreparatur ist bspw. für konventionelle Schmelzwannen im Bereich Behälterglas nach 12 bis 15 Jahren erforderlich, wenn das Ende der Wannenreise erreicht ist. Bei der Kaltreparatur werden die verbauten Feuerfestmaterialien vollständig und weitere Bauteile der Wannenkonstruktion bei Bedarf ausgetauscht. Die Hauptkosten einer Kaltreparatur entstehen entsprechend durch den Ersatz der abgenutzten Komponenten. Hinzu kommen Kosten für die Ingenieur- und Servicedienstleistungen bei der Erneuerung der Schmelzwanne.

Investitionen_{Kaltreparatur} =
$$K_{Material} + K_{Planung} + K_{Service}$$
 [ϵ] (2)

Bei der Berechnung der Investitionen einer neu zu installierenden Schmelzwanne sind neben den Investitionen der Wannenmaterialien weitere Kostenpositionen zu berücksichtigen. Zum einen muss die Energieversorgung im Werk, bestehend aus Netzanschluss, Umwandlungsaggregaten und den internen Werksleitungen der Energieträger, angepasst bzw. ausgebaut werden ($K_{Energieversorgung}$). Hinzu kommen Kosten für die Errichtung eines Back-Up-Systems, welches im Fall des Ausfalls der Energieversorgung den Notbetrieb sicherstellen kann ($K_{Notfallversorgung}$). Für elektrische Schmelzwannen ist deshalb ein ausreichend dimensioniertes Notstromaggregat erforderlich. Im Fall eines Stromausfalls ist der weitere Betrieb der Schmelzwanne zu gewährleisten, damit die Zerstörung der Schmelzwanne durch Erstarren der Glasschmelze verhindert werden kann.

Als weiterer Kostenfaktor sind die Investitionen in den vorgelagerten Energienetzen zu berücksichtigen, die durch einen Wechsel in der Schmelztechnologie ausgelöst werden (K_{Netzinfrastruktur}). Für die Bereitstellung von grünem Strom oder Wasserstoff in den erforderlichen Mengen müssen die hierfür benötigten Energieleitungen ausgebaut bzw. errichtet werden. Die zusätzlichen Kosten für den Ausbau der umliegenden Energieinfrastrukturen wurden über typische Netzausbaukosten pro Meter Leitung und den erforderlichen Leitungslängen zur Herstellung der neuen Anschlüsse zwischen Glaswerk und dem nächsten Umspannwerk bzw. Verteilnetzpunkt berechnet.

Investitionen_{Neu-Installation}

= $K_{Kaltreparatur} + K_{Energieversorgung} + K_{Notfallversorgung} + K_{Netzinfrastruktur}$ [ϵ] (3)

5 Dekarbonisierungstechnologien

Wie bereits in Kapitel 3.1 dargestellt, ist der Schmelzprozess bei der Glasherstellung sowohl energetisch als auch ökologisch der mit Abstand wichtigste Prozessschritt.

Aus diesem Grund und unter der Annahme der möglichen Elektrifizierung der restlichen Prozessschritte (vergleiche Kapitel 4.2), werden für die Dekarbonisierung des Glasherstellungsprozesses ausschließlich Technologien zur CO₂-Reduzierung im Schmelzprozess analysiert und zur Dekarbonisierung der gegenwärtigen Produktionsrouten in den Transformationspfaden eingesetzt.

Bei der Dekarbonisierung des Schmelzprozesses geht es im Wesentlichen um die CO₂-neutrale Erzeugung von Prozesswärme zum Einschmelzen der Rohstoffe und zur Läuterung der Glasschmelze. Die Prozesswärme wird dabei rohstoffbedingt auf einem Temperaturniveau von bis zu 1700°C benötigt.

Ein weiterer bei der Dekarbonisierung zu berücksichtigender Punkt ist die Reduzierung der prozessbedingten CO₂-Emissionen. Diese entstehen durch die Dissoziation der eingesetzten Karbonate wie Natriumcarbonat (Soda), Kalkstein und Dolomit in der Schmelze und steigen als Gasbläschen durch die Glasschmelze auf. Damit die Glasherstellung klimaneutral werden kann, müssen deshalb neben den energiebedingten auch diese prozessbedingten CO₂-Emissionen vollständig vermieden werden.

Nachfolgend werden Technologien zur Minderung der energie- und prozessbedingten CO₂-Emissionen im Glasherstellungsprozess aufgeführt und beschrieben. Dabei wird lediglich auf die wichtigsten Technologien zur Dekarbonisierung eingegangen, die zu einer signifikanten CO₂-Reduktion führen können. Die nachfolgende Beschreibung der Maßnahmen basieren auf Expertengesprächen, welche mit den führenden, deutschen Schmelzwannenbauern zu den einzelnen Technologien geführt wurden.

Dekarbonisierungs- maßnahme	Kurzbeschreibung		
Vollelektrische Schmelzwanne	100% elektrisch, Energieeinbringung über Elektroden		
Hybridwanne $iggle_{ ext{H.}} m{\mathcal{G}}$	20 - 40% elektrisch	60 - 80% Verbrennung (Erdgas/Biogas/Wasserstoff)	
Super- Hybridwanne 🎵 🦍	60 - 80% elektrisch	20 - 40% Verbrennung (Erdgas/Biogas/Wasserstoff)	
Oxy-Fuel-Schmelz- wanne +CCS/U	Oxidation des Energieträgers mit reinem Sauerstoff, Abgas (Wasserdampf und CO ₂), Abscheidung mittels CCS (inkl. Prozessemissionen)		
Einsatz C-armer bzw. freier Rohstoffe	Substitution von CO ₂ -reichen Rohstoffen durch vorkalzinierte Karbonate oder alternative Flussmittel und Stabilisatoren.		

Tabelle 3: Übersicht Dekarbonisierungsmaßnahmen Glasindustrie

In den folgenden Abschnitten werden die genannten Technologien detaillierter beschrieben.

5.1 Vollelektrische Schmelzwanne

In elektrischen Schmelzwannen wird die Schmelzenergie über Elektroden direkt in das Schmelzgut eingebracht. Hierbei wird der Effekt genutzt, dass geschmolzenes Glas elektrisch leitfähig ist und dieses durch eine Widerstanderhitzung (Joule-Prinzip) erwärmt wird.

Status Quo

Elektrische Schmelzwannen werden bereits heute in der Glasindustrie eingesetzt. Vereinzelt kommen vollelektrische Schmelzwannen für kleine Produktionsmengen (bis 50 tpd Schmelzkapazität) bei der Herstellung von Kosmetikund Spezialgläsern zum Einsatz. Darüber hinaus wird das elektrische Schmelzen in der Behälter- und Flachglasindustrie in Form des sogenannten "Boosting" eingesetzt. Beim elektrischen Boosting wird ca. 5 – 15% der benötigten Schmelzenergie elektrisch über Elektroden am Boden der Wanne zusätzlich zur konventionellen verbrennungsbasierten Prozesswärmeerzeugung oberhalb der Schmelze eingebracht. Das Boosting wird in der Regel zur Steigerung der Produktionskapazität einer bestehenden Wanne und zur Verbesserung der Glasqualität eingesetzt.

Aufgrund der höheren Betriebskosten beim elektrischen Schmelzen durch den relativ zum Erdgas teureren Energieträger Strom wird das elektrische Schmelzen bisher nur bei wenigen Gläsern mit speziellen Anforderungen eingesetzt. Die spezifischen Kapitalkosten elektrischer Wannen sind meist etwas niedriger, da keine Wärmerückgewinnung aus den Abgasen erforderlich ist.

Darüber hinaus spielt die Skalierung von vollelektrischen Schmelzwannen, also die maximale Schmelzkapazität, durch das vorherrschende vertikale Schmelzen eine entscheidende Rolle. Dieses Prinzip bzw. die Geometrie des vertikalen Schmelzens limitiert die Schmelzkapazität, sodass die für Behälterglas gängigen Schmelzwannen mit einer Schmelzleistung von 300 bis 600 und für Flachglas von 600 bis 1000 Tonnen pro Tag mit dem heutigen Stand der Technik noch nicht erreicht werden können.

Technische Spezifika

Schmelzverfahren

Glas ist bei Umgebungstemperaturen ein elektrischer Isolator, im geschmolzenen Zustand ab 950°C allerdings stromleitend. Diese Eigenschaft wird genutzt, um die Schmelzenergie durch Widerstandsheizung direkt in das Schmelzgut einzubringen. Für die Inbetriebnahme von vollelektrischen Schmelzwannen muss die Schmelzwanne sowie deren Inhalt, welcher aus kaltem Gemenge und Scherben besteht, zunächst auf Betriebstemperatur gebracht werden. Hierfür kommen auch bei elektrischen Schmelzwannen konventionelle gas- oder ölbetriebene Brenner zum Einsatz. Sobald die Betriebstemperatur erreicht

und eine flüssige Glasschmelze erzeugt wurde, wird die weitere Schmelzenergie elektrisch über Elektroden zugeführt und die Brenner werden abgeschaltet.

Aktueller Stand der Technik bei vollelektrischen Schmelzwannen ist das "Cold-Top"-Verfahren. Bei diesem wird das Gemenge durch traversierende Gurtförderer gleichmäßig über die gesamte Oberfläche der Schmelzwanne verteilt, sodass hierdurch ein geschlossener Gemengeteppich entsteht, der die Glasschmelze abdeckt. Dieser Gemengeteppich wirkt als isolierende Schicht zum Oberofen. Der

Oberofen der Schmelzwanne ist dadurch keinen hohen Temperaturen und Belastungen ausgesetzt, sodass die Feuerfestmaterialen des Oberofens deutlich langsamer verschleißen. Das geschmolzene Glas wird in der Regel am Wannenboden abgezogen, sodass sich ein von oben nach unten gerichtetes, vertikales Strömungsprofil in der Schmelzwanne ausbildet.

Geometrie der Schmelzwanne

Die Größe und somit die mögliche Schmelzkapazität von elektrischen Schmelzwannen wird durch die Position der Elektroden und deren Form bestimmt. Somit spielt die geometrische Auslegung der elektrischen Schmelzwanne für deren Skalierungsmöglichkeiten eine entscheidende Rolle. Beim Cold-Top-Verfahren ist die Schmelzkapazität, basierend auf der kreisförmigen Grundfläche, durch deren Durchmesser begrenzt. Die Glasqualität wird durch die Strecke der Gemengeeinbringung bis zum Durchlass der Glasschmelze aus der Schmelzwanne heraus bestimmt. Beim Cold-Top-Verfahren wird diese Strecke primär durch die Tiefe der Wanne vorgegeben. Je tiefer eine Cold-Top-Wanne ausgelegt wird, desto länger ist die Strecke durch die Wanne und somit auch die Verweildauer, die zur Entgasung zur Verfügung steht. Die Tiefe der Schmelzwanne kann jedoch nicht beliebig groß gewählt werden, da mit zunehmender Höhe der Wanne der Glasdruck an der Durchlassstelle steigt und diese generell einen kritischen Punkt in der Schmelzwanne darstellt. Schäden an der Durchlassstelle sind schwer zu beheben und somit unter allen Umständen zu vermeiden.

Alternativ könnte eine vollelektrische Schmelzwanne auch mit dem konventionellen Schmelzkonzept der horizontalen Strömungsrichtung ausgelegt werden. Die qualitätsbestimmende Strecke der elektrischen, horizontalen Schmelzwanne kann dabei beliebig variiert werden, sodass die Schmelzkapazität entsprechend erhöht und somit die notwendige Skalierung umgesetzt werden könnte.

Maßgeblich für die elektrische Schmelzleistung ist der Abstand der Elektroden in der Schmelze. Dieser bestimmt die benötigte Spannung zur Steuerung der eingebrachten Leistung. Der Abstand bzw. die Anbringung der Elektroden hängt von deren Typ und Bauart ab. Hierbei wird zwischen den folgenden Elektrodentypen unterschieden:

- Top-Elektroden: Einbringung der Elektroden von oben durch den Oberofen
- Seitenelektroden: Anbringung an den Seitenwänden der Schmelzwanne
- Bodenelektroden: Anbringung im Boden der Schmelzwanne

Ein homogenes, elektrisches Feld ist für ein gleichmäßiges Einschmelzen und Läutern besonders geeignet. Dieses homogene Feld lässt sich am besten durch gleichmäßig verteilte Seitenelektroden an den Seitenwänden der Schmelzwannen ausrichten. Für die Skalierung der elektrischen Schmelzwanne steht somit die Maximierung der Breite der Schmelzwanne dem daraus entstehenden Abstand der Seitenelektroden entgegen. Der Abstand der Elektroden bestimmt die benötigte Spannung, welche für eine definierte Leistungsübertragung notwendig ist. Entsprechend sind zu große Abstände zwischen den Elektroden zur Vermeidung von zu hohen Spannungen zu vermeiden. Zu hohe Spannungen könnten durch den zusätzlichen Einsatz von Bodenelektroden und somit durch eine Kombination aus Seiten- und Bodenelektroden vermieden werden.

Glasqualität

Neben der Skalierung ist die geforderte Glasqualität ein wesentlicher Faktor beim Einsatz von vollelektrischen Schmelzwannen. Die Qualität des produzierten Glasprodukts hängt wesentlich vom Läuterprozess in der Schmelzwanne ab. Zur Herstellung von qualitativ hochwertigen Gläsern muss der Gemengeteppich eine geschlossene Oberfläche aufweisen, welche zum einen thermisch isolierend für die Glasschmelze wirkt und zum anderen eine Durchlässigkeit für in der Schmelze entstehende Gase aufweist, sodass die Läuterung, d.h. das Entfernen der Gasblasen aus der Schmelze, möglichst vollständig ist. Zur Gewährleistung dieser Stabilität muss das zugeführte Gemenge eine sehr konstante Zusammensetzung haben und die Zuggeschwindigkeit der Glasschmelze nur marginal variiert werden (Zier et al. 2021).

Scherbeneinsatz

Der Anteil der eingesetzten Scherben am Gemenge variiert je nach Glassorte. Für Behälterglas kann der Anteil der Scherben bis zu 90% des gesamten Gemenges ausmachen. Dies kann bei vollelektrischen Schmelzwannen durch die bereits erwähnte notwendige stabile Oberfläche und Isolierung des Gemengeteppichs zu Problemen führen. Zusätzlich steigt die Gefahr der Einbringung von metallischen oder keramischen Fremdstoffen durch den Einsatz von Fremdscherben. Durch die Reaktion mit den Elektroden kann dies zu einer erheblichen Gefahr für die Schmelzwanne werden. Daher ist ein hoher Scherbenanteil am Gemenge eine kritische Größe bei vollelektrischen Schmelzwannen, für welche es weiter Forschung und Entwicklung bedarf.

Lebensdauer

Die Lebensdauer einer elektrischen Schmelzwanne ist im Vergleich zu den konventionellen verbrennungsbasierten Schmelzwannen wesentlich kürzer. Aktuell beträgt die Dauer einer typischen Wannenreise einer vollelektrischen Schmelzwanne zwischen 5 und 7 Jahren. Dabei liegt der obere Grenzwert für Behälter- und Fasergläser und der untere Grenzwert für qualitativ hochwertiges Glas, wie bspw. Spezialglas, vor. In vollelektrischen Wannen wird das Feuerfestmaterial des Oberofens durch den isolierenden Gemengeteppich geringeren Belastungen ausgesetzt, dafür wird das Feuerfestmaterial infolge der hohen Stromdichten im Bereich der Elektroden extrem stark beansprucht. Diese punktuelle Belastung führt zu einem erhöhten Verschleiß der Feuerfestmaterialien im Bereich um die Elektroden.

Infrastruktur

Der Stromanschluss für den Bezug des Energieträgers Strom zum Betrieb der teilelektrischen Schmelzwannen ist in einem aktiven Glaswerk vorhanden. Für die Umstellung auf vollelektrisches Schmelzen müssen die Kapazität des Stromanschlusses sowie die zum Glaswerk führenden Stromleitungen aufgrund der erhöhten Stromleistung der Schmelzwannen auf mehr als das 10-fache ausgebaut und erweitert werden. Darüber hinaus muss die Stromversorgung im Werk sowie die Energieinfrastruktur der Glaswanne neu ausgelegt werden.

Der Faktor Zeit spielt bei der Elektrifizierung von konventionellen Wannen deshalb eine wichtige Rolle. Allein der Ausbau des Stromanschlusses und der Stromnetze kann jeweils mehrere Jahre dauern. Somit ist für die Umrüstungsphase der Schmelzwanne und des Glaswerks von der Investitionsentscheidung bis zur Inbetriebnahme einer vollelektrischen Schmelzwanne mit mehr als 4 Jahren zu rechnen. Es kann zudem zu weiteren Verzögerungen durch die langen Lieferzeiten elektrischer Komponenten wie bspw. den Transformatoren kommen, welche durch eine erhöhte Nachfrage infolge der Elektrifizierung vieler weiterer Industriebranchen und Sektoren hervorgerufen wird.

Zudem muss als Back-Up-System für elektrische Schmelzwannen eine entsprechende Notstromversorgung geplant werden. Diese muss im Falle eines Stromausfalles den Betrieb der Schmelzwanne zumindest so weit aufrechterhalten, dass die Glasschmelze nicht erstarrt und zur Zerstörung der Schmelzwanne führt.

Aktuell beträgt die Dauer einer typischen Wannenreise einer vollelektrischen Schmelzwanne zwischen 5 und 7 Jahren.

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Der Energieverbrauch einer vollelektrischen Schmelzwanne liegt deutlich niedriger als für eine konventionelle verbrennungsbasierte Schmelzwanne. Der reduzierte Energieverbrauch basiert auf einer höheren thermischen Effizienz, welche mit der direkten Energieeinbringung in das Schmelzgut über die Elektroden zusammenhängt. Hierdurch wird der Großteil der erzeugten Prozesswärme im Schmelzprozess genutzt und thermische Verluste insbesondere über heißes Abgas minimiert. Die Effizienz von vollelektrischen Schmelzwannen mit einer Schmelzleistung von 170 Tonnen pro Tag liegt bei Werten um 85%, während der Wirkungsgrad einer konventionellen regenerativ beheizten Wanne der gleichen Größe nur ca. 45% beträgt. (R. Stormont 2010). Bei vollelektrischen Schmelzwannen entfällt aufgrund der fehlenden heißen Abgase eine Wärmerückgewinnung sowohl im Schmelzprozess als auch in vor- oder nachgelagerten Produktionsprozessen. Hierdurch kann der Energiebedarf im Schmelzprozess durch den Einsatz elektrischer Schmelzwannen sinken, der Energiebedarf in anderen Prozessen gleichzeitig steigen. So wurden bspw. in den letzten Jahren Effizienzgewinne im Glasherstellungsprozess durch eine

Gemenge- und Scherbenvorwärmung erzielt, welche durch eine Elektrifizierung des Schmelzprozesses nicht mehr eingesetzt werden könnte, da die bisher zur Vorwärmung genutzte Abwärme aus dem Abgasstrom nicht mehr zur Verfügung steht.

Die Elektrifizierung einer mit fossilen Energieträgern beheizten Schmelzwanne führt zu einer vollständigen Vermeidung der direkten energiebedingten CO₂-Emissionen. Es verbleiben lediglich die prozessbedingten CO₂-Emissionen durch die Dissoziation der eingesetzten Karbonate. Zudem verursacht der Betrieb der vollelektrischen Schmelzwanne nach wie vor indirekte CO₂-Emissionen, welche bei der Erzeugung des eingesetzten Stroms entstehen. Die spezifischen CO₂-Emissionen einer vollelektrischen Schmelzwanne sind somit primär vom Emissionsfaktor des eingesetzten Stroms abhängig. Entsprechend würde der Betrieb einer vollelektrischen Schmelzwanne unter der Annahme eines vollständig dekarbonisierten Stromsektors ohne energiebedingte Treibhausgasemissionen erfolgen.

Aussicht und Entwicklung der Technologie

Dem flächendeckenden Einsatz vollelektrischer Schmelzwannen stehen aktuell vor allem zwei Haupthemmnisse entgegen. Zum einen ist die Skalierung vollelektrischer Schmelzwannen begrenzt. Große Schmelzwannen, wie sie derzeit im Behälter- und Flachglasbereich eingesetzt werden, können bisher nicht 1:1 durch vollelektrische Wannen substituiert werden, d.h. es sind mehrere Wannen kleinerer Kapazität erforderlich, was sowohl unter Betriebsund Kostenaspekten zu deutlichen Nachteilen führt. Zum anderen kann die erforderliche Qualität für spezifische Glassorten mit hohen Anforderungen noch nicht sicher gewährleistet werden.

Die genannten Hemmnisse werden aktuell in diversen Forschungsprojekten untersucht. Es laufen bereits F&E-Projekte zur Skalierung vollelektrischer Schmelzwannen und zur Anwendung für spezielle Glassorten mit hohen Qualitätsanforderungen. Grundsätzlich werden die Probleme durch F&E und Demonstration als lösbar angesehen. Somit kann der Markteintritt vollelektrischer Schmelzwannen mit einer Schmelzkapazität von bis zu 300 Tonnen pro Tag für die Behälterglasbranche zur Mitte dieses Jahrzehnts geplant werden. Noch größere Wannen könnten laut Angaben der Wannenhersteller durch angepasste Geometrien zukünftig ebenfalls möglich sein, müssen allerdings erst noch die

Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit nachweisen. Entsprechend werden größere vollelektrische Schmelzwannen mit Schmelzkapazitäten von über 300 Tonnen pro Tag erst ab 2030 in den Transformationspfaden dieser Studie berücksichtigt. Kritischer wird die Situation für vollelektrische Schmelzwannen mit Schmelzleistungen von über 500 Tonnen pro Tag, wie sie für die Flachglasherstellung aktuell im Einsatz sind. Aktuell wird die Elektrifizierung für diese Wannengrößen nicht als eine realistische technische Option angesehen.

Ein weiterer entscheidender Faktor für den Einsatz von elektrischen Schmelzwannen sind die Betriebskosten. So spielt die Entwicklung des Strom- und des CO₂-Preises eine entscheidende Rolle für die Wirtschaftlichkeit eines Energieträgerwechsels von Gas zu Strom. Je schneller die Strompreise für industrielle Abnehmer sinken bzw. die Betriebs-

kosten konventioneller Schmelzwannen, bestehend aus den Energieträgerkosten der fossilen Brennstoffe und den hierdurch verursachten CO₂-Kosten, steigen, desto wahrscheinlicher und schneller wird eine Elektrifizierung der bestehenden Schmelzwannen eingeleitet und umgesetzt werden.

Im Behälterglasbereich haben bereits die ersten Unternehmen angekündigt, innerhalb der nächsten Jahre einen Teil ihrer bestehenden Anlagen auf vollelektrische Schmelzwannen umzurüsten. Bei Flachglasunternehmen ist zunächst der Einsatz von elektrischen Zusatzheizungen bzw. die Erweiterung der elektrischen Zusatzheizungen geplant.

Die aktuellen Entwicklungen hinsichtlich der Versorgungssicherheit mit Erdgas werden diesen Umstellungsprozess voraussichtlich weiter beschleunigen.

5.2 Einsatz von treibhausgasneutralen Gasen

Neben der Elektrifizierung des Schmelzprozesses kann auch durch eine Substitution der eingesetzten fossilen Energieträger durch sogenannte "grüne" oder treibhausgasneutrale Gase zur verbrennungsbasierten Prozesswärmeerzeugung eine Dekarbonisierung erfolgen.

Status Quo

Ähnlich wie beim Einsatz von elektrischen Schmelzwannen verhindert der erhöhte Preis der grünen, erneuerbaren Gase deren Einsatz in heutigen Schmelzwannen. Synthetisches Methan und Biogas können aus technischer Sicht ohne besondere Anpassungen direkt in konventionellen Schmelzwannen eingesetzt werden. Auch eine Beimischung von Wasserstoff und synthetischem Methan ist möglich, sodass eine stufenweise Umstellung erfolgen kann. Lediglich bei Zumischung oder Umstellung auf einen Wasserstoffbetrieb sind Anpassungen an der Wanne und den Brennern erforderlich.

Zu den treibhausgasneutralen Gasen zählen aus regenerativen Energien erzeugter (grüner) Wasserstoff, synthetisches Methan und Biogas.

Wasserstoff

Aktuell wird Wasserstoff in Deutschland noch nicht im Dauerbetrieb zur Glasherstellung eingesetzt, weder in monovalenter Betriebsweise noch als Beimischung. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie wird aber im Rahmen von mehreren Forschungsprojekten der Einsatz von Wasserstoff zur Befeuerung konventioneller Schmelzwannen getestet.

Synthetisches Methan und Biogas

Synthetisches Methan findet bisher aufgrund des gegenüber Erdgas erhöhten Preises und der fehlenden Verfügbarkeit keine Anwendung in der deutschen Glasindustrie. Ähnliches gilt für Biogas, allerdings setzen einzelne Hersteller teilweise Biogas ein. Bei einem Behälterglashersteller wird neben Erdgas auch Biogas von einem lokalen Landwirtschaftsbetrieb eingesetzt.

Technische Spezifika

Die oben erwähnten erneuerbaren Gase weisen unterschiedliche chemische Eigenschaften auf, welche deren Einsatzmöglichkeiten für den Betrieb konventioneller gasbasierter Schmelzwannen einschränken können. So hängt der Einsatz von Gasen in den Schmelzwannen unter anderem von deren Heizwert, dem Wobbeindex⁴, der adiabaten Flammentemperatur sowie der Zusammensetzung bzw. der Reinheit des Gases ab. Diese Eigenschaften entscheiden darüber, ob das Gas im gleichen Maßstab und ohne Auswirkungen für die Glasschmelze eingesetzt werden kann. Die Eignung der verschiedenen Gase für den Einsatz im Glasherstellungsprozess wird nachfolgend weiter erläutert.

Erneuerbare Gase können direkt vom Glaswerk über Pipelines, als Flüssiggas per LKW oder Waggons bezogen oder alternativ vor Ort erzeugt werden. Letzteres würde sich anbieten, wenn die zur Herstellung benötigten Stoffe wie Wasserstoff oder CO2 in großen Mengen anfallen oder erzeugt werden. Die Erzeugung von Wasserstoff am Produktionsstandort würde aber gegenüber der elektrischen Schmelze mit einem nochmal deutlich erhöhten Strombedarf einhergehen, sodass dies nur für Werke mit wenigen und kleinen Schmelzwannen als realistisch erscheint.

Wasserstoff

Wasserstoff weist andere Verbrennungseigenschaften als Erdgas auf, sodass beide Energieträger nicht ohne weiteres miteinander austauschbar sind. Durch das veränderte Brennverhalten der Flamme und der erhöhten adiabaten Verbrennungstemperatur beim Wasserstoffeinsatz muss sowohl das Verhältnis von Energieträger und Oxidator als auch die Auswahl der Feuerfestmaterialien des Oberofens angepasst werden. Zudem führt die erhöhte Verbrennungstemperatur beim Wasserstoffeinsatz zur verstärkten Stickoxidbildung im Abgas, die jedoch gemäß dem Bundesemissionsschutzgesetz bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten darf. Zur Einhaltung der Grenzwerte sind dann zusätzliche Emissionsminderungsmaßnahmen zur Reduzierung der NOx-Emissionen erforderlich (Gas- und WärmeInstitut Essen e.V., 2022).

Die Verbrennung von reinem Wasserstoff führt darüber hinaus zu einer erhöhten Wasserdampfkonzentration im Oberofen der Schmelzwanne. Der erhöhte Partialdruck des Wasserdampfes wirkt sich negativ auf die Stabilität der Feuerfestmaterialien des Oberofens aus, was zu einem erhöhten Verschleiß führt. Durch den zusätzlichen Verschleiß verkürzt sich die Lebensdauer der Schmelzwanne. Zum anderen kann sich die erhöhte Wasserdampfkonzentration im Oberofen auf die Glasqualität und Glasfarbe auswirken. Für eine Minimierung dieser Auswirkungen müssen sowohl die Wasserstoffzumischungsraten als auch die Zusammensetzung und die Menge der eingebrachten Rohstoffe möglichst konstant bleiben (Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., 2022).

⁴ Der Wobbeindex dient zur Charakterisierung der Qualität von Brenngasen. Er wird benötigt, um die Austauschbarkeit von Brenngasen zu beurteilen.

Synthetisches Methan und Biogas

Die Verbrennung von synthetischem Methan entspricht aufgrund der gleichen Eigenschaften des Brennstoffs dem der Erdgasverbrennung, sodass bei Einsatz in konventionellen Schmelzwannen keine Anpassungen erforderlich sind.

Biogas wird hauptsächlich durch eine anaerobe Vergärung aus landwirtschaftlichen Produkten und Abfällen erzeugt. Das hierbei entstehende Gas besteht nur zwischen 50 und 70% aus Methan und aus einem erhöhten Anteil Kohlenstoffdioxid. Somit weist Biogas ⁵ einen niedrigeren Heiz- und Brennwert als Erdgas oder synthetisches Methan auf, sodass Brennereinstellungen sowie Stoffströme angepasst werden müssen. Die Einsatzmöglichkeit von Biogas in Glasschmelzwannen wurde bereits sowohl durch einzelne praktische Umsetzung als auch durch gezielte Untersuchungen (Fiehl et al. 2017) nachgewiesen.

5 Biogas ist nicht zu verwechseln mit dem Biogasbezug aus dem Erdgasnetz, da es sich bei diesem um Biogas handelt, das vor der Netzeinspeisung auf Erdgasqualität aufbereitet wurde.

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Der Energieverbrauch in den Schmelzwannen verändert sich durch den Einsatz von erneuerbaren Gasen nur marginal. Allerdings müssen aufgrund der unterschiedlichen Heizwerte die Volumenströme und Brennereigenschaften angepasst werden. Wichtig hierbei ist vor allem, dass die Ofenraumtemperatur und somit der Wärmestrom in die Glasschmelze unverändert bleiben. Dies ist vor allem bei der Zumischung eines erneuerbaren Gases zum Erdgas zu berücksichtigen, bei welchem die Brennerleistung durch ein adäquates Regelungskonzept der Energieträger- und Luftzufuhr gesteuert werden muss (Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., 2022).

Bei der Verbrennung von Wasserstoff in den Schmelzwannen fallen keine primären CO₂-Emissionen an, sodass sich der Schmelzprozess durch den Einsatz von Wasserstoff hinsichtlich der energiebedingten CO₂-Emissionen vollständig dekarbonisieren lässt.

Beim Einsatz von synthetischem Methan und Biogas entstehen die gleichen Mengen CO₂ wie beim Einsatz von Erdgas. Bilanziell wurde das CO₂ aber bei der Herstellung von Biogas vorher der Atmosphäre entnommen, sodass der Einsatz und die Verbrennung des Energieträgers als CO₂-neutral betrachtet werden können. Ähnlich verhält es sich beim synthetischen Methan, bei dessen Herstellung das notwendige CO₂ aus der Luft entnommen wird oder aus der Abscheidung von anderen Prozessen stammt.

Aussicht und Entwicklung der Technologie

Der Einsatz erneuerbarer Gase wie Wasserstoff, synthetisches Methan und Biogas wird primär von deren Bezugspreis, deren Verfügbarkeit sowie der Wahl der Schmelzwannentechnologie abhängen.

Wasserstoff

Aktuell wird der Wasserstoffeinsatz in Schmelzwannen im Rahmen einiger Forschungsprojekte und ersten Feldtests in Unternehmen untersucht. Nach aktueller Einschätzung werden die technischen Herausforderungen beim Einsatz von Wasserstoff in den Schmelzwannen als lösbar angesehen, sodass Wasserstoff aus technischer Sicht eine realistische Alternative zum Erdgas darstellt (Gas- und Wärme-Institut Essen e.V., 2022). Wesentlich unsicherer ist, ob eine ausreichende Verfügbarkeit über ein flächendeckendes Wasserstoffnetz und zu bezahlbaren Kosten gegeben sein wird, was jedoch für die mögliche Nutzung in der Glasindustrie entscheidend sein wird. Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff wird auch durch den Import von Wasserstoff und den Ausbau der nationalen Erzeugungskapazitäten bestimmt. Dabei wird die Lage der einzelnen Glasstandorte eine Rolle spielen. Für ein erstes Wasserstoffnetz in Deutschland liegen bereits Pläne vor, worauf im Kapitel 6.1.3.2 eingegangen wird. Langfristig ist geplant, das bestehende Erdgasnetz zum Betrieb auf Wasserstoff umzurüsten. Hier muss jedoch für alle einzelnen Werksanschlussleitungen geprüft werden, ob die vorhandene Infrastruktur hierfür geeignet ist.

Synthetisches Methan und Biogas

Der großskalige Einsatz von synthetischem Methan bzw. Biogas in der Glasindustrie wird aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit der beiden Gase als eher unwahrscheinlich beurteilt. Im Falle von biogenem Gas ist zudem die Konkurrenz zwischen der Erzeugung von Nahrungsmitteln und der Herstellung von Energieträgern von Relevanz. Der Einsatz von Biogas wird sich deshalb auf vereinzelte Anwendungen einer Zumischung in Glaswerken beschränken, für welche ein landwirtschaftlicher Erzeuger von Biogas in unmittelbarer Umgebung vorhanden ist.

Eine weitere Option bestünde in der Erzeugung von synthetischem Methan im Glaswerk. Dazu könnte der Wasserstoff bezogen oder vor Ort erzeugt werden, das zur Methanisierung erforderliche CO₂ könnte aus dem Verbrennungsabgas der Schmelzwanne abgetrennt werden.

Hierdurch würden ein hoher Anteil der CO₂-Emissionen in einer Art Kreislauf gehalten und vermieden werden, ohne dass es an der Schmelzwanne zu Anpassungen kommen müsste. Zudem können nicht nur die energiebedingten, sondern auch die prozessbedingten CO2-Emissionen zur Methanisierung am Standort genutzt werden. Hierdurch könnte eine über den eigenen Bedarf hinausgehende Menge synthetischen Methans erzeugt werden. Dieser Überschuss könnte an umliegende Produktionsbetriebe verkauft und zur Erzielung zusätzlicher Umsätze eingesetzt werden. Allerdings ist eine interne Methanisierung durch die physikalischen Wirkungsgradverluste und den Bezug des teureren Energieträgers Wasserstoff mit sehr hohen Kosten verbunden, sodass dieses Dekarbonisierungskonzept vor allem aufgrund der ökonomischen Rahmenbedingungen nicht umsetzbar erscheint. Die dezentrale Wasserstofferzeugung könnte vor allem für Standorte eine Option sein, die Oxy-Fuel-Wannen betreiben, da in diesem Fall nicht nur der Wasserstoff, sondern auch das Nebenprodukt der Elektrolyse, der Sauerstoff, direkt genutzt werden und den ebenfalls teuren Fremdbezug von Sauerstoff substituieren könnte.

Sollten die grundlegenden Bedingungen für den Einsatz von Wasserstoff, synthetischem Methan oder Biogas in einem Glaswerk gegeben sein, wird deren Einsatz vor allem von der Technologiestrategie der einzelnen Unternehmen für die Schmelzwannen abhängen. Entscheidet sich ein Unternehmen dafür beim vertrauten verbrennungsbasierten Betrieb einer Schmelzwanne zu bleiben, muss zur Dekarbonisierung des Glasherstellungsprozesses auf grüne Gase umgestellt werden. Darüber hinaus können grüne Gase als weitere Energieträger in einer elektrifizierten Schmelzwanne eingesetzt werden. Durch die Kombination der Vorteile der verbrennungsbasierten und der elektrischen Schmelzwanne könnten die in Kapitel 5.1 aufgeführten Hemmnisse wie bspw. die Sicherstellung der erforderlichen Glasqualität für bestimmte Gläser sowie der Skalierung überwunden werden. Für diesen bivalenten Betrieb werden Hybridwannen eingesetzt, auf die im folgenden Kapitel 5.3 eingegangen wird.

5.3 Hybridwannen

Als Hybridwannen bezeichnet man Schmelzaggregate, in denen zum Schmelzen des Glases Prozesswärme sowohl durch elektrischen Strom als auch durch (synthetische) Brennstoffe eingesetzt wird.

Hierzu wird das Prinzip der elektrischen Zusatzheizung (Boosting) erweitert, indem der elektrische Anteil nicht mehr nur eine untergeordnete, sondern eine gleichberechtigte oder gar übergeordnete Rolle bei der Bereitstellung der Prozesswärme spielt. In einer Hybridwanne wird somit die benötigte thermische Energie zum Schmelzen und Läutern durch die direkte elektrische Übertragung durch integrierte Elektroden und durch die Verbrennung von gasförmigen Energieträgern bereitgestellt.

Zur Unterscheidung der Hybridwanne von der klassischen verbrennungsbasierten Schmelzwanne mit elektrischer Zusatzheizung wird im Rahmen der Roadmap eine Kategorisierung in Abhängigkeit von den jeweiligen Anteilen der elektrischen und verbrennungsbasierten Energiebereitstellung gemäß Tabelle 4 festgelegt.

	Energieträgeranteile für die Schmelze								
Kategorie	Elektriscl	her Strom	Brennstoffe						
	Min	Max	Min	Max					
Elektrische Zusatzheizung	0%	20%	80%	100%					
Hybridwanne	20%	40%	60%	80%					
Super-Hybridwanne	60%	80%	20%	40%					

Tabelle 4: Kategorisierung von Hybridwannen nach Energieträgeranteilen für die Schmelze

Status Quo

Zum heutigen Zeitpunkt sind noch keine Hybridwannen in der deutschen Glasindustrie im Einsatz. In der Behälterglasindustrie ist die elektrische Zusatzheizung, durch die zwischen 5 und 15% der notwendigen Schmelzenergie elektrisch zugeführt wird, aktueller Stand und findet sich bei über 90% der installierten Schmelzwannen. In der Flachglasindustrie kommt die elektrische Zusatzheizung

in den Schmelzwannen ebenfalls bereits zum Einsatz, allerdings nur sehr vereinzelt. Im Bereich der Herstellung von Spezialglas werden bisher nur wenige Hybridwannen, sondern hauptsächlich vollelektrische oder monovalente, verbrennungsbasierte Schmelzwannen eingesetzt.

Zum heutigen Zeitpunkt sind noch keine Hybridwannen in der deutschen Glasindustrie im Einsatz.

Technische Spezifika

Die in Tabelle 4 getroffene Kategorisierung richtet sich insbesondere nach dem Schmelzverhalten bzw. der Konvektion in der Schmelzwanne. Das Strömungsprofil der Glasschmelze verändert sich bei niedrigen Anteilen elektrischer Energieeinbringung über verteilte Elektroden nur minimal. Erst mit zunehmenden elektrischen Anteilen der Schmelzwärmebereitstellung bildet sich im Vergleich zur konventionellen verbrennungsbasierten Schmelzwanne ein abweichendes Strömungsprofil aus, da die Wärme nicht mehr überwiegend durch Strahlung von oben in das Gemenge und die Glasschmelze eingetragen wird.

Durch die hybride Betriebsweise der Schmelzwanne können die beiden größten technischen Hemmnisse der vollelektrischen Schmelzwanne weitgehend überwunden werden. Zum einen kann durch eine bivalente Prozesswärmeerzeugung durch den Einsatz von Strom und Gasen die Schmelzleistung und somit die Produktionskapazität deut-

lich erhöht werden. So könnte die Schmelzleistung durch eine horizontal ausgelegte Ausrichtung der Schmelzwanne mit einer Flammenausbildung im Oberofen und eingebrachten Elektroden im Wannenboden und an den Seiten ähnliche Größenordnungen wie die gegenwärtigen Schmelzwannen erreichen. Zum anderen können durch eine Hybridwanne die erhöhten Qualitätsanforderungen für bestimmte Glasprodukte erfüllt werden. Realisiert wird dies, indem dem vollelektrischen Schmelzbereich mit geschlossenem Gemengeteppich eine zusätzliche Läuterzone mit freier Oberfläche folgt. In dieser Läuterzone findet die Verbrennung eines gasförmigen Energieträgers statt, sodass die Gase aus dem Schmelzbad leichter ausgetrieben und die erforderliche Läuterung vollständig möglich wird. Die Lebensdauer von Hybridschmelzwannen wird abhängig vom elektrischen Anteil der Energiezufuhr durch die erhöhte Belastung im Bereich der Elektroden verringert, allerdings in geringerem Maße als bei vollelektrischen Schmelzwannen.

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Durch die bivalente Energiebereitstellung in der Schmelzwanne fällt der Effizienzgewinn durch die direkte elektrische Energieeinbringung etwas geringer aus als bei vollelektrischen Schmelzwannen. Zusätzlich reduziert sich bei der Hybridwanne, abhängig vom Anteil der verbrennungsbasierten Wärmeerzeugung, der Rauchgasmassenstrom deutlich. Entsprechend geringer fallen die Effizienzpotentiale durch Wärmerückgewinnung aus dem Abgas aus. Dies verringert die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von Regeneratoren oder Rekuperatoren.

Somit liegt der Energieverbrauch von Hybridwannen abhängig von den Anteilen der Energieträger Strom und Gas zwischen dem Energieverbrauch einer vollelektrischen und einer konventionellen verbrennungsbasierten Schmelzwanne. Der spezifische Energieverbrauch nimmt dabei mit zunehmendem Anteil der elektrischen Schmelzleistung ab.

Beim Betrieb einer Hybridwanne fallen weiter direkte CO₂-Emissionen durch die Verbrennung des gasförmigen Energieträgers an, sofern keine synthetischen Brennstoffe eingesetzt werden, sowie durch die Dissoziation der eingesetzten Karbonate. Zu berücksichtigen sind ggf. auch die indirekten CO₂-Emissionen für den Energieträger Strom.

Aussicht und Entwicklung der Technologie

Aufgrund der möglichen Produktionskapazität von Hybridwannen können diese als Dekarbonisierungstechnologie in der Behälter- und Flachglasindustrie eingesetzt werden und dort die gegenwärtig genutzten konventionellen Schmelzwannen ersetzen. Im Behälterglasbereich wird dies noch in diesem Jahrzehnt möglich sein, da bspw. bereits eine erste hybride Schmelzwanne mit einer Schmelzleistung von 400 Tonnen pro Tag von der Firma Sorg gebaut wurde (Glass International 2020). Im Flachglasbereich wird im Zuge einer geplanten Elektrifizierung zunächst der Anteil elektrischer Energie erhöht bzw. werden erstmalig elektrische Zusatzheizungen installiert. Für Schmelzwannen mit Schmelzkapazitäten von über 600 Tonnen pro Tag ist der erfolgreiche Einsatz des hybriden Schmelzkonzepts mit einem erhöhten Anteil an elektrischer Energieeinbringung noch nachzuweisen. Daher ist mit einem Einsatz von Super-Hybridwannen im Flachglasbereich erst nach 2030 zu rechnen. Für den Spezialglasbereich werden die Hybrid-

wannen ebenfalls eine zeitnahe Option zur Reduzierung der CO_2 -Emissionen sein. Das Konzept der hybriden Schmelzwanne mit gesondertem Läuterbereich ist aktuell Gegenstand von Forschungsprojekten, in welchen der Nachweis einer erfolgreichen Umsetzung erbracht und hierdurch ein zeitnaher Markteintritt der Technologie ermöglicht werden soll. (Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien 2022).

5.4 Oxy-Fuel-Wanne und CCU und/oder CCS

Die Oxy-Fuel-Technologie ist ein Verbrennungsverfahren, in welchem ein Energieträger mit reinem Sauerstoff oxidiert wird.

Hierdurch kommt es zu höheren adiabaten Verbrennungstemperaturen und zu Energieeinsparungen im Vergleich zur konventionellen Verbrennung mit Luft, da der sonst in der Luft enthaltene inerte Stickstoff nicht mit erwärmt werden muss und die Abgasverluste deutlich reduziert werden.

Das Abgas einer Oxy-Fuel-Verbrennung besteht überwiegend aus Wasserdampf und Kohlendioxid. Nach der Kondensation des Wasserdampfes kann dieser einfach aus dem Gasstrom abgetrennt werden. Das verbleibende Ab-

gas besteht dann überwiegend aus CO₂, sodass sich die Abscheidung und Nutzung (CCU) oder die Speicherung (CCS) für eine vollständige Dekarbonisierung des Schmelzprozesses anbietet.

Status Quo

Die Oxy-Fuel-Technologie zur CO₂-Abscheidung wurde für die CO₂-Abscheidung in Kraftwerken konzipiert. In der Glasindustrie ist die Oxy-Fuel-Verbrennung in den Schmelzwannen ebenfalls eine etablierte Technologie für die Effizienzsteigerung oder die Kapazitätserhöhung und ist überwiegend in der Spezialglasindustrie im Einsatz, da dort die höchsten Temperaturen in der Schmelzwanne erforderlich sind. Die Effizienzsteigerung durch den Sauerstoff-

einsatz ist prozessbedingt umso größer, je höher die Prozesstemperaturen sind. Darüber hinaus gibt es in Deutschland noch wenige Oxy-Fuel-Schmelzwannen in der Behälterglasindustrie. Die relativ geringe Anwendungsbreite ist trotz höherer thermischer Effizienz und entsprechender Energieeinsparungen im Schmelzprozess auf die hohen Kosten für die Erzeugung bzw. den Bezug des Sauerstoffs zurückzuführen.

Technische Spezifika

Die Verbrennung mit reinem Sauerstoff führt zu einer erhöhten Flammentemperatur in der Schmelzwanne. Die Wärmeübertragung durch Strahlung an die Schmelze wird durch die höheren Temperaturen im Oberofen erhöht, was zusätzlich zu größeren Temperaturgradienten und damit einer stärkeren Konvektion in der Schmelze führt. Die stärkere Konvektion wirkt sich positiv auf die Glasqualität aus, weshalb die Technologie vor allem zur Herstellung von qualitativ hochwertigen und damit margenstarken Gläsern eingesetzt wird.

Da die Abgasvolumina der Verbrennung des Energieträgers mit reinem Sauerstoff stark reduziert sind, werden Oxy-Fuel-Schmelzwannen in der Regel ohne Wärmerückgewinnung ausgeführt. Hierdurch können die Schmelzwannen deutlich kompakter gebaut werden (kein Platzbedarf für Regeneratoren), wodurch die erforderlichen Investitionen sinken.

Ein zusätzlicher positiver Nebeneffekt bei der Verbrennung mit reinem Sauerstoff ist die Reduzierung der Stickstoff-oxidbildung. Durch Einsatz der Oxy-Fuel-Technologie können die stetig verschärften Grenzwerte für die NO_X-Emissionen in Glaswerken auch ohne zusätzlichen Einbau von NO_X-Minderungstechnologien, wie bspw. SCR-Anlagen, eingehalten werden.

Bei der Verbrennung eines fossilen Energieträgers mit reinem Sauerstoff entstehen hauptsächlich Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid (CO₂). Durch die Kondensation und Abscheidung des Wasserdampfes verbleibt ein entsprechend reiner CO₂-Abgasstrom. Dies ermöglicht sowohl eine Nutzung (CCU) als auch eine Speicherung (CCS) des gebildeten CO₂.

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Der Energieverbrauch von Oxy-Fuel-Wannen ist durch effizientere Verbrennung des Energieträgers mit reinem Sauerstoff geringer als der von konventionellen Schmelzwannen. Allerdings kommt aufgrund des geringen Abgasvolumens aus wirtschaftlichen Gründen keine Wärmerückgewinnung durch Regenerativkammern oder Rekuperatoren zum Einsatz. Hierdurch verlässt das Abgas die Schmelzwanne mit einer relativ hohen Temperatur, welche vor der anschließenden Abgasreinigung bspw. durch Quenchen mit Luft heruntergekühlt werden muss. Durch den Verzicht auf die Wärmerückgewinnung sinken die durch die erhöhte thermische Effizienz erzielbare Energieeinsparungen im Vergleich zu einer konventionellen Verbrennung mit Wärmerückgewinnung ab.

Für eine ganzheitliche energetische Bewertung der Oxy-Fuel-Schmelzwanne muss zudem der Stromeinsatz für die Sauerstofferzeugung mitbilanziert werden. Diese Herstellung über die Luftzerlegung oder die Druckwechseladsorption ist sehr stromintensiv, sodass die gewonnenen Brennstoffeffizienzgewinne in der Schmelzwanne durch den Stromeinsatz zur Sauerstofferzeugung kompensiert werden.

Der reduzierte Energieverbrauch durch die effizientere Verbrennung mit reinem Sauerstoff führt zu einer Reduktion der direkten CO₂-Emissionen. Werden die indirekten CO₂-Emissionen bei der Sauerstofferzeugung mitbilanziert, kann unter Berücksichtigung des aktuellen CO₂-Emissionsfaktors für Strom keine CO₂-Minderung im Vergleich zu den konventionellen Schmelzwannen erzielt werden. Wird eine Oxy-Fuel-Wanne um ein CCS/CCU-Konzept erweitert, könnten gleichzeitig sowohl die energiebedingten als auch die prozessbedingten CO₂-Emissionen adressiert werden. Demnach könnte eine Kombination dieser beiden Technologien zu einer vollständig treibhausgasneutralen oder bei Einsatz synthetischer Brennstoffe sogar zu einer Treibhausgas negativen Glasherstellung führen.

Aussicht und Entwicklung der Technologie

Die Oxy-Fuel-Technologie gilt als ausgereift, da sie bereits in vielen industriellen Anwendungen und in der Glasindustrie zum Einsatz kommt. Für die Dekarbonisierung in der Glasbranche kommt die Technologie allerdings nur in Verbindung mit einem CCS/CCU-Konzept in Frage. Die CO2-Abscheidung und Speicherung in Deutschland wird bisher nicht als spezifische Dekarbonisierungsmaßnahme für die Industrie in Betracht gezogen. Lediglich wenn Chancen für den Export des CO2 und die Einlagerung außerhalb Deutschlands möglich sind, könnte CCS eine Option darstellen. Dies setzt aber eine Nähe der Standorte zu Ostoder Nordsee und den Aufbau einer entsprechenden Transportinfrastruktur voraus. Allein für die Emissionen der Glasindustrie wird der Aufbau eines Transportnetzes nicht wirtschaftlich realisierbar sein. Daher ist der Einsatz der Oxy-

Fuel-Technologie zur Dekarbonisierung des Glassektors als eher unwahrscheinlich anzusehen.

In der Spezialglasindustrie werden bereits Oxy-Fuel-Wannen eingesetzt, sodass die Technologie unter gewissen Bedingungen eine geeignete Dekarbonisierungsmaßnahme in Kombination mit dem Einsatz erneuerbarer Gase darstellen könnte. Wird ein Oxy-Fuel-Brenner mit Wasserstoff betrieben, werden die energiebedingten CO₂-Emissionen vollständig vermieden. Attraktiv könnte diese Option vor allem unter dem Aspekt der werksinternen Wasserstofferzeugung durch einen Elektrolyseur werden. Neben dem benötigten Wasserstoff würde gleichzeitig die zur Verbrennung notwendige Menge an Sauerstoff erzeugt, sodass dieser nicht zusätzlich bezogen werden müsste und als Nebenprodukt quasi kostenfrei an-

fiele. Allerdings ist die Onsite-Erzeugung von Wasserstoff aufgrund der großen erforderlichen Strommengen und des hiermit verbundenen zusätzlichen finanziellen Aufwandes eine nicht zu vernachlässigende Hürde, sodass dieser Pfad ebenfalls als relativ unwahrscheinlich anzusehen ist. Zudem stellt die Abgaszusammensetzung durch reaktive Komponenten wie Natrium-Borate eine Herausforderung dar, durch welche sich der Abscheidevorgang durch die Zersetzung verwendeter Filter als schwierig gestaltet.

5.5 Einsatz kohlenstoffarmer und kohlenstofffreier Rohstoffe

Bei der Glasherstellung entstehen prozessbedingte CO₂-Emissionen, die nicht der Energiebereitstellung zuzuordnen sind, durch chemische Reaktionen der eingesetzten Rohstoffe.

Auf diese "prozessbedingten" CO₂-Emissionen entfallen je nach Glassorte bis zu 30% der Gesamtemissionen und lassen sich entsprechend nicht durch den Einsatz von treibhausgasneutralen Energieträgern vermeiden.

Die prozessbedingten CO₂-Emissionen werden bei der Umwandlung von Karbonaten gebildet, die für die chemische Zielzusammensetzung des produzierten Glases sowie zur Senkung der Schmelztemperatur eingesetzt werden. Die Karbonate werden mit dem Gemenge vermischt und reagieren in der Schmelzwanne zu Oxiden und Kohlenstoffdioxid.

Außerdem werden dem Gemenge Glasscherben beigefügt, durch welche Rohstoffe ersetzt und Energie beim Einschmelzprozess eingespart werden kann.

Zur Reduzierung der prozessbedingten CO₂-Emissionen gibt es folgende Möglichkeiten:

- Erhöhung des Scherbenanteils im Rohstoffgemenge
- Einsatz von vorkalzinierten Rohstoffen
- Einsatz von CO2-freien Rohstoffen

Status Quo

Erhöhung des Scherbenanteils im Rohstoffgemenge

Aufgrund der Reduzierung des Energie- und Rohstoffverbrauchs durch den Einsatz von Scherben ist die Glasindustrie bereits seit Jahrzehnten darum bemüht, den Anteil von Scherbenglas am gesamten Gemenge zu maximieren. Hierzu wurde bereits 1974 ein flächendeckendes Recyclingund Sammelsystem für Behälterglas in Deutschland ein-

gerichtet und seitdem stetig weiterentwickelt und ausgebaut. Hierdurch wird der Großteil des in Umlauf gebrachten Behälterglases nach dessen Gebrauch gesammelt, aufbereitet und wieder zur Glasproduktion eingesetzt. Die hohe Recyclingquote von Behälterglas ermöglicht eine konstant große Menge an verfügbaren Altglasscherben. Behälterglaswerke in Deutschland können deshalb einen Scherbenanteil nahe der technisch maximal realisierbaren Werte erreichen, wobei dieser Maximalanteil für die verschie-

denen Glassorten und Glasfarben variiert. Bei grünem Behälterglas liegt der Anteil der eingesetzten externen Scherben aktuell bei bis zu 90% und bei weißem Behälterglas bei bis zu 60%.

Für die Bereiche Flach- und Spezialglas existiert solch ein flächendeckendes Recycling- und Sammelsystem bisher aufgrund der Langlebigkeit und Heterogenität der Produkte noch nicht.

Es existiert zwar ein Sammelsystem für Flachglas im weiterverarbeitenden Gewerbe, in welchem allerdings nur ein Bruchteil des im Umlauf befindlichen Flachglases recycelt wird. Die hohen Qualitätsansprüche von Flachglas bezüglich Farbreinheit und Blasenfreiheit bzw. von Spezialglas bezüglich der chemischen Zusammensetzung erschweren den Einsatz von externen Scherben. Hierdurch begrenzt sich der Einsatz von Altglasscherben bei der Herstellung dieser Glassorten hauptsächlich auf interne Scherben aus der eigenen Produktion. Dennoch wird nahezu das gesamte Flachglas durch Einsatz in der Behälterglas- und Glasfaserindustrie recycelt (Institut für Fenstertechnik 2019), sodass die Recyclingpotenziale gering sind.

Einsatz von vorkalzinierten oder CO₂-freien Rohstoffen

Aktuell werden weder vorkalzinierte noch alternative CO2-freie Rohstoffe in der deutschen Glasindustrie eingesetzt, da die gängigen Karbonate ausreichend verfügbar und günstiger zu beziehen sind als vorkalzinierte oder CO2-freie Rohstoffe. Vereinzelt wurden CO2-freie Rohstoffe wie bspw. Natriumhydroxid (Natronlauge) bereits als Ersatz für Soda in der Glasindustrie eingesetzt. Allerdings ist der Einsatz solcher alternativen Rohstoffe von den Gegebenheiten der umliegenden Industrie abhängig, da diese meist als unerwünschte Nebenprodukte in benachbarten Betrieben anfallen und dementsprechend günstig zu beziehen sind. So entsteht Natronlauge bspw. in der chemischen Industrie im Rahmen der Chloralkali-Elektrolyse und würde sich als alternativer Einsatzstoff in benachbarten Glaswerken anbieten.

Technische Spezifika

Erhöhung des Scherbenanteils am Rohstoffgemenge

Altglasscherben werden dem Gemenge im Glasherstellungsprozess beigemischt, um Rohstoffe und Energie einzusparen. Ein begrenzender Faktor beim Einsatz von Altglasscherben ist die geforderte Qualität des Glasprodukts. Je höher und spezifischer die Anforderungen des Zielprodukts sind, desto geringer ist der einsetzbare Scherbenanteil, da dessen genaue Zusammensetzung nicht eindeutig nachweisbar ist und somit die gewünschte Zielzusammensetzung des Glasprodukts stören kann. Je nach Glassorte und Glasfarbe besteht ein technisch maximaler Anteil an einzusetzenden Glasscherben,

mit welchem die erforderliche Qualität und Farbe des zu fertigenden Produkts gewährleistet werden kann. Für grünes Behälterglas beträgt dieser maximale Anteil bspw. 95 % und für weißes Behälterglas 70% (Alois Kessler 2020).

Beim Einsatz von Scherbenglas muss zudem zwischen externen und internen Scherben differenziert werden. Externe Scherben bestehen aus recyceltem und aufbereitetem Glas und werden von den Glaswerken als Rohstoffe bezogen. Beim Einsatz von externen Glasscherben besteht die Gefahr, dass Fremdstoffe in die Schmelzwanne eingetragen werden, die sich negativ auf die Glasschmelze oder auf die Glasschmelzwanne auswirken können. Interne Scherben fallen während der Pro-

duktion im Glaswerk als sogenannter Bruch, Ausschuss oder Ver-schnitt an, also einem hergestellten Glasprodukt, welches die geforderte Qualität des Endprodukts nicht gewährleistet. Diese internen Scherben werden während der einzelnen Prozessschritte ausgeschleust, gesammelt und dem Gemenge vor der Schmelzwanne wieder zugeführt. Interne Scherben können dem Gemenge prinzipiell in beliebiger Menge beigemischt werden. Die verfügbare Menge ist jedoch über die Höhe des anfallenden Ausschusses begrenzt, dessen Minimierung Priorität hat.

Einsatz von vorkalzinierten oder CO₂-freien Rohstoffen

Karbonate werden bei der Glasherstellung als Rohstoff zur Einstellung von bestimmten chemischen und physikalischen Eigenschaften des fertigen Glasproduktes eingesetzt. So werden Attribute des Glases wie bspw. die Härte oder chemische Beständigkeit durch den Anteil an Oxiden wie CaO und MgO bestimmt. Zusätzlich fungieren Oxide wie Na₂O als Flussmittel, durch welche die Schmelztemperaturen anderer Rohstoffe im Gemenge reduziert werden.

Diese Oxide entstehen in der Glasschmelze durch die Umwandlung der zugeführten Karbonate. Nachfolgend sind die wichtigsten chemischen Umwandlungsreaktionen von Karbonaten zu den benötigten Oxiden bei der Glasherstellung aufgeführt:

Rohstoff	Reaktion	Spezifische ${ m CO_2} ext{-Emissionen}$ ${ m [tco_2\/\ t_{ m Rohstoff}]}$
Kalkstein	CaCO ₃ → CaO + CO ₂	0,440
Dolomit	$CaCO_3 \cdot MgCO_3 \rightarrow CaO + MgO + 2 CO_2$	0,477
Soda	$Na_2CO_3 \rightarrow Na_2O + CO_2$	0,415

Tabelle 5: Chemische Umwandlungen der wichtigsten Rohstoffe im Glasherstellungsprozess mit spezifischen CO₂-Emissionen

Vorkalzinierte Rohstoffe in Form von Oxiden weisen andere Eigenschaften als Karbonate auf, sodass diese bei deren Bezug und Einsatz berücksichtigt werden müssen. So werden vorkalzinierte Materialien aufgrund ihrer erhöhten Korrosivität als Gefahrenstoffe eingeordnet. Dementsprechend würden sowohl der Transport der Oxide sowie deren Einsatz im Glaswerk erhöhte Anforderungen an Gesundheits- und Sicherheitsschutz auslösen.

Energieverbrauch und CO₂-Emissionen

Erhöhung des Scherbenanteils am Rohstoffgemenge

Der Werkstoff Glas ist aus thermodynamischer Sicht eine unterkühlte, erstarrte Flüssigkeit (Schaeffer und Langfeld 2014). Dementsprechend ist die bei der ursprünglichen Herstellung eingesetzte Schmelzenthalpie chemisch im Glas gebunden, sodass eingesetzte Glasscherben beim erneuten Erschmelzen chemisch nicht umgewandelt, sondern nur auf die notwendige Schmelztemperatur erhitzt werden müssen.

Die Einsparung von Schmelzenergie durch den Einsatz von Altglasscherben führt zu einer Reduktion des Energieverbrauchs in der Schmelzwanne. Dabei sinkt der spezifische Energieverbrauchje zusätzliche 10% Scherbenanteil um 2-3% (Trier 1984; Fleischmann 2011).

Darüber hinaus führt eine Erhöhung des Scherbenanteils zur Reduzierung der eingesetzten Karbonate und demzufolge zur Reduzierung der prozessbedingten CO₂-Emissionen. Somit können durch eine Steigerung der eingesetzten Scherben-

menge sowohl energiebedingte als auch prozessbedingte CO₂-Emissionen eingespart werden.

Einsatz von vorkalzinierten oder CO₂-freien Rohstoffen

Beim Einsatz von vorkalzinierten Karbonaten werden die benötigten Oxide der Schmelzwanne direkt zugeführt, sodass der Umwandlungsschritt zur Erzeugung der Oxide entfällt und somit Reaktionsenthalpie eingespart werden kann. Der Einsatz von alternativen, CO₂-freien Rohstoffen zur Substitution

von Karbonaten hat dagegen keine nennenswerte Auswirkung auf den Energieverbrauch, da die Reaktionen zur Bereitstellung der benötigten Oxide nach wie vor ablaufen müssen.

Dementsprechend führt der Einsatz von vorkalzinierten und CO₂-freien Rohstoffen zur Vermeidung prozessbedingter CO₂-Emissionen. Durch vorkalzinierte Rohstoffe werden zusätzlich die energiebedingten CO₂-Emissionen reduziert, welche bei der Entsäuerung des Karbonats anfallen.

Aussicht und Entwicklung der Technologie

Erhöhung des Scherbenanteils am Rohstoffgemenge

Eine weitere Steigerung des Scherbenanteils hängt primär an der Verfügbarkeit von aufbereiteten Altglasscherben. Aktuell wird die gesammelte und recycelte Menge an Altglas vollständig in die Glasindustrie zur Erzeugung neuer Gläser zurückgeführt. Für eine weitere Steigerung der eingesetzten Scherbenmengen müssten die Recycling- und Sammelsysteme für Behälterglas erweitert und ausgebaut werden. Für Flach- und Spezialglas müsste ein flächendeckendes Erfassungssystem aufgebaut werden.

Für den Bereich Behälterglas wurde die Recyclingquote zu Beginn des Jahres 2022 von 80% auf 90% im Rahmen des deutschen Verpackungsgesetzes erhöht (Bundesministerium der Justiz 2017) und befindet sich damit bereits im Bereich des realistisch umsetzbaren Grenzwertes. Eine weitere Steigerung wäre nur mit großem zusätzlichem Aufwand möglich und würde sich auch auf die Kosten für Altglasscherben auswirken, da dies nur durch eine technische Weiterentwicklung der benötigten Infrastruktur sowie der Aufbereitungs- und Sammelanlagen möglich wäre.

In der Flachglas- sowie in der Gebrauchs- und Spezialglasbranche sind zwar jeweils erhebliche technische Steigerungspotentiale beim Einsatz von Altglasscherben vorhanden, allerdings ist die Verfügbarkeit von Altglas in diesen Bereichen begrenzt. Durch die jährlich anfallenden begrenzten Mengen an "verbrauchtem" Glas infolge langer Lebenszyklen als auch durch die Notwendigkeit einer qualitativ hochwertigen Aufbereitung der Glasscherben wird das mögliche Steigerungspotential als gering eingeschätzt, insbesondere da auch größere Mengen Glas, gefüllt mit Produkten, in das Ausland geliefert werden und von dort nicht wieder in den Stoffkreislauf in Deutschland zurückkehren (Bundesverband Glasindustrie e.V. 2014).

Aufgrund dieser Randbedingungen wird für die gesamte Glasindustrie von keiner nennenswerten Steigerung des Scherbenanteils zur Dekarbonisierung ausgegangen.

Einsatz von vorkalzinierten oder CO₂-freien Rohstoffen

Die beiden ausschlaggebenden Faktoren für den zukünftigen Einsatz von vorkalzinierten oder CO₂-freien Rohstoffen sind deren Verfügbarkeit und Kosten. Aktuell laufen erste Forschungsprojekte hinsichtlich des Einsatzes von alternativen Rohstoffen für die Glasherstellung, allerdings liegt der Fokus der Forschung auf der Reduktion der energiebedingten CO₂-Emissionen. Für einen flächendeckenden Einsatz dieser Rohstoffe müssten entsprechende Produktionskapazitäten aufgebaut und die Rohstoffe in großen Mengen am Markt verfügbar sein. Wie bereits erwähnt, fallen mögliche CO₂-freie Rohstoffe vor allem als Nebenprodukt in anderen Produktionsprozessen an. Hierdurch entsteht eine Abhängigkeit von anderen Industrien und Betrieben, bzw. ein Lock-in-Effekt, dessen zukünftige Entwicklung schwer abzuschätzen ist. Zudem hängt der Aufbau von Produktionskapazitäten für diese alternativen Rohstoffe maßgeblich von der zu erwartenden bzw. sich entwickelnden Nachfrage ab, welche unter anderem durch die Kosten der Rohstoffe bestimmt wird. Sollten diese auf bzw. unter dem Niveau der konventionellen Rohstoffe inklusive der Kosten der benötigten CO₂-Zertifikate sein, kann ein Markt für diese alternativen Rohstoffe und somit die notwendige Nachfrage entstehen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Betriebskosten zur Herstellung der vorkalzinierten Roh-stoffe zum einen aus den Energiekosten zur Entsäuerung der Karbonate und zum anderen aus den Kosten für die CO2-Abscheidung und Speicherung bestehen würden.

Dies führt zu deutlich höheren Bezugskosten der vorkalzinierten Karbonate und zu einer schwer abschätzbaren Verfügbarkeit von CO₂-freien Rohstoffen, sodass aktuell nicht von deren Einsatz im Glasherstellungsprozess auszugehen ist. Entsprechend wird die Reduzierung der prozessbedingten CO₂-Emissionen für eine vollständige Dekarbonisierung der Glasindustrie auch in Zukunft ein wichtiges Forschungsfeld darstellen.

Ein wichtiger Aspekt für den Einsatz von vorkalzinierten Rohstoffen ist, dass diese zur Dekarbonisierung der Glasherstellung durch das Vermeiden der direkten prozessbedingten CO₂-Emissionen beitragen. Diese CO₂-Emissionen werden allerdings nicht vermieden, sondern nur in einen anderen Sektor, der Rohstoffzulieferung, verschoben. Für eine sektorübergreifende Dekarbonisierungsmaßnahme müssten die bei der Vorkalzinierung entstehenden CO₂-Emissionen abgeschieden und gespeichert (CCS) oder weiterverwendet (CCU) werden.

6 Transformationspfade

Die Transformation der Glasindustrie hin zu einer treibhausgasneutralen Glasherstellung hat bereits begonnen und muss nach gegenwärtigen politischen und juristischen Vorgaben des Klimaschutzgesetzes bis 2045 abgeschlossen sein.

Zur potenziellen Zielerreichung sind verschiedene technologische Maßnahmen zur Dekarbonisierung des derzeit überwiegend mit fossilen Energieträgern betriebenen Herstellungsprozesses bekannt. Allerdings hat sich noch nicht eindeutig herauskristallisiert, welche Technologien zukünftig flächendeckend zum Einsatz kommen werden. Demnach gibt es grundsätzlich mehrere Transformationspfade, um die erforderliche signifikante Reduktion der CO₂-Emissionen

bis 2045 zu erreichen. In dieser Roadmap wurden deshalb Transformationspfade mit unterschiedlichen technologischen Schwerpunkten entwickelt, die mögliche Elemente des zukünftigen Pfades aller Voraussicht nach umfassen. Einen Überblick über die Transformationsszenarien zeigt Tabelle 6.

Als Grundlage wurde ein Referenzszenario ("BAU"=Business as usual) erstellt, in welchem keine wesentlichen Veränderungen gegenüber dem gegenwärtigen technischen Stand in den einzelnen Glaswerken unterstellt wird. Dieses Szenario dient als Referenz für die Analyse der weiteren Transformationspfade mit dessen Hilfe die Veränderungen im Bereich Energieverbrauch, CO2-Emissionen und Kosten berechnet werden. Für den ersten Transformationspfad ("Elektrifizierung") wurde der technologische Schwerpunkt auf die Elektrifizierung der bestehenden Anlagen gelegt. Bei diesem Pfad werden zukünftig hauptsächlich vollelektrische Schmelzwannen und Super-Hybridwannen mit dem Brennstoff Wasserstoff zu Glasherstellung eingesetzt. In einem zweiten Transformationspfad ("Wasserstoff") wurde die Dekarbonisierung der Glasindustrie durch den flächendeckenden Einsatz von Hybridwannen mit Wasserstoff zur Befeuerung der Schmelzwannen zu Grunde gelegt. Die beiden

Transformationspfade "Elektrifizierung" und "Wasserstoff" stellen dabei Extremszenarien dar, mit denen die maximalen Auswirkungen bezüglich des Energieeinsatzes der betrachteten "grünen" Energieträger aufgezeigt wird. Mit dem Transformationspfad "Hybridszenario" wurde abschließend ein Szenario entwickelt, bei welchem kein exogener Schwerpunkt auf einen Energieträger oder eine Technologie vorgegeben wird, sondern alle betrachteten Dekarbonisierungsmaßnahmen zum Einsatz kommen können. Für die einzelnen Standorte der Glaswerke in Deutschland wurden für jeden Standort individuelle, den lokalen Gegebenheiten angepasste Umsetzungsstrategien zur Dekaronisierung identifiziert und zu einem Gesamtszenario zusammengesetzt. Ziel war dabei eine maximale CO₂-Reduktion in den einzelnen Glasbranchen unter der Einhaltung technischer und wirtschaftlicher Vorgaben.

Pfad	Dekarbonisierungstechnologien
BAU	-
Elektrifizierung 57	 Vollelektrische Schmelzwanne Super-Hybridwanne mit Wasserstoff (60 - 80% Strom / 20 - 40% H₂)
Wasserstoff (H.)	 Hybridwanne mit Wasserstoff (20 - 40% Strom / 60 - 80% H₂) Vollelektrische Schmelzwanne
Hybridszenario co2	 Vollelektrische Schmelzwanne Super-Hybridwanne mit Wasserstoff Hybridwanne mit Wasserstoff

Tabelle 6: Übersicht der erstellten Transformationspfaden mit technologischen Schwerpunkten (Fettgedruckt Haupttechnologie, die überwiegend zum Einsatz kommt)

6.1 Rahmenbedingungen und grundlegende Annahmen

Zur Erstellung der Transformationspfade wurden bestimmte Basiswerte bezüglich der gegenwertigen Produktionsdaten wie bspw. der spezifischen Energieverbräuche und aktuelle Produktionsmengen festgelegt und darüber hinaus grundlegende Annahmen zur Entwicklung der Glasindustrie und des Energiesektors getroffen. Zudem wurde ein Startpunkt, basierend auf dem im Rahmen des Roadmap Prozesses erhobenen Status Quo der Glasindustrie erstellt, welcher als Ausgangpunkt für die entwickelten Transformationspfade verwendet wird und deren Berechnung nachfolgend erläutert wird.

6.1.1 Ausgangslage der Glasindustrie als Startpunkt der Transformation

Aufgrund der Datenverfügbarkeit und der Besonderheiten des Corona-Jahres 2020 wurde als Referenzjahr das Jahr 2019 gewählt.

Für das gewählte Referenzjahr 2019 wurden die Produktionsmengen, der Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen der Branchen Behälterglas, Flachglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas basierend auf den modellierten Glaswerken ermittelt. Diese wurden mit Hilfe des eigens für diese Roadmap entwickelten Modells berechnet (siehe Kapitel 4.2) und dienten als Ausgangspunkt für die angefertigten Transformationspfade. Die auf diesem Wege berechneten Werte weichen geringfügig von den offiziellen Zahlen des

Statistischen Bundesamtes und des Bundesverbandes Glasindustrie ab, werden jedoch für eine Vergleichbarkeit und stringente Betrachtung der Entwicklung und Auswirkungen der Dekarbonisierungsmaßnahmen innerhalb dieser Roadmap als Grundlage verwendet. Die Abweichungen lassen sich im Wesentlichen auf Hochrechnungen mit Hilfe von Durchschnittswerten für einzelne Glaswerke zurückführen, für welche keine detaillierten Informationen zu Produktionsanlagen durch die Unternehmen bereitgestellt wurden.

Produktionsmengen⁶

Nach den offiziellen Zahlen des Bundesverbandes Glasindustrie wurden in Deutschland im Jahr 2019 insgesamt 7,46 Millionen Tonnen Glas⁷ hergestellt. Die Produktionsmenge für die betrachteten Glassorten Behälterglas, Flachglas und Gebrauchs- und Spezialglas betrug 6,5 Millionen Tonnen. Die in diesem Projekt verwendeten Produktionsmengen wurden

anhand der modellierten Glasstandorte berechnet und betragen für die betrachteten Glassorten 6,9 Millionen Tonnen. Hiervon entfallen ca. 60% auf Behälterglas, 36% auf Flachglas und lediglich 4% auf den Bereich Gebrauchs- und Spezialglas, Abbildung 9.

⁶ Berechnete Werte aus eigenem Modell unter Berücksichtigung des erhobenen Status Quo der Glasindustrie

⁷ Inklusive Mineralfasern

Anteil der Produktionsmengen nach Glassorte

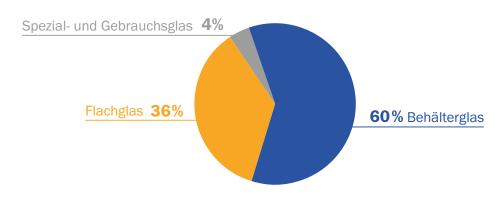


Abbildung 9: Verteilung der berechneten Produktionsmengen der betrachteten Glassorten im Jahr 2019

Energieverbrauch⁶

Aktuell werden zur Glasherstellung in Deutschland hauptsächlich die Energieträger Erdgas und Strom eingesetzt. Erdgas ist dabei der mit Abstand wichtigste Energieträger und wird vor allem zur Befeuerung der Schmelzwannen sowie der Feeder und zum Betrieb der Kühlöfen eingesetzt. Im Jahr 2019 betrug der Anteil von Erdgas 77% am gesamten Endenergiebedarf der Glasindustrie, Abbildung 10. Bei den Produktionsprozessen Gemengebereitung und Formgebung sowie bei der Weiterverarbeitung wird dagegen vor allem

der Energieträger Strom zum Antrieb von Maschinen oder zum Boosting in den Schmelzwannen benötigt. Hierdurch beträgt der Anteil von Strom 20% am Endenergieträgermix. Darüber hinaus werden vereinzelt Schweröl und Fernwärme an Glasstandorten eingesetzt, welche zusammengenommen einen untergeordneten Anteil von 3% am gesamten Endenergiebedarf der Glasindustrie ausmachen. (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2021)

Endenergieträger-Mix

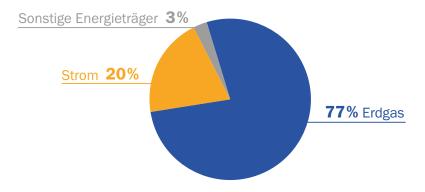


Abbildung 10: Anteile der Energieträger am Endenergiebedarf der gesamten Glasindustrie im Jahr 2019

Im Referenzjahr 2019 betrug der absolute Energieverbrauch in den Glasbranchen Behälterglas, Flachglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas 48,5 PJ. Hiervon wurden 41,8 PJ

durch fossile Brennstoffe, hauptsächlich Erdgas, bereitgestellt. Zusätzlich wurden 6,7 PJ (1,86 TWh) Strom zur Herstellung der Glasprodukte eingesetzt.

CO₂-Emissionen⁶

Der Hauptanteil der CO₂-Emissionen entsteht in der Glasindustrie bei der Herstellung der beiden mengentechnisch wichtigsten Glasprodukte Behälter- und Flachglas. Die Produktion von Behälterglas verursacht ca. 1,47 Millionen Tonnen an direkten CO₂-Emissionen, was in etwa der Hälfte der gesamten CO₂-Emissionen der in dieser Studie untersuchten Glasbranchen entspricht. Bei der Herstellung

von Flachglas entstanden insgesamt 1,24 Millionen Tonnen an direkten CO_2 -Emissionen, was einem Anteil von 41% an den gesamten CO_2 -Emissionen entspricht. Die Herstellung von Gebrauchs- und Spezialglas ist lediglich für insgesamt 320.000 Tonnen an direkten CO_2 -Emissionen (10%) verantwortlich, Abbildung 11.

Verteilung der direkten CO₂-Emissionen⁵

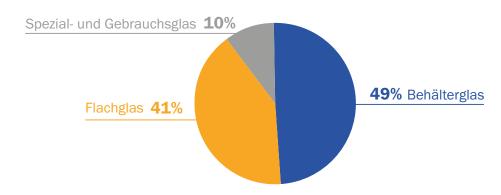


Abbildung 11: Verteilung der direkten CO₂-Emissionen⁶ der untersuchten Branchen

Zurückblickend kann man feststellen, dass die CO2-Emissionen der Glasindustrie sich im Zeitraum 2013 bis 2019 nur marginal verändert haben, Abbildung 12. Die Emissionen der gesamten Branche überschritten im gesamten Zeitraum

die Menge an kostenlos zugeteilten CO₂- Zertifikaten, sodass der Großteil der Glasunternehmen in Deutschland CO₂-Zertifikate für den Betrieb zukaufen musste.

CO₂-Emissionen und Zuteilungen von CO₂- Zertifikaten für die Glasindustrie

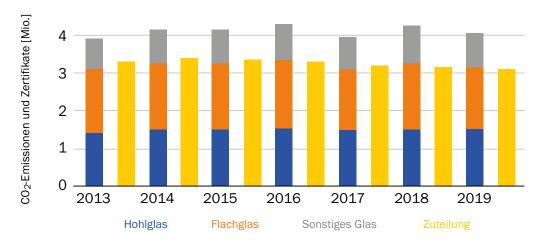


Abbildung 12: Entwicklung der CO₂-Emissionen der Glasbranchen und kostenlose Zuteilung von CO₂-Zertifikaten (Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt 2020)

Tabelle 7 fasst die wichtigsten Daten für die betrachteten Glassektoren zusammen:

Glassektor	Anzahl Werke	Schmelz-	Produktionsmenge	Energiev [PJ		CO2-Emissionen [Mio. t co ₂ /a]		
		wannen	[Mio. t _{Glas} /a]	Brennstoff	Strom	Direkt	Indirekt	
Behälterglas	29	57	4,16	21,1	4,4	1,47	0,59	
Flachglas	11	13	2,24	15,6	0,6	1,24	0,08	
Gebrauchs- und Spezialglas	17	52	0,28	5,1	1,7	0,32	0,19	
Gesamt	57	122	6,86	41,8	6,7	3,03	0,86	

Tabelle 7: Kerndaten der Sektoren Behälterglas, Flachglas sowie Spezial- und Gebrauchsglas für das Jahr 2019

6.1.2 Annahmen zur Entwicklung der deutschen Glasindustrie

Zur Erstellung der Transformationspfade wurden in Abstimmung mit den Verbandsunternehmen Annahmen zur Entwicklung der Produktionsmengen und einer Steigerung der Energieeffizienz in der deutschen Glasindustrie getroffen.

Diese Annahmen basieren auf der linearen Fortschreibung historischer Daten sowie Prognosen in branchenspezifischer Fachliteratur (Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE 2021;

British Glass 2021) zur Einschätzung der zukünftigen Entwicklung und wurden darüber hinaus vom projektzugehöhrenden Begleitkreis validiert.

Entwicklung Produktionsmengen

Die in Deutschland hergestellte Menge an Glas nimmt seit einem früheren Rückgang inzwischen seit Jahren wieder zu. Entsprechend wird dieser Produktionstrend in den Transformationspfaden für die einzelnen Glassektoren durch die Wahl der folgenden Annahmen berücksichtigt:

Glassektor	Angenommene jährliche Änderungsrate [%/a]	Veränderung überwiegend hervorgerufen durch folgende Produkte
Behälterglas	+ 0,5	Glasflaschen
Flachglas	+ 0,5	Flachglas im Bausektor
Gebrauchs- und Spezialglas	+ 0,3	Pharma-Verpackungsprodukte Technische Gläser

Aufgrund der erwarteten jährlichen Zuwachsraten in den untersuchten Glassektoren ergeben sich die folgenden Entwicklungen der produzierten Mengen in Tonnen:

Glassorte	2020	2030	2040	2045
Behälterglas	4.215.985	4.426.784	4.637.583	4.742.983
Flachglas	2.456.443	2.579.265	2.702.087	2.763.498
Spezialglas	270.680	278.800	286.920	290.981

Tabelle 9: Prognostizierte Entwicklung der erwarteten Produktionsmengen in Tonnen von 2020 bis 2045.

Entwicklung Energieverbrauch/Energieeffizienz:

Die stetige Verbesserung technischer Anlagen wurde in den Transformationspfaden durch eine jährliche Steigerungsrate für die Verbesserung der Energieeffizienz berücksichtigt. Diese wird für den gegenwärtigen Anlagenbestand der Glaswerke durch den Einsatz von Effizienzmaßnahmen im Bereich der Abwärmenutzung und den Querschnittstechnologien (u.a. Einsatz von hocheffizienten Elektromotoren und Kompressoren) erzielt. Für diese Technologien wird eine jährliche Steigerung der Energieeffizienz von 0,3% angenommen.

Ebenso ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch der Dekarbonisierungstechnologien nach deren Markteintritt ebenfalls durch eine Verbesserung der Effizienz abnehmen wird. Dieser technologische Fortschritt wurde ebenfalls mit einer Effizienzsteigerung von 0,3% pro Jahr für die Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs der eingesetzten Dekarbonisierungstechnologien in den Szenarien berücksichtigt.

Dekarbonisierung im Bereich der weiteren Prozessschritte

Die Dekarbonisierung des Glasherstellungsprozesses wird, wie bereits im Methodik-Teil 4.1 beschrieben, hauptsächlich durch den Einsatz CO₂-freier Wannenkonzepte im Schmelzprozess realisiert. Der Energieverbrauch und die daraus resultierenden CO₂-Emissionen der restlichen Prozessschritte sind denen des Schmelzprozesses mengenmäßig zwar deutlich untergeordnet, müssen zur Zielerreichung einer signifikanten CO₂-Minderung des Sektors jedoch ebenso adressiert werden. In dieser Roadmap wird davon ausgegangen, dass die in den weiteren Prozessschritten (bspw. die Form-

gebung und das Abkühlen der Gläser in Kühlöfen) eingesetzten fossilen Energieträger durch eine Elektrifizierung und die Nutzung erneuerbaren Stroms dekarbonisiert werden. Entsprechend werden für diese Prozessschritte keine alternativen Dekarbonisierungsmöglichkeiten untersucht und von einer vollständigen Vermeidung von CO₂-Emissionen in diesen Prozessschritten bis 2045 ausgegangen.

6.1.3 Entwicklung der Infrastruktur und Netze

Ein wichtiger Faktor beim Einsatz von Dekarbonisierungstechnologien ist die Verfügbarkeit und Bereitstellung von CO₂-neutralen Energieträgern in den Glaswerken.

Um eine CO₂-Reduktion durch den Einsatz von grünen Energieträgern zu erzielen, müssen diese zu jedem Zeitpunkt in ausreichender Menge im jedem analysierten Glaswerk zur Verfügung gestellt werden können. Dies setzt die Verfügbarkeit der erforderlichen Energieinfrastrukturen voraus. Zur Analyse dieser Fragestellung wurden der aktuelle Stand

sowie in der Diskussion stehende Ausbaupläne der Stromund Wasserstoffnetze in Deutschland untersucht. Aufbauend auf diesen Informationen wurden für jeden einzelnen Glasstandort verfügbare Netzanschlüsse sowie der frühestmögliche Zeitpunkt zum Bezug der erforderlichen Energieträger durch die einzelnen Glaswerke abgeleitet.

6.1.3.1 Stromnetz

Die Informationen zum gegenwärtigen Ausbaustand der Stromnetze in Deutschland wurden aus dem Bericht der Bundesnetzagentur (Bundesnetzagentur 2021) übernommen. In den deutschen Glaswerken wird bereits Strom zur Herstellung der verschiedenen Glassorten eingesetzt, wenn auch im Großteil der Fälle nicht zur Bereitstellung der Schmelzenergie, sodass die betrachteten Standorte grundsätzlich über einen Stromanschluss und eine kleine Netzersatzanlage verfügen. Allerdings sind die meisten Glaswerke Stand heute typischerweise an das Mittelspannungsnetz (bis zu 50 kV) angeschlossen, da der aktuelle Strombedarf über einen Mittelspannungsanschluss bereitgestellt werden kann. Die übliche Kapazität der Stromanschlüsse eines Glaswerkes in Deutschland liegt in einem Leistungsbereich zwischen 3 und 15 MW, welche auf einem Spannungsniveau von 10 bis 20 kV abgenommen wird.

Durch die Umstellung von fossil befeuerten auf elektrisch beheizte Schmelzwannen wird die Stromleistung und die benötigte Strommenge an den jeweiligen Standorten deutlich gegenüber dem heutigen Niveau ansteigen. Zur Deckung dieses zusätzlichen Leistungsbedarfs werden die vorhandenen Kapazitäten der Stromanschlüsse und die Anbindung der Glaswerke an das Mittelspannungsnetz nicht ausreichen. Entsprechend wird zukünftig in den meisten Fällen eine Anbindung der Glaswerke an das Hochspannungsnetz (110 kV) erfolgen müssen. Somit spielt der Zustand der Netze und die Entfernung zum Hochspannungsnetz eine entscheidende Rolle bei der Dekarbonisierung der in

Deutschland verteilten Glaswerke. In Abbildung 13 sind das aktuelle Hochspannungsnetz (Stand 2021) sowie die Glasstandorte in Deutschland dargestellt.

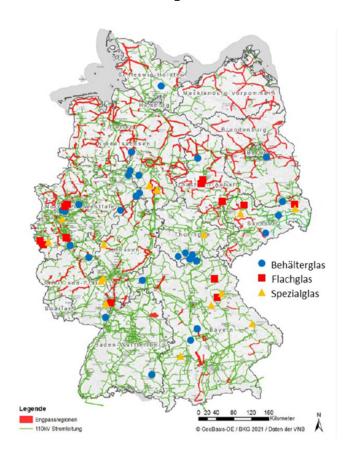


Abbildung 13: Hochspannungsnetz (110kV) in Deutschland (Bundesnetzagentur 2021), erweitert um die Standorte der deutschen Glaswerke

Zur Abschätzung des zukünftigen Einsatzes von Dekarbonisierungsmaßnahmen wird das aktuelle Stromnetz um die von der Bundesnetzagentur bestätigten Ausbaumaßnahmen (Bundesnetzagentur 2022) erweitert. Hierdurch kann die zu

erwartende zeitliche Verfügbarkeit entsprechender Stromanschlüsse für die einzelnen Standorte und somit der frühestmögliche Zeitpunkt zur Umstellung von Glaswannen auf die elektrische Schmelze abgeleitet werden.

6.1.3.2 Gasnetz

Deutschland verfügt über ein sehr gut ausgebautes Gasnetz. Aktuell beziehen die Glaswerke die Energie zur Beheizung der Schmelzwannen meist aus dem Erdgasnetz. Für einen möglichen Wasserstoffeinsatz zur Dekarbonisierung der Glasindustrie wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff per Pipeline bezogen wird. Die dezentrale Erzeugung an den Standorten oder die Anlieferung auf Schiene oder Straße erscheinen aufgrund der benötigten Energiemengen keine geeigneten Optionen darzustellen. Entsprechend kommt dem Aufbau und dem Ausbau einer Wasserstofftransportinfrastruktur eine grundlegende Bedeutung für die Dekarbonisierung der Glasindustrie zu. Grundsätzlich ist der Neubau einer Wasserstoffinfrastruktur möglich, vielfach wird man jedoch versuchen, die vorhandene Gasinfrastruktur für den Transport von Wasserstoff zu ertüchtigen. Auch dies stellt die Netzbetreiber jedoch vor große Herausforderungen, da bei

einer Netzumstellung auch gleichzeitige Anpassungen bei den Verbrauchsgeräten aller an das Netz angeschlossenen Kunden erfolgen müssen.

Für den Aufbau und Ausbau der Wasserstoffnetze liegen aktuell im Gegensatz zum Stromnetz keine festen Ausbaupläne und -maßnahmen vor, sondern lediglich erste Planungen und Konzeptionen. Dies erschwert die Bewertung hinsichtlich der möglichen Verfügbarkeit von Wasserstoff an den einzelnen Standorten. Die im Rahmen des Roadmap-Prozesses abgeleiteten Investitionsentscheidungen zum zukünftigen Wasserstoffeinsatz basieren auf dem prognostizierten Wasserstoffnetz für die Jahre 2030 und 2050 der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. 2021), die in Abbildung 14 dargestellt sind.

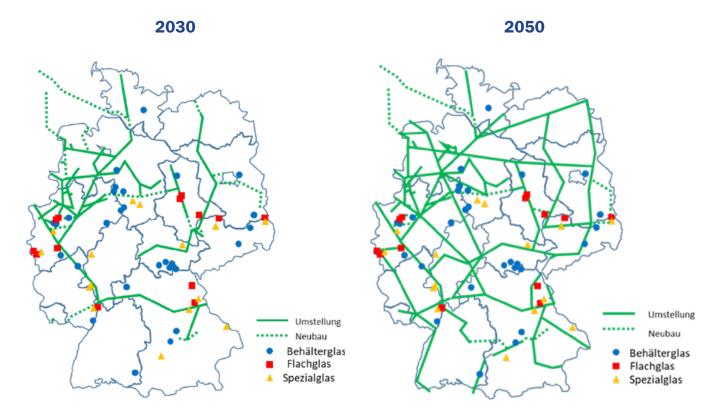


Abbildung 14: Geplantes Wasserstoffnetz in Deutschland 2030 (links) und 2050 (rechts). Eigene Darstellung basierend auf (Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. 2021)

6.1.4 Entwicklung Energieträgerpreise und CO₂-Zertifikate

Neben den Energiekosten stellen die zusätzlich beim Einsatz fossiler Energieträger benötigten CO₂-Zertifikate einen wesentlichen Anteil der spezifischen Produktionskosten von Glas dar. Der Einsatz von Dekarbonisierungstechnologien führt zum Rückgang der benötigten CO₂-Zertifikate.

Je höher die Kosten für die Beschaffung der CO₂-Zertifikate sind, umso stärker mindert dies die Kostendifferenz zwischen den fossilen und den erneuerbaren Energieträgern. Die zukünftige Entwicklung der Energiepreise ist mit erheblichen Unsicherheiten belastet. Der Überfall der Ukraine durch Russland hat die Entwicklung der Energiepreise in den letzten Monaten maßgeblich beeinflusst und zu Gas- und Strompreisanstiegen weit über das erwartetet Maß hinausgeführt.

Im Rahmen dieser Roadmap wurden für die zukünftigen Energieträgerpreise die aktuellste Einschätzung der International Energy Agency (IEA) zur Entwicklung der Energieträgerkosten genutzt (International Energy Agency 2021). Diese prognostizierten Entwicklungen der einzelnen Energieträgerpreise wurden auf die handelsüblichen Marktpreise für Strom und Erdgas für industrielle Abnehmer in Deutschland übertragen, welche für das Referenzjahr 2019 den offiziellen Statistiken des Statistischen Bundesamtes entnommen wurden. (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022).

Preisentwicklung Energieträger und CO₂-Zertifikate

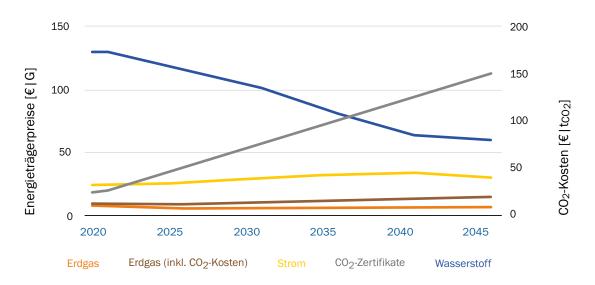


Abbildung 15: Kostenentwicklung der Energieträger und CO₂-Zertifikate⁸ (Werte in Tabelle 17 im Anhang)

Die Kosten für die Energieträger Strom und Erdgas sind für industrielle Abnehmer abhängig von der jährlich bezogenen Energiemenge und werden in sogenannte Bänder eingeordnet. Je nach Zuordnung zu einem Band und der Jahresverbrauchsklasse wird der Preis für den bezogenen Energie-

träger festgelegt. Für einen Glasstandort hängen die Energiekosten des gefertigten Produkts somit unter anderem von der Gesamtmenge der bezogenen Energieträger und somit von der Art und der Menge des produzierten Glases und der Energieeffizienz am Standort ab.

⁸ Die prognostizierten Entwicklungen der Energieträgerpreise basieren auf den langfristigen Annahmen der IEA. Hierdurch können Sondereffekte, wie bspw. durch den Ukraine-Krieg, deutliche Abwei- chung zu kurz- und mittelfristigen Preisentwicklungen der Energieträger entstehen. Daher können durch Sondereffekte, wie bspw. den Ukraine-Krieg, deutliche Abweichungen zu kurz- und mittelfristigen Preisentwicklungen der Energieträger entstehen.

6.1.4.1 Strompreise

Bezüglich des Stromverbrauchs werden die meisten Glaswerke des Bereichs Behälterglas und Flachglas dem Band IE zugeordnet. Im Spezialglasbereich variiert der absolute Stromverbrauch bzw. die Zuordnung für die einzelnen Glasstandorte stark, da die Produktionsstätten bezüglich der

gefertigten Gläser und der hergestellten Mengen sehr heterogen sind. Entsprechend werden die einzelnen Glaswerke allen Bändern zwischen ID und IG zugeordnet, wobei der Großteil in den Bändern ID und IF vertreten ist.

Band	Jahresverbrauchsklasse [MWh/a]	Strompreis [€/kWh]	Anzahl der zugeordneten Glaswerke
ID	2.000 bis unter 20.000	0,1781	22
IE	20.000 bis unter 70.000	0,1479	21
IF	70.000 bis unter 150.000	0,1279	12
IG	150.000 und mehr	0,1114	2

Tabelle 10: Strompreise für industrielle Abnehmer nach Jahresverbrauchsklassen für das Jahr 2019 (Abnahmepreise inkl. Netzentgelte, Steuern und Umlagen); Quelle Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022)

Obwohl im Sommer 2022 die EEG-Umlage weggefallen ist, liegen die Strompreise heute deutlich über den damaligen Werten und in dieser Roadmap verwendeten Preisprognosen.

6.1.4.2 Gaspreise

Der jährliche Gasverbrauch der meisten Glaswerke in Deutschland liegt zwischen den Bereichsgrenzen für das Verbrauchsband 14. Im Bereich Behälterglas liegt der Erdgasverbrauch fast aller Werke in diesem Bereich, nur einzelne sind dem höchsten Band I5 zugeordnet. Im Bereich Flachglas verteilen sich die Werke auf die beiden Bänder I4 und I5. Im Spezialglasbereich wird der Großteil der Werke dem Band I4 und einzelne den Bändern I3 und I5 zugeordnet.

Band	Jahresverbrauchsklasse [MWh/a]	Gaspreis [€/kWh]	Anzahl der zugeordneten Glaswerke
13	27.778 bis unter 277.778	8,833	3
14	277.778 bis unter 1.111.111	7,250	36
15	1.111.111 und mehr	7,000	18

Tabelle 11: Gaspreise für industrielle Abnehmer nach Jahresverbrauchsklassen im Jahr 2019 (Abnahmepreise inkl. Netzentgelte, Steuern und Umlagen); Quelle Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022)

Aufgrund der aktuellen Energiekrise liegen die Gaspreise deutlich über den damaligen Werten. Allerdings ist es sehr ungewiss, auf welchem Niveau sich die Gaspreise nach der Energiekrise einpendeln werden, sodass in dieser Roadmap

prognostizierte Werte basierend auf dem Jahr 2019 verwendet wurden, auch wenn die Preise wahrscheinlich nicht mehr auf dieses Niveau zurückkehren werden.

6.1.4.3 CO₂-Preise

Zusätzlich zu den Energieträgerpreisen wird die Entwicklung der Preise für CO₂-Zertifikate unterstellt, die die künftige Anzahl verfügbarer Zertifikate berücksichtigt, die kontinuierlich über die kommenden Jahre abnimmt. Im Jahr 2019 lag der Preis für ein CO₂-Zertifikat bei durchschnittlich 24,86 EUR. Die prognostizierten Kosten für ein CO₂-Zertifikat im Jahr 2045 liegen in diversen Studien zwischen 100 EUR und

200 EUR, sodass für diese Studie der Mittelwert von 150 EUR pro Tonne $\rm CO_2$ als Endwert für das Jahr 2045 gewählt wird, wie bspw. in Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 2020. Basierend auf dem Ausgangswert für das Jahr 2019 wurde ein linearer Anstieg der Kosten für $\rm CO_2$ -Zertifikate bis 2045 angenommen.

6.2 Referenzpfad

Der Referenzpfad beschreibt die erwartete Entwicklung der Glasindustrie in Deutschland ohne wesentliche Veränderungen und ohne den Fokus auf den Einsatz von Dekarbonisierungsmaßnahmen.

Das Referenzszenario ist deshalb ein typisches Business-asusual-Vorgehen ("BAU") unter den aktuellen Bedingungen der Glasherstellung. Der erstellte Referenzpfad dient dazu, die Auswirkungen von Transformationspfaden zu analysieren, in denen gezielt auf Dekarbonisierungstechnologien zur Zielerreichung gesetzt wird. Durch den Vergleich der Transformationspfade können die mittel- und langfristigen Auswirkungen auf den Energieträgereinsatz, die CO₂-Emissionen und die Kosten eingeordnet werden.

Produktionskapazitäten je Technologie

Im Referenzpfad werden keine innovativen Technologien zur Dekarbonisierung eingesetzt, sondern die derzeit vorhandenen Anlagen am Ende der Wannenreise, d.h. dem Ende der Lebensdauer, erneuert bzw. durch identische Technologien ersetzt. Die Verteilung und Entwicklung der installierten Schmelzwannen für die Jahre 2019, 2030 und 2045 in den betrachteten Glasbranchen ist in Tabelle 12 dargestellt. Insgesamt geht die Roadmap davon aus, dass sich im Referenzfall weder an der Gesamtzahl der Wannen noch an der Verteilung auf die Subbranchen noch an den eingesetzten Technologien bis 2045 etwas ändert. Im Behälterglassektor werden deshalb auch im Zieljahr 2045 55 gasbetriebene Schmelzwannen und zwei vollelektrische Schmelzwannen eingesetzt. In der Flachglasbranche 13 konventionell mit Erdgasbetriebene Schmelzwannen und in der Spezialglasbranche 47 konventionelle und 5 vollelektrische Schmelzwannen.

Unabhängig vom Transformationsprozess der Branche wird die jährliche Produktionsmenge gemäß der in Kapitel 6.1.2. beschriebenen Annahme geringfügig zunehmen. Es wird erwartet, dass die Produktionsmengen für die gesamte Glasindustrie von 6,9 Millionen Tonnen Glas im Jahr 2019 bis 2030 auf 7,2 Millionen Tonnen Glas (+4 %) und bis 2045 auf 7,7 Millionen Tonnen (+11 %) ansteigen werden. Diese Steigerung der Produktionsmengen ist mit der installierten Produktionskapazität der aktuell betriebenen Schmelzwannen bei einer 100%igen Auslastung der installierten Schmelzleistung zu realisieren, wobei die bis 2045 neu zu installierenden Wannen meist höhere Leistungsdichten aufweisen werden.

Technologie	2019				2030			2045				
Konventionell	55	13	47	115	55	13	47	115	55	13	47	115
Vollelektrisch	2	-	5	7	2	-	5	7	2	-	5	7
Hybrid(CH ₄)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hybrid(H ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Super-Hybrid (CH ₄)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Super-Hybrid (H ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Spezialglas

Gesamt

Tabelle 12: Erwartete Entwicklung der installierten Schmelzwannen je Sektor im Transformationspfad BAU

Flachglas

Behälterglas

Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch zur Herstellung von Glas ist in den letzten 20 Jahren deutlich reduziert worden. Weitere Einsparpotentiale sind deshalb begrenzt und liegen häufig im Bereich der Gemenge- und Scherbenvorwärmung. Der spezifische Energieverbrauch zur Herstellung der verschiedenen Glassorten wird sich deshalb durch den Einsatz neuer konventioneller Schmelzwannen nur noch in geringerem Maße verändern. Durch die im Rahmen der Roadmap unterstellten Effizienzsteigerungen wird sowohl der

Erdgaseinsatz als auch der Einsatz von Strom für die Herstellung einer Tonne Glas leicht rückläufig sein. Im Referenzpfad wird dieser Effekt allerdings durch die Steigerung der Produktionsmengen überkompensiert, so dass es zu einer Zunahme des Gesamtverbrauchs kommt. Der Erdgasverbrauch steigt deshalb von 41,8 PJ im Jahr 2020 um ca. 4 % auf 43,3 PJ in 2045 an. Auch der Stromver- brauch wird von 6,7 PJ (1.860 GWh) um ca. 4 % auf 7,0 PJ (1.944 GWh) bis 2045 ansteigen.

Energieverbrauch

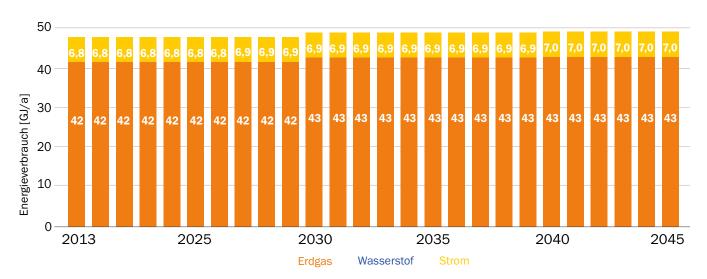


Abbildung 16: Entwicklung des Energieverbrauchs im Transformationspfad BAU

CO₂-Emissionen

Die direkten spezifischen CO₂-Emissionen der Schmelzwannen werden infolge des Einsatzes der konventionellen Technologien keine nennenswerte Änderung erfahren. Die energiebedingten spezifischen CO₂-Emissionen werden durch Effizienzgewinne bei den eingesetzten konventionellen Technologien ebenfalls leicht sinken, durch die Zunahme der Produktionsmengen aber absolut leicht steigen. Die Zunahme der Produktionsmengen wirkt sich zudem auf die Menge der zur Produktion eingesetzten Karbonate aus. Der verstärkte Einsatz von Karbonaten führt demnach auch zu einem Anstieg der prozessbedingten CO₂-Emissionen in der Glasbranche. Insgesamt führen die Veränderungen

zu einem Anstieg der direkten CO₂-Emissionen um 6 % bis 2045. Die indirekten CO₂-Emissionen, welche dem Stromverbrauch im Glaswerk zuzuordnen sind, werden durch die Dekarbonisierung des Stromsektors bis 2045 vollständig vermieden werden können. Der Anstieg der direkten CO₂-Emissionen und die Reduzierung der indirekten CO₂-Emissionen führen zu einer Reduktion der gesamten CO₂-Emissionen um 16 % von 3,8 Millionen Tonnen CO₂ auf 3,2 Millionen Tonnen CO₂ im Jahr 2045.

CO₂-Emissionen

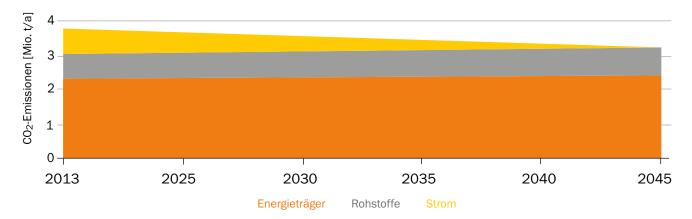


Abbildung 17: Entwicklung der CO₂-Emissionen im Transformationspfad BAU

Spezifische Produktionskosten

Eine Veränderung der spezifischen Produktionskosten wird im Referenzpfad vor allem durch die Kosten für die eingesetzten Energieträger hervorgerufen. Die unterstellte Abnahme des Erdgaspreises bis 2045 führt zu einer Reduktion der Energiekosten um 11% für Behälterglas, um 22 % für Flachglas und um 6% für Gebrauchs- und Spezialglas. Die Zunahme der direkten CO₂-Emissionen in Verbindung mit einem stetig zunehmenden Preis für CO₂-Zertifikate führen zu einer Steigerung der spezifischen CO₂-Kosten um ca.

450 % für die betrachteten Glasprodukte. Weitere Kostenfaktoren wie Personal und Rohstoffe werden dagegen als konstant angenommen. Die Entwicklungen im Referenzpfad führen zu einer Erhöhung der spezifischen Produktionskosten im Referenzpfad bis 2045 um 7 % für Behälterglas, um 10 % für Flachglas und um 3 % für Gebrauchsund Spezialglas.

Investitionen

Die getätigten Investitionen im Referenzpfad betreffen Erneuerungs- sowie Erhaltungsmaßnahmen der aktuell betriebenen Schmelzwannen. Diese fallen hauptsächlich für den Austausch der Feuerfestmaterialien am Ende eines Lebenszyklus der einzelnen Schmelzwannen an. Die jährlichen Investitionen liegen zwischen 17 und 109 Millionen

Euro und durchschnittlich bei 60 Millionen Euro pro Jahr. Die gesamten Investitionen zum Austausch und Erhalt der aktuellen Schmelzwannen belaufen sich bis zum Jahr 2045 auf 1,59 Milliarden Euro.

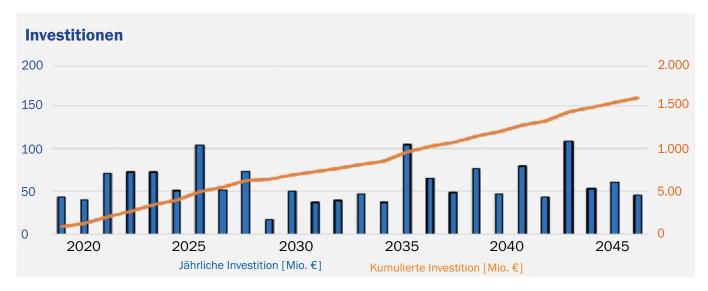


Abbildung 18: Erforderliche Investitionen im Transformationspfad BAU

6.3 Treibhausgas-Minde-rungspfad Elektrifizierung

Der Treibhausgas-Minderungspfad Elektrifizierung beschreibt den Transformationsprozess der heutigen Glasindustrie durch den Fokus auf eine Elektrifizierung der Schmelzwannen.

Dieser Transformationspfad stellt ein Extremszenario zur Dekarbonisierung der Glasindustrie dar, in welchem der überwiegende Teil der Schmelzwannen auf rein elektrische Beheizung bzw. auf einen hohen elektrischen Anteil der Schmelzleistung umgestellt wird. Die Erstellung des Transformationspfades erfolgte unter der Prämisse, den Stromeinsatz zur Glasherstellung unter Berücksichtigung technischer und ökonomischer Hemmnisse zu maximieren. So wurde bspw. der Einsatz von vollelektrischen Schmelzwannen im Bereich Flachglas für Wannen mit einer Schmelzkapazi-

tät von über 700 Tonnen pro Tag als nicht technisch umsetzbar eingestuft, sodass für diese Super-Hybridwannen eingesetzt werden. Darüber hinaus wurden für die einzelnen Glaswerke technische Optionen für eine maximale Elektrifizierungder Schmelzwannen für die jeweils hergestellten Produkte am Standort in Verbindung mit dem Status des Ausbaus der elektrischen Infrastruktur bis 2045 analysiert.

Produktionskapazitäten je Technologie

Im Elektrifizierungspfad werden ab dem Jahr 2022 die ersten erdgasbetriebenen Hybridwannen mit einem elektrischen Anteil von 20 – 40 % in der Behälterglasbranche sowie im Bereich Gebrauchs- und Spezialglas eingesetzt. Bis 2030 wird der Einsatz von Hybridwannen im Rahmen der Erneuerungszyklen weiter zunehmen und auch erste Super-Hybridwannen mit elektrischem Anteil von 60 % kommen zum Einsatz. Ab 2030 werden in den Sektoren Behälterglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas vermehrt konventionelle Schmelzwannen durch vollelektrische Wannen ersetzt.

Gleichzeitig erhöht sich der Elektrifizierungsgrad vieler Wannen durch den Übergang von der Hybridwanne zur Super-Hybridwanne. Ab 2040 erfolgt die Umstellung der mit Erdgas betriebenen Super-Hybridwannen auf vollelektrische Schmelzwannen bzw. der Erdgaseinsatz wird durch den Einsatz von Wasserstoff substituiert. Im Jahr 2045 würden dann 60 % des in Deutschland hergestellten Glases in vollelektrischen Wannen und 40 % in Super-Hybridwannen mit Wasserstofffeuerung hergestellt.

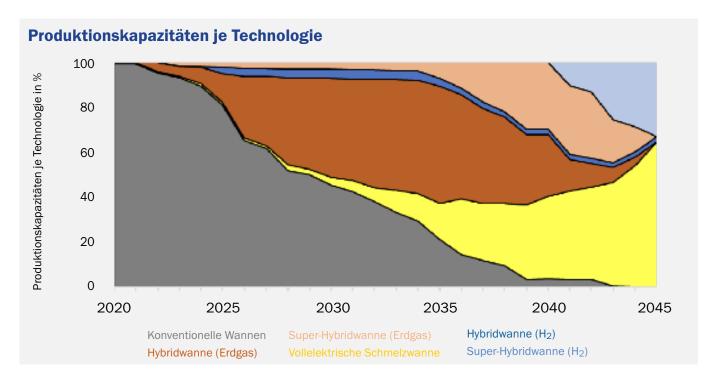


Abbildung 19: Prozentuale Verteilung der eingesetzten Technologien im Transformationspfad Elektrifizierung

Die erwartete Entwicklung der Verbreitung der Schmelzwannentypen in den Glassektoren ist in Tabelle 13 zusammengefasst. In der Behälterglasbranche werden die 55 noch im Referenzjahr 2019 eingesetzten konventionellen Schmelzwannen vollständig durch vollelektrische Schmelzwannen ersetzt. Ebenso werden alle 47 konventionellen Wannen für

Spezial- und Gebrauchsgläser auf vollelektrische Schmelzwannen umgestellt. Für die 13 regenerativen Querbrennerwannen zur Herstellung von Flachglas wird aus technologischen Gründen keine vollständige Elektrifizierung möglich sein, entsprechend kommen dort Super-Hybridwannen und Hybridwannen mit Wasserstoff zum Einsatz.

Technologie		20	19			20	30		2045			
Konventionell	55	13	47	115	55	4	25	62	-	-	-	_
Vollelektrisch	2	-	5	7	5	-	6	11	57	-	52	109
Hybrid(CH ₄)	-	-	-	-	18	8	16	42	-	-	-	-
Hybrid(H ₂)	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	1
Super-Hybrid (CH ₄)	-	-	-	-	0	-	5	6	-	-	-	-
Super-Hybrid (H ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	-	12

Behälterglas Flachglas Spezialglas Gesamt

Tabelle 13: Entwicklung der installierten Schmelzwannen je Sektor

Energieverbrauch

Der wesentliche Energieträger wird sich durch die Elektrifizierung der Schmelzwannen von Erdgas zum Energieträger Strom verschieben. Der Erdgasverbrauch sinkt bis 2045 auf null, der Einsatz von Strom steigt dagegen um 361 % auf insgesamt 31,3 PJ (8.700 GWh) pro Jahr. Zusätzlich wird in den Super-Hybridwannen eine Wasserstoffmenge von

25.000 Tonnen pro Jahr, entsprechend eine Energiemenge von 2,8 PJ/a im Jahr 2045 benötigt. Die höhere spezifische Effizienz der vollelektrischen Schmelzwanne durch den Entfall der Abgasverluste führt zu einer Reduktion des Endenergiebedarfs um 30 % von 48,5 PJ auf 34,1 PJ pro Jahr.

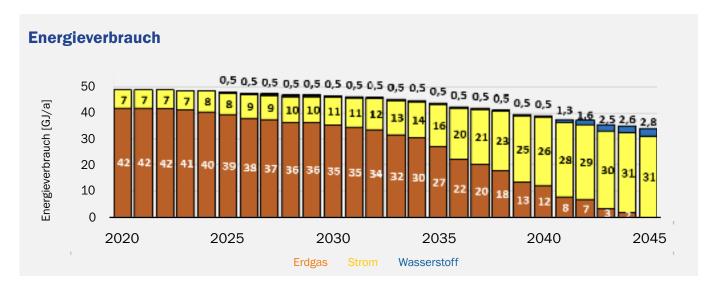


Abbildung 20: Entwicklung des Energieverbrauchs im Transformationspfad Elektrifizierung

CO₂-Emissionen

Die CO₂-Emissionen sinken im Elektrifizierungspfad signifikant durch den steigenden Anteil von erneuerbarem Strom und grünem Wasserstoff, die den Einsatz von Erdgas schrittweise substituieren. Die indirekten energiebedingten CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Strom sinken infolge der Dekarbonisierung des Stromsektors auf null. Bei der Verbrennung des Wasserstoffs in den Super-Hybridwannen entstehen keine CO₂-Emissionen, sodass durch den Betrieb der vollelektrischen Wannen sowie der Super-Hybridwannen mit Wasserstoff keine energiebedingten CO₂-

Emissionen verursacht werden. Es verbleiben in diesem Minderungspfad die prozessbedingten CO_2 -Emissionen aus den chemischen Reaktionen bei der Glasherstellung. Durch die zunehmende Glasproduktion werden diese von 700.000 Tonnen CO_2 in 2020 auf insgesamt 780.000 Tonnen CO_2 pro Jahr bis 2045 ansteigen. Insgesamt führt der Minderungspfad Elektrifizierung zu einer Reduktion der CO_2 -Emissionen in der Glasindustrie um 79 %. Die Emissionen würden von 3,8 Millionen Tonnen CO_2 auf 780.000 Tonnen CO_2 pro Jahr bis 2045 sinken.

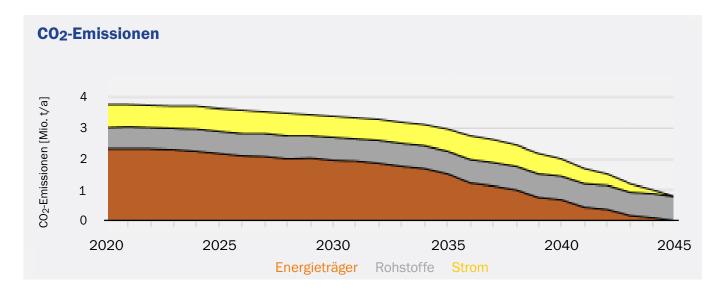


Abbildung 21: Entwicklung der CO₂-Emissionen im Transformationspfad Elektrifizierung

Spezifische Produktionskosten

Der zunehmende Einsatz von Strom und Wasserstoff führt zu einer Steigerung der Energiekosten von 68 % im Bereich Behälterglas, 156 % im Bereich Flachglas und von 73 % im Bereich Gebrauchs- und Spezialglas. Der Einsparung der energiebedingten CO_2 -Kosten stehen steigende Kosten für die zunehmenden prozessbedingten CO_2 -Emissionen ge-

genüber. Diese unterscheiden sich jedoch nicht von den prozessbedingten Emissionen und Kosten im BAU-Pfad. Dies führt insgesamt zu einer Zunahme der spezifischen CO2-Kosten um 19% für Behälterglas und um 80 % für Flachglas, während die spezifischen CO2-Kosten für Gebrauchs- und Spezialglas um 37 % bis 2045 sinken.

Investitionen

Die erforderlichen Investitionen für die Umstellung der Produktionsprozesse auf vollelektrische und Super-Hybridwannen sowie für die werksinterne Energieinfrastruktur und den Ausbau der erforderlichen Netzanschlüsse betragen jährlich zwischen 35 und 518 Millionen EUR und im Schnitt ca.

200 Millionen EUR. Bis zum Jahr 2045 sind für die Elektrifizierung der Schmelzwannen und die damit einhergehenden Anpassungen der Energieinfrastruktur insgesamt Investitionen in Höhe von 5,6 Milliarden EUR erforderlich.

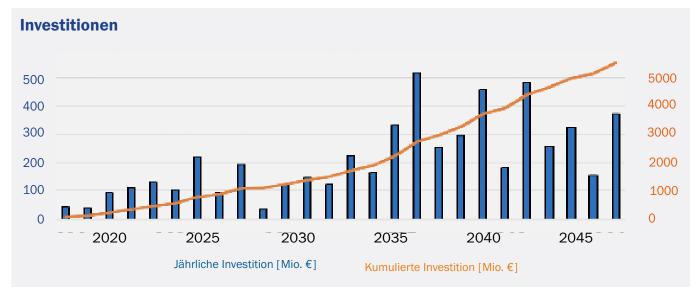


Abbildung 22: Erforderliche Investitionen im Transformationspfad Elektrifizierung

6.4 Treibhausgas-Minde-rungspfad Wasserstoff

Für den zweiten analysierten Transformationspfad wird der technologische Schwerpunkt der Dekarbonisierung auf wasserstoffbetriebene Schmelzwannen gelegt.

Zum Einsatz kommen dabei hauptsächlich Hybridwannen, in welchen der überwiegende Anteil der für den Schmelz- und Läuterprozess benötigten Energie durch die Verbrennung von Wasserstoff in die Schmelzwanne eingebracht wird. Wesentliches Erfordernis für diesen Transformationspfad mit einer Umstellung auf einen überwiegenden Wasserstoffbetrieb in den Glaswerken ist die Verfügbarkeit der Energie-

infrastruktur in Form eines Wasserstoffnetzes in der Nähe der Standorte. Für die einzelnen Glaswerke wurde dafür die Wahrscheinlichkeit der Verfügbarkeit der erforderlichen Wasserstoffinfrastruktur analysiert. Für Wannen, die nicht in der Nähe des prognostizierten Wasserstoffnetzes liegen, wurde eine Umstellung auf vollelektrische Schmelzwannen unterstellt.

Produktionskapazitäten nach Technologien

Wie im Transformationspfad Elektrifizierung beginnt ab dem Jahr 2022 zunächst der Einsatz erster erdgasbetriebener Hybridwannen. Ab 2025 beschleunigt sich die Umstellung auf Hybridwannen, sodass bereits bis zum Jahr 2030 ein Großteil des in Deutschland hergestellten Glases in erdgasbetriebenen Hybridwannen produziert wird. Gleichzeitig erfolgt ab 2030 die Umstellung des Betriebs dieser Hybridwannen von Erdgas auf Wasserstoff. Im Rahmen des Trans-

formationspfades wird davon ausgegangen, dass das Wasserstoffnetz bis 2040 wie geplant weitgehend flächendeckend ausgebaut ist, sodass ab diesem Zeitpunkt verstärkt wasserstoffbetriebene Hybridwannen eingesetzt werden können. Dort, wo die Wasserstoffverfügbarkeit nicht gewährleistet ist, erfolgt die Umstellung von erdgasbetriebenen Hybridwannen auf vollelektrische Schmelzwannen.

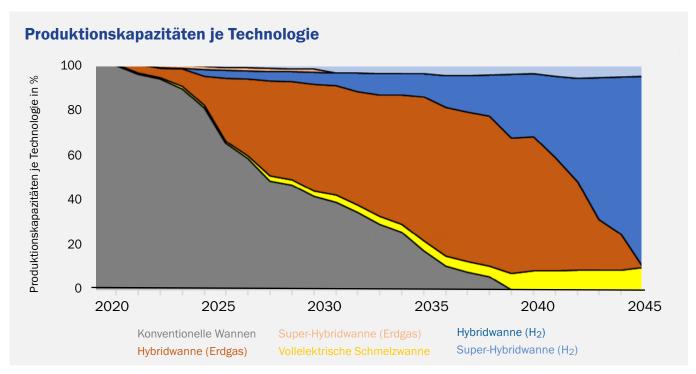


Abbildung 23: Prozentuale Verteilung der eingesetzten Technologien im Transformationspfad Wasserstoff

Die zugehörige Anzahl der installierten Schmelzwannen in den jeweiligen Branchen bis zum Jahr 2045 zeigt Tabelle 14. Im Bereich Behälterglas werden die aktuell eingesetzten 55 konventionellen Schmelzwannen durch 39 Hybridwannen und 5 Super-Hybridwannen mit dem Energieträger Wasserstoff sowie 13 vollelektrische Schmelzwannen ersetzt. Im Bereich Flachglas werden die aktuell 13 betriebenen gasbefeuerten Schmelzwannen zu Hybridwannen mit Wasserstoff-

brennern umgerüstet. Im Bereich Gebrauchs- und Spezialglas werden bis 2045 die 47 fossil beheizten Wannen auf 44 Hybridwannen mit Wasserstoff und zusätzlich 3 vollelektrische Schmelzwannen umgerüstet, sodass in dieser Branche dann 8 vollelektrische Schmelzwannen im Einsatz sein werden.

Technologie	2019					20	30		2045			
Konventionell	55	13	47	115	33	3	20	65	-	-	-	-
Vollelektrisch	2	-	5	7	4	-	5	9	13	-	8	21
Hybrid(CH ₄)	-	-	-	-	18	9	24	51	-	-	-	-
Hybrid(H ₂)	-	-	-	-	1	1	3	1	39	13	44	96
Super-Hybrid (CH ₄)	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	-
Super-Hybrid (H ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	5

Behälterglas Flachglas Spezialglas Gesamt

Tabelle 14: Installierte Schmelzwannen je Sektor und Jahr im Wasserstoffpfad

Energieverbrauch

Im Treibhausgas-Minderungspfad Wasserstoff wird der Erdgasverbrauch bis 2045 vollständig substituiert. Die eingesetzten Hybridwannen werden im Zieljahr mit Wasserstoff betrieben, wodurch ein jährlicher Wasserstoffverbrauch von 233.000 Tonnen entsprechend 28,4 PJ resultiert. Durch den Einsatz von hybriden Wannen mit Wasserstoff und vollelek-

trischen Schmelzwannen steigt der jährliche Stromverbrauch um 129 % auf 15,5 PJ (4.305 GWh) im Jahr 2045. Durch die effizientere elektrische Energieeinbringung sinkt der Endenergieverbrauch bei einer gleichzeitigen Zunahme der Produktionsmenge um 11 % auf 43,9 PJ im Jahr.

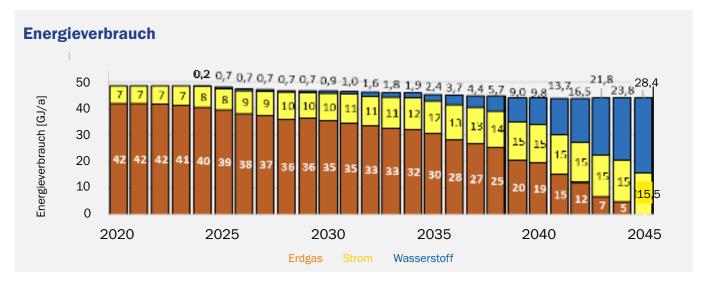


Abbildung 24: Entwicklung des Energieverbrauchs im Transformationspfad Wasserstoff

CO₂-Emissionen

Durch den Einsatz von wasserstoff- und strombetriebenen Schmelzwannen können die energiebedingten CO₂-Emissionen bis 2045 vollständig vermieden werden. Emittiert werden weiter die prozessbedingten CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Glas, die in gleicher Weise auch in den

übrigen Pfaden auftreten. Diese steigen aufgrund der Produktionssteigerungen auf jährlich 780.000 Tonnen CO_2 bis 2045. Über den Transformationspfad Wasserstoff wird entsprechend eine CO_2 -Reduktion von 79 % erreicht.

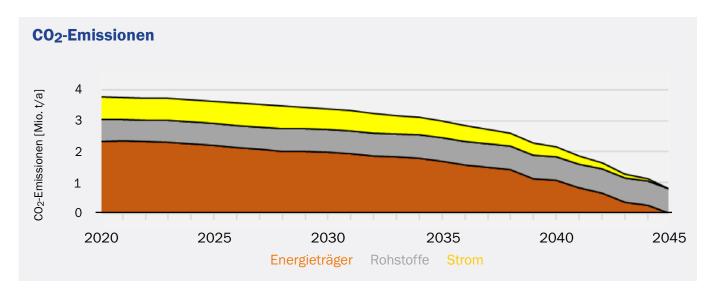


Abbildung 25: Entwicklung der CO₂-Emissionen im Transformationspfad Wasserstoff

Spezifische Produktionskosten

Der Einsatz des teuren Energieträgers Wasserstoff und von Strom wirkt sich deutlich bei den spezifischen Energiekosten aus. Diese steigen durch den Einsatz von Hybridwannen auf Basis Wasserstoff und vollelektrischen Schmelzwannen für die Herstellung von Behälterglas um 231 %, für Flachglas um 385 % und für Gebrauchs- und Spezialglas um 288 %. Die Einsparung der energiebedingten CO₂-Emissionen und die Erhöhung der prozessbedingten CO₂-Emissionen in

Kombination mit steigenden Preisen für CO₂-Zertifikate führen insgesamt zu einer Erhöhung der CO₂-Kosten bei Behälterglas und Flachglas um 19 % bzw. 80 % und zu einem Rückgang der CO₂-Kosten bei Gebrauchs- und Spezialglas um 37 %. Dies führt zu einer Steigerung der gesamten spezifischen Produktionskosten bis 2045 im Bereich Behälterglas um 35 %, im Bereich Flachglas um 44 % und im Bereich Gebrauchs- und Spezialglas um 21 %.

Investitionen

Die erforderlichen Investitionen zur Umstellung der konventionellen Schmelzwannen auf einen Wasserstoff- und Strombetrieb betragen im Jahr zwischen 35 und 239 Millionen EUR und liegen durchschnittlich bei 118 Millionen EUR pro Jahr, abhängig von der Anzahl der in den ein-

zelnen Jahren umzustellenden Wannen. Insgesamt sind zur Umsetzung des dargestellten Transformationspfades Wasserstoff Investitionen in Höhe von 3,2 Milliarden EUR erforderlich.

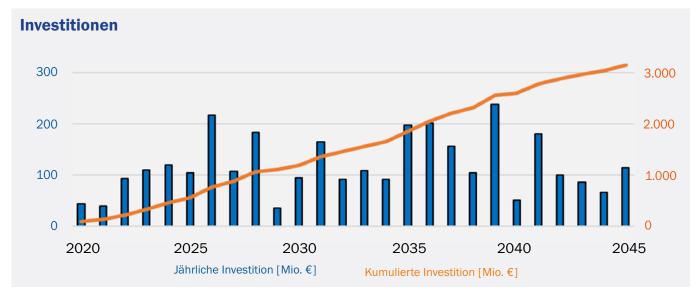


Abbildung 26: Erforderliche Investitionen im Transformationspfad Wasserstoff

6.5 Treibhausgas-Minderungspfad Hybridszenario

In diesem dritten Szenario, das in dieser Roadmap als Hybridszenario bezeichnet wird, wird keine Maximalausprägung von Technologieoptionen unterstellt, sondern es wird auf Basis der in Kapitel 6.1 definierten Annahmen und Rahmenbedingungen eine mögliche und wirtschaftlich sinnvoll erscheinende Umsetzung der Dekarbonisierung unterstellt.

Dazu wurde nach der in Kapitel 4 beschriebenen Methodik für jeden einzelnen Glasproduktionsstandort entschieden, welche Technologie jeweils am geeignetsten für die Umsetzung sein könnte. Dementsprechend stellt dieser Transformationspfad den aus heutiger Sicht wahrscheinlichsten

Pfad zur Dekarbonisierung der Glasindustrie in Deutschland dar und entstand in Diskussionen und Abstimmung mit den Unternehmen der Glasbranche. Die Ausführungen und Auswirkungen dieses Treibhausgasminderungspfades werden getrennt für die drei Glasbranchen aufgezeigt.

6.5.1 Behälterglas

Produktionskapazitäten je Technologie

In der Behälterglasbranche werden erwartungsgemäß ab Mitte dieses Jahrzehnts die ersten Hybridwannen mit Erdgas zum Einsatz kommen. Die ersten vollelektrischen Schmelzwannen zur Herstellung von Glasbehältern für Getränke und Nahrungsmittel kommen gemäß dem Szenario zum Ende dieses Jahrzehnts zum Einsatz. Zudem werden die ersten Wannen für eine Nutzung von Wasserstoff mit steigenden Anteilen umgerüstet. Im Jahr 2030 wird jedoch der Großteil des Behälterglases nach wie vor in konventionellen Schmelzwannen produziert. Aufgrund der Austauschzyklen werden voraussichtlich bereits 17 erdgasbetriebene Hybridwannen, 5 vollelektrische Schmelzwannen, eine Hybridwanne mit Wasserstoff sowie eine Super-Hybridwanne mit Erdgas eingesetzt. In der Phase von 2030

bis zum Jahr 2040 werden verstärkt Super-Hybridwannen und vollelektrische Wannen installiert. Ab 2040 beginnt die Umstellung der betriebenen Super-Hybridwannen von Erdgaseinsatz auf Wasserstoffeinsatz. Dies basiert auf der Erwartung, dass bis zu diesem Zeitpunkt ein flächendeckendes und funktionierendes Wasserstoffnetz in Deutschland aufgebaut wurde. Bis 2045, dem Zieljahr für die Dekarbonisierung der Industrie, werden die letzten konventionellen Schmelzwannen der Behälterglasbranche durch Super-Hybridwannen (39 Stück) mit Wasserstoff und vollelektrische Schmelzwannen (18 Stück) ersetzt, sodass die fossil beheizten Schmelzwannen nicht mehr in der deutschen Glasindustrie im Einsatz sein werden.

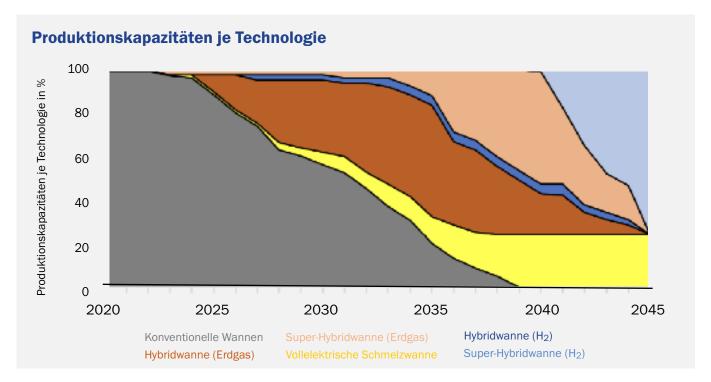


Abbildung 27: Verteilung der Technologien in der Behälterglasbranche im Transformationspfad Hybridszenario

Energieverbrauch

Die Umstellung der konventionellen Schmelzwannen auf vollelektrische Schmelzwannen sowie Super-Hybridwannen mit Wasserstoffeinsatz, bei denen ebenfalls bis zu 80 % der benötigten Endenergie strombasiert bereitgestellt wird, führt zu einer signifikanten Steigerung der Stromnachfrage. Der jährliche Strombedarf in der Behälterglasbranche wird bis 2045 um ca. 300 % auf 17,3 PJ (4.805 GWh) steigen. Zusätzlich wird Wasserstoff in den Super-Hybridwannen

in einer Größenordnung von 2,3 PJ pro Jahr benötigt. Die Elektrifizierung der Schmelzwannen führt zum einen zur Substitution des eingesetzten Erdgases, wodurch der Einsatz des fossilen Energieträgers vollständig ersetzt wird. Zum anderen steigt die Energieeffizienz im Schmelzprozess, sodass sich der jährliche Endenergieverbrauch zur Herstellung von Behälterglas um 23 % auf 19,6 PJ reduziert.

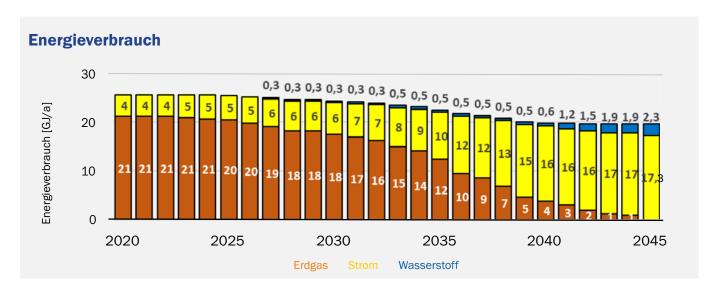


Abbildung 28: Entwicklung des Energieverbrauchs in der Behälterglasbranche im Hybridszenario

CO₂-Emissionen

Durch den Einsatz von vollelektrischen und wasserstoffbetriebenen Hybridwannen sinken die direkten energiebedingten CO₂-Emissionen in den Schmelzwannen bis 2045 auf null. Zusätzlich führt die Dekarbonisierung im Stromsektor zur Einsparung der indirekten CO₂-Emissionen. Zudem werden neben dem hohen Anteil an Altglasscherben

Karbonate zur Glasherstellung eingesetzt. Dies führt zu einem Rückgang der prozessbedingten Emissionen im Jahr 2045 auf einen Wert von 328.000 Tonnen CO₂ pro Jahr. Die gesamten CO₂-Emissionen in der Behälterglasindustrie sinken entsprechend von jährlich knapp 2 Millionen Tonnen um 83 %.

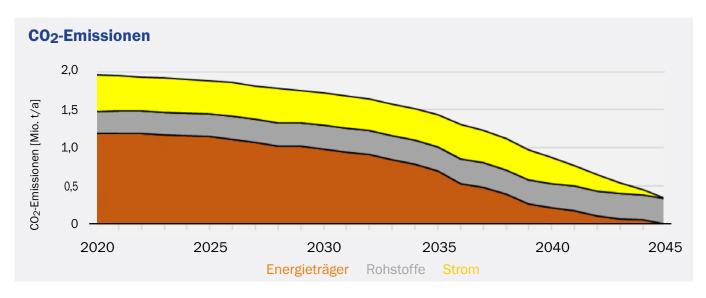


Abbildung 29: Entwicklung der CO₂-Emissionen in der Behälterglasbranche im Hybridszenario

Spezifische Produktionskosten

Die Betriebskosten zur Herstellung von Behälterglas werden, getrieben durch den Einsatz der teuren Energieträger Strom und Wasserstoff, steigen. Der spezifische Anteil der Energiekosten erhöht sich um ca. 110 %, während die spezifischen CO₂-Kosten um 19 % ansteigen. Die übrigen Anteile der Produktionskosten werden demgegenüber

relativ konstant bleiben, sodass sich die Dekarbonisierung des Produktionsprozesses hauptsächlich auf die Energieund CO₂- Kosten auswirken wird. Insgesamt werden die spezifischen Produktionskosten um ca. 16 % auf insgesamt 526 EUR pro Tonne Behälterglas steigen.

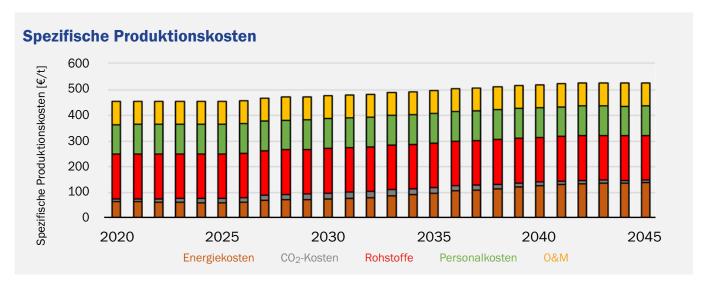


Abbildung 30: Entwicklung der spezifischen Produktionskosten in der Behälterglasbranche im Hybridszenario

Investitionen

Zur Umstellung auf vollelektrische und Super-Hybridwannen gemäß des skizzierten Transformationspfades werden jährlich Investitionen zwischen 16 und 307 Millionen EUR und durchschnittlich 109 Millionen EUR erforderlich. In Summe

werden zur Umsetzung des aufgezeigten Transformationspfades in der Behälterglasbranche bis 2045 Investitionen in Höhe von 3,2 Milliarden EUR benötigt.

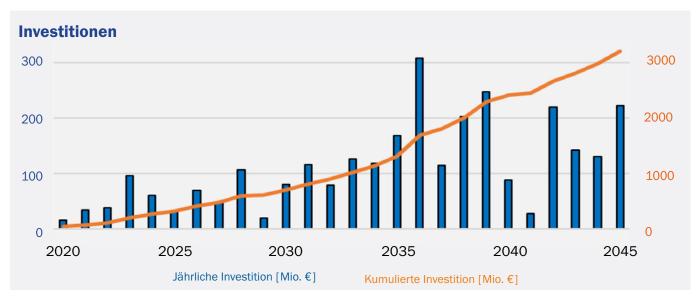


Abbildung 31: Erforderliche Investitionen zur Umsetzung des Transformationspfades Hybridszenario in der Behälterglasbranche

6.5.2 Flachglas

Produktionskapazitäten je Technologie

Die Entwicklung der eingesetzten Technologien zur Herstellung von Flachglas in Deutschland bis 2045 zeigt Abbildung 32. Zu Beginn dieses Jahrzehnts werden die ersten erdgasbetriebenen Hybridwannen zum Einsatz kommen. Ab 2025 werden zusätzlich die ersten Hybridwannen mit Einsatz von Wasserstoff installiert. Bis 2030 wird bereits der Großteil des in Deutschland produzierten Flachglases in Hybridwannen mit Strom und Erdgas produziert werden. Der Anteil an Hybridwannen wird ab 2030 weiter ausgebaut, sodass bis 2040 bereits 12 der 13 Schmelzwannen in der Flachglasbranche als Hybridwannen betrieben werden. Diese Hy-

bridwannen werden ab 2040 nach und nach auf einen Wasserstoffbetrieb umgerüstet und der Anteil elektrischer Energie durch eine Weiterentwicklung zu Super-Hybridwannen gesteigert. Dementsprechend befinden sich im Jahr 2045 sieben Hybridwannen und sechs Super-Hybridwannen mit dem Brennstoff Wasserstoff im Einsatz. Aufgrund der Herausforderungen der elektrischen Beheizung bei sehr großen Schmelzwannen, wie sie in der Flachglasherstellung üblich sind, wird der Einsatz vollelektrischer Wannen bis 2045 ausgeschlossen.

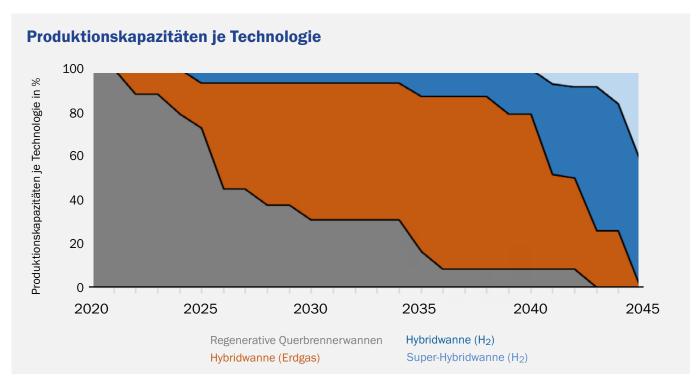


Abbildung 32: Prozentuale Verteilung der Produktionskapazitäten nach Technologie im Transformationspfad Hybridszenario für die Flachglasbranche

Energieverbrauch

Die Umstellung auf Hybrid- und Super-Hybridwannen, in denen 20% bis 80 % des erforderlichen Energiebedarfs durch Strom bereitgestellt werden, führt zu einer entsprechenden Steigerung des Strombedarfs bis zum Jahr 2045. Insgesamt wird der Strombedarf um 880 % auf ca. 6,7 PJ (1.861 GWh) bis 2045 im Jahr steigen. Der jährliche Bedarf

an Wasserstoff, der als CO₂-freier Energieträger in den Hybrid- und Super-Hybridwannen bis 2045 zum Einsatz kommt, wird auf 5,8 PJ ansteigen. Für die Herstellung von Flachglas werden dann zu relativ gleichen Anteilen die beiden Energieträger Strom und Wasserstoff eingesetzt.

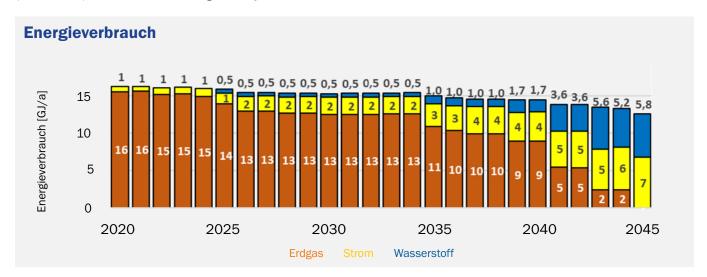


Abbildung 33: Entwicklung des jährlichen Energieverbrauchs zur Herstellung von Flachglas im Transformationspfad Hybridszenario

CO₂-Emissionen

Durch die vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors bis 2045 sinken die energiebedingten CO₂-Emissionen durch den Einsatz von Strom auf null und die brennstoffbedingten Emissionen können durch den Einsatz von Wasserstoff vollständig vermieden werden. Die prozessbedingten CO₂-Emissionen können dagegen aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen

Glasscherben und alternativer Rohstoffe nicht verringert werden, sodass die spezifische Menge der prozessbedingten CO₂-Emissionen bis 2045 nahezu unverändert bleibt. Entsprechend sinken die jährlichen CO₂-Emissionen von insgesamt 1,32 Millionen Tonnen in 2020 um 68 % auf 416.000 Tonnen CO₂ in 2045.

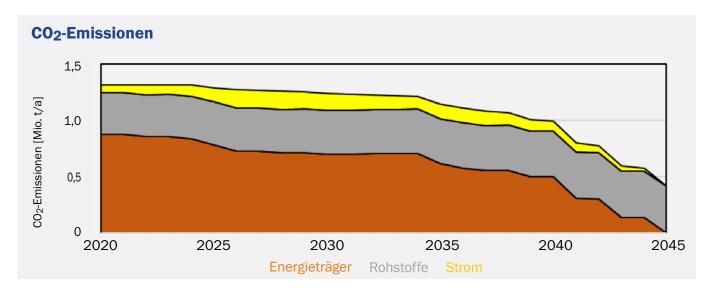


Abbildung 34: Entwicklung der CO₂-Emissionen in der Flachglasbranche im Transformationspfad Hybridszenario

Spezifische Produktionskosten

Durch den Einsatz der teuren Energieträger Strom und Wasserstoff steigen die Betriebskosten zur Herstellung von Flachglas. Der Anteil der Energiekosten wird dabei um ca. 250 % ansteigen. Die prozessbedingten CO₂-Emissionen führen in Verbindung mit dem Preisanstieg der CO₂-Zertifikate zu einem Anstieg der spezifischen CO₂-Kosten um 80 %. Die übrigen Anteile der Produktionskosten

bleiben dagegen weitgehend konstant, sodass es durch die Umstellung der Produktionsprozesse zu einer Steigerung der spezifischen Produktionskosten von 35 % auf 582 EUR pro Tonne Flachglas kommt.

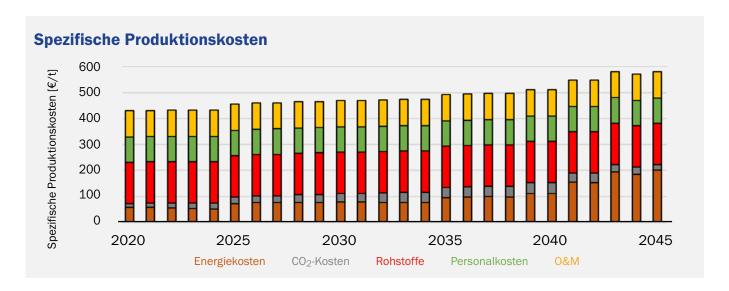


Abbildung 35: Entwicklung der spezifischen Produktionskosten einer Tonne Flachglas im Hybridszenario

Investitionen

Zur Umstellung auf Hybrid- und Super-Hybridwannen werden in der Flachglasindustrie jährlich Investitionen im Durchschnitt von 40 Millionen EUR erforderlich. Mit der Umsetzung des gesamten Transformationspfades sind Investi-

tionen in Höhe von insgesamt 1,1 Milliarden EUR bis 2045 verbunden. Aus kartellrechtlichen Gründen wurden im nachfolgenden Schaubild nur die kumulierten jährlichen Investitionen prozentual zum Maximalwert angegeben.

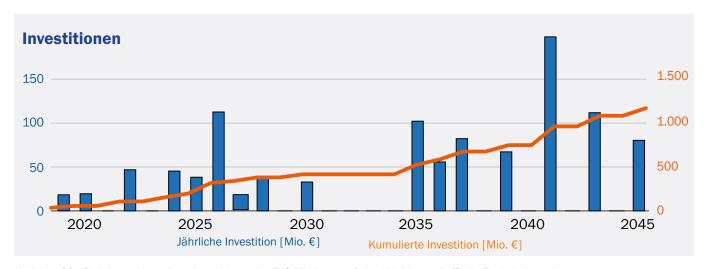


Abbildung 36: Jährliche und kumulierte Investitionen des THG-Minderungspfades Hybridszenario für die Flachglasbranche

6.5.3 Gebrauchs- und Spezialglas

Produktionskapazitäten je Technologie

Neben den bereits im Einsatz befindlichen vollelektrischen Schmelzwannen werden ab Mitte der 2020er zur Herstellung von Spezial- und Gebrauchsgläsern verstärkt erdgasbetriebene Hybridwannen und vereinzelt Super-Hybridwannen eingesetzt. Dies geschieht meist durch eine Leistungssteigerung der elektrischen Energiezufuhr zur Prozesswärmeerzeugung in den konventionellen Schmelzwannen. Hierdurch werden bereits im Jahr 2030 13 Hybridwannen mit Erdgas sowie eine Hybridwanne mit Wasserstoff und fünf erdgasbetriebene Super-Hybridwannen installiert sein. Darüber hinaus sind wie im Ausgangsjahr sechs vollelektrische Schmelzwannen im Einsatz. Ab 2030 steigt die Anzahl erdgasbetriebener Hybridwannen weiter an und auch die Anzahl vollelektrischer Schmelz-

wannen nimmt zu. Zusätzlich nimmt auch die Umstellung auf Super-Hybridwannen mit Erdgas ab Mitte der 2030er deutlich zu, die dann ab 2040 von Erdgaseinsatz auf Wasserstoffbetrieb umgestellt werden. Dabei wurde unterstellt, dass bis 2040 große Teile des Erdgasnetzes für die Bereitstellung von Wasserstoff umgerüstet wurden. Im Zieljahr 2045 wird der größte Anteil des in Deutschland produzierten Gebrauchs- und Spezialglas in 34 Super-Hybridwannen mit Wasserstoff hergestellt. Die Restmengen werden in 18 vollelektrischen Schmelzwannen produziert. Dementsprechend wird keine der im Jahr 2020 installierten konventionellen Schmelzwannen im Jahr 2045 noch in Betrieb sein.

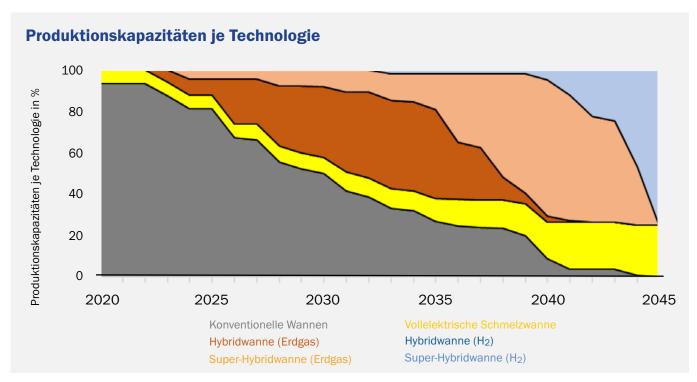


Abbildung 37: Entwicklung der eingesetzten Technologien zur Herstellung von Gebrauchs- und Spezialglas

Energieverbrauch

Durch die Umstellung auf Hybrid- und Super-Hybridwannen wird der Erdgasverbrauch zunächst sinken und der Stromverbrauch durch eine erhöhte Effizienz bei gleichzeitig steigendem Einsatz leicht steigen. Bis 2045 steigt der

Strombedarf dann um 241 % auf ca. 5,9 PJ (1.650 GWh) im Jahr, während der Einsatz von Erdgas vollständig substituiert wird. Der Einsatz von Wasserstoff in den Super-Hybridwannen lässt den Bedarf bis zum Jahr 2045 auf 0,7 PJ steigen.

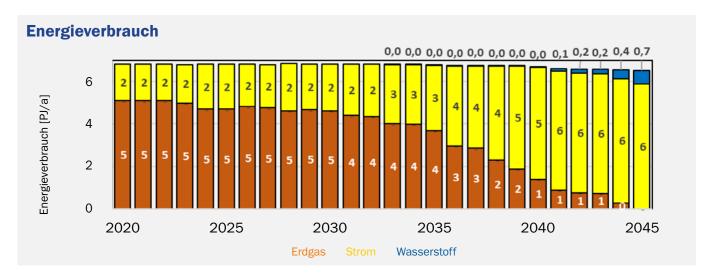


Abbildung 38: Entwicklung des Energieverbrauchs bis 2045 im Bereich Spezial- und Gebrauchsglas

CO₂-Emissionen

Die Steigerung des elektrischen Anteils am gesamten Energieverbrauch führt zu einer Verschiebung der Anteile der direkten und indirekten CO₂-Emissionen. Die sukzessive Reduzierung des CO₂-Emissionsfaktors für bezogenen Strom durch die zugrunde gelegte vollständige Dekarbonisierung des Stromsektors reduziert die energiebedingten CO₂-Emissionen bis 2045 vollständig. Der Anteil an prozessbedingten CO₂-Emissionen durch eingesetzte Karbonate spielen bei der Herstellung von Gebrauchs- und

Spezialglas eine nachgeordnete Rolle. Für deren Einsatz wird bis 2045 kein adäquater Ersatz durch Verwendung anderer Rohstoffe möglich sein, sodass die spezifischen prozessbedingten CO₂-Emissionen unverändert bleiben. Durch den Einsatz von Strom und Wasserstoff zur Herstellung von Gebrauchs- und Spezialglas werden die CO₂-Emissionen dieser Glasbranche von 515.000 Tonnen im Jahr 2020 um 94 % auf 36.000 Tonnen bis 2045 reduziert.

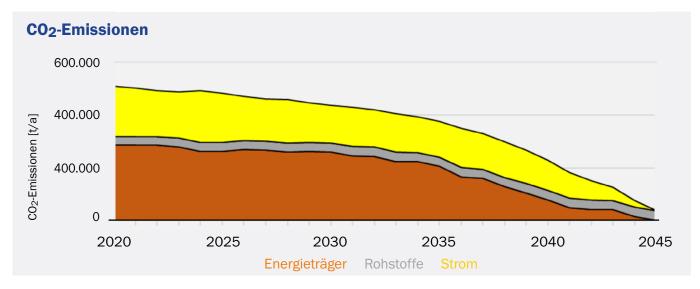


Abbildung 39: Entwicklung der CO₂-Emissionen bis 2045 in der Gebrauchs- und Spezialglasbranche

Spezifische Produktionskosten

Die spezifischen Produktionskosten für den Bereich Gebrauchs- und Spezialglas weisen aufgrund der großen Vielzahl und Heterogenität der Produkte eine große Spannweite auf. Die einzelnen Kostenanteile für Energie oder Rohstoffe können entsprechend sehr unterschiedlich sein, sodass die Auswirkungen des aufgezeigten Transformationspfades auf die spezifischen Produktionskosten lediglich als prozentuale Größen dargestellt werden.

Durch den verstärkten bzw. erstmaligen Einsatz der teuren Energieträger Strom und Wasserstoff werden die Energiekosten in diesem Pfad um ca. 140 % steigen. Die spezi-

fischen CO₂-Kosten werden trotz einer Verteuerung der CO₂-Zertifikate für den Ausgleich der prozessbedingten CO₂-Emissionen bei gleichzeitigem Rückgang der energiebedingten Emissionen um 37 % abnehmen. Vergleichbar den Auswirkungen in den Branchen Behälter- und Flachglas werden die weiteren Komponenten der Produktionskosten relativ konstant bleiben, sodass die Dekarbonisierung der Produktionsprozesse im Wesentlichen Auswirkungen auf die Energie- und CO₂-Kosten haben wird und letztendlich zu einer Steigerung der spezifischen Produktionskosten für Gebrauchs- und Spezialglas um 10 % führen wird.

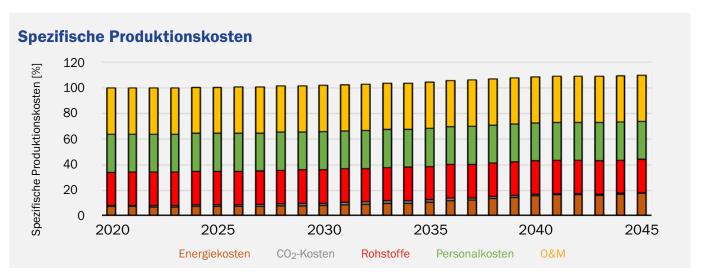


Abbildung 40: Entwicklung der prozentualen Verteilung der spezifischen Produktionskosten für Spezial- und Gebrauchsglas

Investitionen

Zur Umstellung der konventionellen Schmelzwannen auf Hybrid- und vollelektrische Schmelzwannen sind im Hybrid- szenario Investitionen in Höhe von jährlich bis zu 71 Millionen EUR und durchschnittlich von 24 Millionen EUR erforderlich. Die kumulierten Investitionen zur Umsetzung dieser Transformationsstrategie bis 2045 betragen 651

Millionen EUR. Der größte Teil der Investitionen ist zwischen 2030 und 2040 erforderlich, wenn die Umrüstung auf vollelektrische und Super-Hybridwannen erfolgt, und ab 2040 bei der Umrüstung von erdgasbetriebenen Super-Hybridwannen auf Wasserstoffbetrieb.

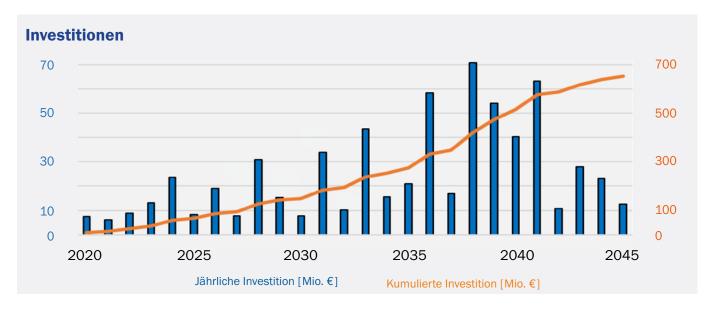


Abbildung 41: Investitionen zur Umsetzung des Treibhausgasminderungspfades Hybridszenario in der Gebrauchs- und Spezialglasbranche

6.5.4 Gesamte Glasbranche

Nachfolgend werden die Ergebnisse und Auswirkungen des Treibhausgasminderungspfades im Hybridszenario für die gesamte Glasbranche dargestellt.

Produktionskapazitäten je Technologie

Ab Anfang dieses Jahrzehnts werden die ersten konventionellen Schmelzwannen in der Flachglasindustrie sowie in der Gebrauchs- und Spezialglasindustrie auf Hybridwannen umgestellt. Ab 2025 kommt dieser Wannentyp ebenfalls in der Behälterglasindustrie zum Einsatz. Darüber hinaus werden in den Bereichen Behälterglas sowie Gebrauchsund Spezialglas die ersten erdgasbetriebenen Super-Hybrid-

wannen eingesetzt, in denen der Energiebedarf zu 60 – 80 % durch elektrische Energie gedeckt wird. Im Jahr 2030 würde dann bereits etwa die gleiche Menge Glas in Hybridwannen mit Erdgas hergestellt wie in konventionellen Schmelzwannen. Darüber hinaus sind die ersten Super-Hybridwannen mit Erdgas und Hybridwannen mit Wasserstoff im Einsatz. Ab 2030 nimmt der Anteil an erdgasbetriebenen Hybridwannen in den

drei betrachteten Branchen weiter stetig zu. Zudem kommen vermehrt vollelektrische Schmelzwannen in den Bereichen Behälterglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas zum Einsatz. In der Flachglasindustrie werden ab 2035 erste Hybridwannen auf Wasserstoffbetrieb umgestellt. Ab 2040 werden in allen Branchen die bereits installierten Hybridwannen auf einen Wasserstoffbetrieb umgerüstet und der Anteil des durch elektrische Energie gedeckten Energiebedarfs durch die Umstellung auf Super-Hybridwannen weiter erhöht. Im Zieljahr 2045, in dem die vollständige Dekarbonisierung erreicht werden muss, werden folglich keine konventionellen Schmelzwannen

auf Erdgasbasis mehr in der Glasindustrie betrieben. In den Bereichen Behälterglas und Gebrauchs- und Spezialglas wird der Großteil des Glases in Super-Hybridwannen mit Wasserstoff-Zufeuerung hergestellt, insbesondere im Bereich der Läuterung, die maßgeblichen Einfluss auf die Glasqualität hat. Zudem werden in diesen beiden Branchen jeweils 18 vollelektrische Schmelzwannen eingesetzt In der Flachglasindustrie kommen sowohl Hybridwannen als auch Super-Hybridwannen mit Wasserstoff zum Einsatz. In Tabelle 15 sind die Entwicklungen der Wannentypen nach Stützjahr und Branche zusammengefasst.

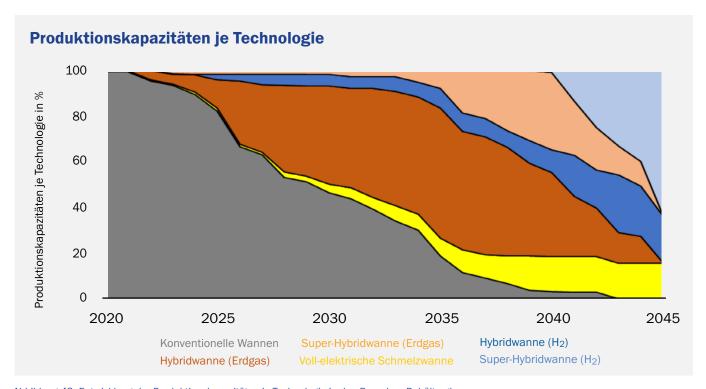


Abbildung 42: Entwicklung der Produktionskapazitäten je Technologie in den Branchen Behälterglas, Flachglas sowie Spezial- und Gebrauchsglas im Hybridszenario

Technologie	2019			2030			2045					
Konventionell	55	13	47	115	55	13	47	115	55	13	47	115
Vollelektrisch	2	-	5	7	2	-	5	7	2	-	5	7
Hybrid(CH ₄)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hybrid(H ₂)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Super-Hybrid (CH ₄)	-	-	_	-	_	_	-	-	-	-	-	-
Super-Hybrid (H ₂)	-	-	_	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Gesamt

Behälterglas Flachglas

Tabelle 15: Entwicklung der Anzahl installierter Schmelzwannen in den Branchen Behälterglas, Flachglas sowie Gebrauchs- und Spezialglas im Hybridszenario

Energieverbrauch

Durch die aufgezeigte Teilelektrifizierung der Schmelzwannen bis 2030 sinkt der Erdgasverbrauch, während der Stromverbrauch ansteigt. Die Verschiebung des wesentlichen Energieträgers wird bis 2045 durch die Einführung von Super-Hybridwannen weiter zunehmen. Dies führt in Summe zu einem Anstieg des Stromverbrauchs in den betrachteten Branchen um 341 % auf insgesamt ca. 30 PJ (8.333 GWh) pro Jahr. Zusätzlich erfolgt die Umstellung der Hybridwannen

und Super-Hybridwannen von Erdgas auf Wasserstoff, sodass der jährliche Wasserstoffbedarf auf 8,7 PJ steigt. Der gesamte Energieverbrauch wird durch die erhöhte Effizienz der teil- und vollelektrischen Schmelzwannen um ca. 20 % bis zum Jahr 2045 abnehmen, obwohl durch eine Steigerung der Produktionskapazitäten der grundsätzliche Bedarf ansteigt.

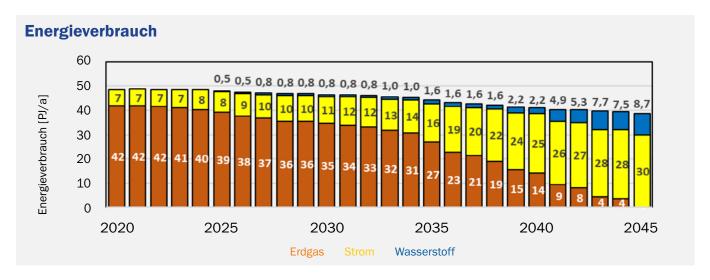


Abbildung 43: Entwicklung des Energieverbrauchs in der Glasindustrie im Transformationspfad Hybridszenario

CO₂-Emissionen

Durch die weitgehende Elektrifizierung des Glasherstellungsprozesses bei gleichzeitiger Dekarbonisierung des Stromsektors und den Einsatz von Wasserstoff können die energiebedingten CO₂-Emissionen in der Glasindustrie bis 2045 vollständig vermieden werden. Durch die mangelnde Verfügbarkeit alternativer und kohlenstoffärmerer Rohstoffe als Ersatz für die eingesetzten Karbonate und durch erhöhte

Produktionsmengen in den einzelnen Glasbranchen steigt die Menge prozessbedingter CO₂-Emissionen bis 2045 geringfügig an. In Summe führt dies zu einem Rückgang der jährlichen CO₂-Emissionen der gesamten Glasbranche um 79 %, von 3,8 Millionen Tonnen im Jahr 2020 auf 780.000 Tonnen im Jahr 2045.

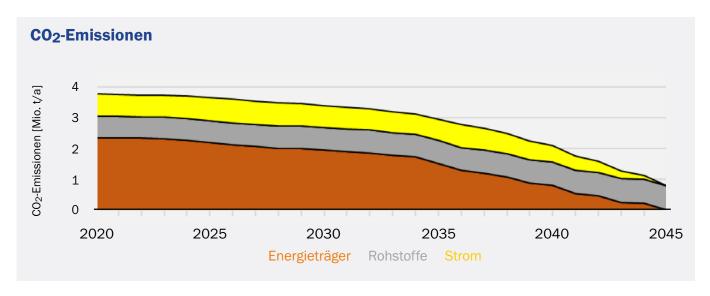


Abbildung 44: Entwicklung der CO₂-Emissionen der Glasindustrie im Hybridszenario

Investitionen

Die Dekarbonisierung erfordert ein erhebliches Maß an Investitionen. Zur Zielerreichung sind dabei in den Werken sowohl die Schmelzwannen zu ersetzen bzw. umzurüsten als auch die notwendigen Anpassungen an den Energieinfrastrukturen vorzunehmen. Für diesen Transformationsprozess auf vollelektrische und Hybrid- und Super-Hybrid-

wannen werden jährlich Investitionen zwischen 35 und 500 Millionen EUR und durchschnittlich 183 Millionen EUR erforderlich. Bis 2045 werden insgesamt Investitionen für die Realisierung des dargestellten Treibhausgasminderungspfades von 4,9 Milliarden EUR erforderlich.



Abbildung 45: Jährliche und kumulierte Investitionen zur Realisierung des Treibhausgasminderungspfades Hybridszenario

6.6 Vergleichende Darstellung der Ergebnisse

Neben dem Business-as-Usual-Szenario wurden im Rahmen dieses Roadmap-Prozesses zwei Extrem- und ein Hybridszenario analysiert. Tabelle 16 fasst die Ergebnisse und die Auswirkungen für die untersuchten Transformationspfade zusammen.

Transformationspfad		(C) BAU	5 Elektrifizierung	(H _z) Wasserstoff	CO ₂ Hybridszenario
Anzahl Wannen	Konventionell	115	0	0	0
	Elektrisch	7	108	21	36
	Hybrid (H ₂)	0	1	96	7
	Super-Hybrid (H ₂)	0	13	5	79
Energieverbrauch [PJ/a]	Erdgas	43,3	0,0	0,0	0,0
	Wasserstoff	0,0	2,8	28,4	8,7
	Strom	7,0	31,3	15,5	30,0
CO ₂ -Emissionen [Mio. t/a]	Energiebedingt	2,4	0,0	0,0	0,0
	Prozessbedingt	0,8	0,8	0,8	0,8
Kumulierte Investitionen [Mrd. €]		1,6	5,6	3,2	4,9

Tabelle 16: Ergebnisse der vier betrachteten Szenarien BAU, Elektrifizierung, Wasserstoff und Hybridszenario

6.6.1 Minderung der CO₂-Emissionen

Die Entwicklungen der CO_2 -Emissionen in den betrachteten Szenarien sind in Abbildung 46 dargestellt. Im Blick auf das Zieljahr 2045 führen alle drei Transformationsszenarien entsprechend den Vorgaben zu den gleichen CO_2 -Emissionen.

Aufgrund der unterschiedlichen Maßnahmenabläufe in den drei Transformationsszenarien verlaufen diese Minderungskurven jedoch nicht gleich, sondern unterscheiden sich geringfügig in den Zwischenstufen. Die energiebedingten CO₂-Emissionen sinken auf null, die prozessbedingten Emissionen steigen gegenüber dem Ausgangsjahr geringfügig an. Auch im Szenario "BAU" sinken die CO₂-Emissionen ab, wenngleich in deutlich geringerem Umfang als in den Transformationspfaden. Die Dekarbonisierung des Stromsektors sorgt automatisch dafür, dass die indirekten CO₂-Emissionen für den Stromeinsatz absinken. Infolge der Produktionssteigerungen nehmen die direkten prozessbedingten CO₂-Emissionen durch den erhöhten Einsatz an Karbonaten unvermeidlich zu. Die CO₂-Emissionen in

den drei Transformationspfaden "Elektrifizierung", "Wasserstoff" und "Hybridszenario" sinken durch den Einsatz der grünen Energieträger Strom und Wasserstoff signifikant ab. Die vollständige Vermeidung von direkten und indirekten energiebedingten CO₂-Emissionen führt zu einem Rückgang der jährlichen CO₂-Emissionen auf ca. 780.000 Tonnen bis 2045. Die verbleibenden 780.000 Tonnen prozessbedingte CO₂-Emissionen pro Jahr werden durch die Dissoziation der eingesetzten Karbonate verursacht und ließen sich nur durch den Einsatz von Abscheideverfahren und der nachgelagerten Speicherung vermeiden. Diese prozessbedingten CO₂-Emissionen werden in den dargestellten Transformationspfaden aufgrund fehlender Alternativen zu den eingesetzten Karbonaten und der fehlenden Infrastruktur für CO₂-Transport

und Speicherung weiterhin anfallen. Die CO₂-Minderung im Transformationspfad "Wasserstoff" hinkt gegenüber den beiden Transformationspfaden "Elektrifizierung" und "Hybridszenario" etwas hinterher. Dies ergibt sich aus dem lang-

samen Auf- und Ausbau der Wasserstoffinfrastrukturen in Deutschland, sodass erst zu späteren Zeitpunkten eine Umstellung auf Wasserstoffbetrieb ermöglicht wird.

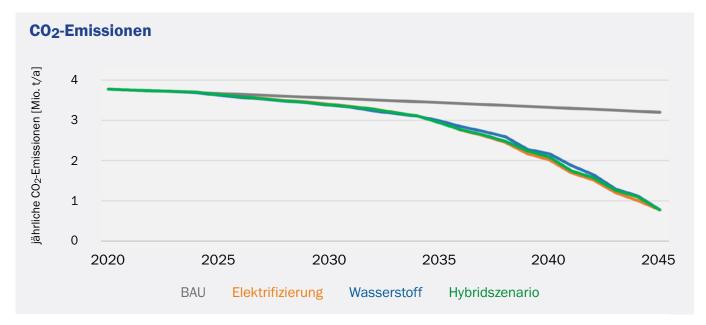


Abbildung 46: Entwicklung der jährlichen CO₂-Emissionen in den vier betrachteten Szenarien BAU, Elektrifizierung, Wasserstoff und Hybridszenario

6.6.2 Strom- und Wasserstoffbedarf

Durch den Einsatz von vollelektrischen und Hybridwannen steigt der Bedarf an Strom und Wasserstoff bis 2045 erheblich an. Dabei wurde im Rahmen der Roadmap unterstellt, dass erneuerbarer Strom in ausreichendem Umfang für die Glasindustrie zur Verfügung steht.

Der Schwerpunkt der Energiebereitstellung liegt bei den Hybrid- und Super-Hybridwannen auf dem Energieträger Strom, sodass der Strombedarf am stärksten steigen wird.

Der erste Einsatz von Hybridwannen und vollelektrischen Schmelzwannen führt beginnend ab 2025 zunächst zu einer moderaten Steigerung des Strombedarfs (vergleiche Graphen mit Raute in Abbildung 47). Ab 2030 wird in den beiden Transformationspfaden "Elektrifizierung" und "Hybridszenario" der Fokus auf voll- und teilelektrifizierte Schmelzwannen gelegt, sodass der Strombedarf ab diesem Zeitpunkt signifikant steigt. Im Zieljahr 2045 wird in diesen beiden Szenarien der Großteil des Glases in Super-Hybrid-

wannen und vollelektrischen Schmelzwannen hergestellt, wodurch der jährliche Strombedarf 31,3 PJ (Elektrifizierung) bzw. 30,0 PJ (Hybrid) beträgt.

Der Wasserstoffbedarf nimmt erst ab 2030 merklich zu (vergleiche Graphen mit Stern in Abbildung 47). Im Szenario "Wasserstoff" liegt der energetische Schwerpunkt auf einem frühestmöglichen Ausbau von wasserstoffbetriebenen Hybridwannen, sodass in diesem Szenario der Wasserstoffbedarf mit dem Beginn der Verfügbarkeit ab 2035 deutlich steigen wird. In diesem Transformationspfad werden im Jahr 2045 hauptsächlich wasserstoffbetriebene Hybridwannen eingesetzt, der jährliche Wasserstoffbedarf erreicht deshalb

einen Wert von 28,4 PJ. Im Transformationspfad "Hybridszenario" wird die Verfügbarkeit der Wasserstoffinfrastrukturen in Deutschland etwas pessimistischer eingeschätzt, so-

dass der Wasserstoffbedarf erst ab 2040 mit der Umstellung der erdgasbetriebenen Super-Hybridwannen auf Wasserstoffbetrieb ansteigt und im Jahr 2045 8,7 PJ beträgt.

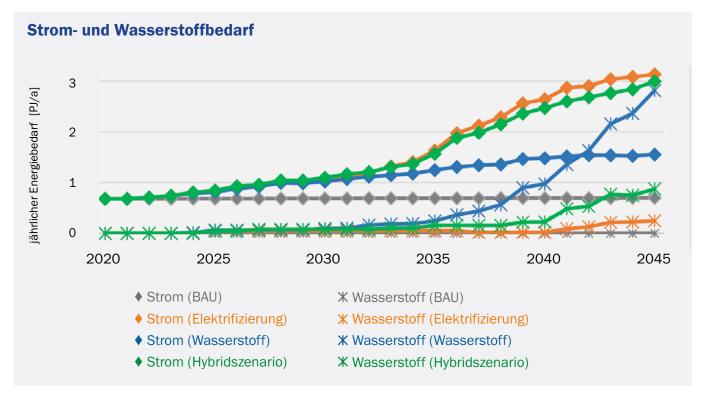


Abbildung 47: Gegenüberstellung des jährlichen Strom- und Wasserstoffbedarfs der vier betrachteten Szenarien BAU, Elektrifizierung, Wasserstoff und Hybridszenario

6.6.3 Erforderliche Investitionen für die Transformation

Zur Umsetzung der entwickelten Transformationspfade und dem Einsatz der betrachteten Dekarbonisierungsmaßnahmen werden umfangreiche Investitionen erforderlich. Diese Investitionen sind zur Umstellung der Schmelzwannen sowie entsprechender Anpassung der umliegenden Energieinfrastruktur erforderlich.

Die kumulierten erforderlichen Investitionen bis 2045 sind den Szenarien in Abbildung 48 gegenübergestellt. Die kumulierten Investitionen im BAU- Szenario entsprechen den Aufwendungen für die routinemäßigen Investitionen am Ende der Lebensdauer und betragen 1,6 Milliarden EUR. Dieser Wert dient als Referenzwert für die Transformationspfade. Die Differenz der Investitionen in den Transformationspfaden und diesem Referenzwert stellen die zusätzlichen Investitionen

dar, die zur Erreichung der Dekarbonisierungsziele erforderlich werden. Im Szenario "Wasserstoff" werden überwiegend zusätzliche Investitionen für den Umbau der konventionellen Wannen zu Hybridwannen notwendig. Für die Anpassung der Energieinfrastruktur vom Erdgas- zum Wasserstoffbezug wird dagegen von moderaten Investitionen ausgegangen.

In den Transformationspfaden "Elektrifizierung" und "Hybridszenario" liegt der Schwerpunkt auf der elektrischen Prozesswärmebereitstellung. Durch die reduzierte Lebensdauer von vollelektrischen Schmelzwannen gegenüber konventionellen Wannen werden die Häufigkeit der Kaltreparaturen und folglich die Investitionen steigen. Zudem werden infolge des erhöhten Strombedarfs massive Investitionen in die werksinterne sowie vorgelagerte Energieinfrastruktur der Glaswerke erforderlich. Diese Zusatzkosten führen bei der Realisierung der Transformationspfade "Elektrifizierung" und "Hybridszenario" bis 2045 zu erforderlichen Investitionen in Höhe von 5,6 bzw. 4,9 Milliarden EUR. Die Mehrkosten durch den Einsatz von CO2-neutralen Schmelzverfahren mit einer entsprechenden Anpassung der Energieinfrastrukturen im Vergleich zum BAU-Szenario

betragen 1,6 Milliarden EUR (Transformationspfad "Wasserstoff"), 3,3 Milliarden EUR (Transformationspfad "Hybridszenario") und 4,0 Milliarden EUR (Transformationspfad "Elektrifizierung"). Zu berücksichtigen ist dabei, dass im Wasserstoffszenario die Umrüstung der gegenwärtigen Schmelzwannen auf einen Wasserstoffbetrieb nicht so kostenintensiv und aufwendig ausfällt, wie bei einer Elektrifizierung der Schmelzwanne. Außerdem wurde unterstellt, dass der Großteil der werksinternen und umliegenden Erdgasleitungen durch gezielte Umrüstungsmaßnahmen für den Einsatz von Wasserstoff verwendet werden können. Darüber hinaus müssen erhebliche Investitionen in den Aufbau durch Dritte geleistet werden, die jedoch nicht direkt der Glasindustrie zuzuordnen sind, und somit die Verfügbarkeit der Wasserstoffinfrastrukturen mit erheblichen Unsicherheiten belastet ist.

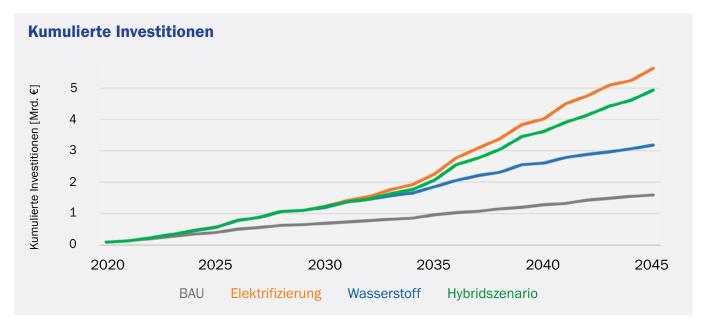


Abbildung 48: Gegenüberstellung der kumulierten Investitionen zur Umsetzung der vier betrachteten Szenarien BAU, Elektrifizierung, Wasserstoff und Hybridszenario

7 Politische Handlungsoptionen und Empfehlungen

Die Umsetzung der aufgezeigten Transformationspfade stellt die Unternehmen der Glasindustrie neben den technischen zusätzlich vor ökonomische und regulatorische Herausforderungen.

Diese Herausforderungen resultieren aus der externen Vorgabe der Klimaneutralität bis 2045, welche vom Staat in Form eines Klimaschutzgesetzes festgeschrieben wurde. Zum Erreichen dieses Ziels, das die erfolgreiche Transformation der gesamten Glasbranche erfordert, sollten für die Industrie geeignete Rahmenbedingungen geschaffen wer-

den, sodass eine Transformation möglich und keine Abwanderung und Schließung von Betrieben die Folge ist. Die wesentlichen in der Diskussion befindlichen Instrumente, die für die Begleitung der Transformation des Sektors geeignet erscheinen, werden im Folgenden dargestellt.

7.1 Handlungsoptionen

Die ökonomischen Herausforderungen und Auswirkungen der möglichen Transformationspfade in Kapitel 6 sowie die allgemeinen in Kapitel 3.2 dargestellten Herausforderungen der Dekarbonisierung zeigen den Handlungsbedarf und die Herausforderungen auf. Dabei soll im Rahmen der Roadmap im Wesentlichen analysiert werden, welche der bereits in der Diskussion befindlichen Instrumente und Anforde-

rungen für das Gelingen der Energiewende für die Glasbranche geeignet erscheinen. Diese Faktoren können die Dekarbonisierung der Produktionsstätten begünstigen und ggf. auch beschleunigen. Sie lassen sich als politische Handlungsempfehlungen in die folgenden drei Kategorien einteilen: Infrastruktur, finanzielle Förderung und Nachfrageanreize. Abbildung 49 stellt diese Bereiche zusammenfassend dar.

Politische Handlungsoptionen

RAHMENBEDINGUNGEN

Energiesystem (7.2.1) **Infi**Bereitstellung ausreichend Aus

erneuerbarer Energieträger

CO₂-Bepreisung

Erweiterung und Priorisierung des EU-ETS

Infrastruktur

Ausbau der Energieinfrastruktur

Genehmigungsverfahren

Beschleunigte Verfahren für Ausbau und Gutachten

FINANZIELLE FÖRDERUNG

Klimaschutzverträge (7.3.1)

Ausgleich der betrieblichen Mehrkosten

Investitionsförderung (7.3.2)

Bezuschussung Investitionen für Umrüstung und Netzanbindung

GLASPRODUKTE

Kreislaufwirtschaft

Erhöhung der Recyclingquote

Grüner Leitmarkt

Schaffung eines Marktes für grüne Produkte

Abbildung 49: Politische Handlungsoptionen zur Umsetzung der Dekarbonisierungspfade in der Glasindustrie

Basierend auf diesen Optionen wurden aus dieser Sammlung an politischen Handlungsoptionen mit dem Projekt-Begleitkreis die vier aus Sicht der Glasbranche wichtigsten ausgewählt, welche nachfolgend diskutiert werden. Diese vier Maßnahmen können im Sinne der erfolgreichen Umsetzung der Dekarbonisierungsroadmap für die Glasindustrie den größten Mehrwert bei der Transformation leisten bzw. sind zwingend erforderlich, damit der aufgezeigte Transformationsprozess gelingen kann. In den nächsten Abschnitten werden die empfohlenen Instrumente zur Begleitung des Transformationsprozesses kurz skizziert.

7.2 Handlungsempfehlungen

Der anstehende Transformationsprozess der Glasindustrie hin zur Treibhausgasneutralität bis 2045 erfordert einen vollständigen Wechsel von fossilen zu $\rm CO_2$ -neutralen Energieträgern.

Entsprechend kann die Transformation nur gelingen, wenn gleichzeitig adäquate Veränderungen im deutschen Energiesystem stattfinden. Für den Einsatz und Betrieb klimaneutraler Produktionsanlagen müssen die hierzu benötigten Energieträger an den Glasstandorten in Deutschland zur Verfügung stehen. Zum anderen muss für diese Energie-

träger auch in den einzelnen Glaswerken die erforderliche Energieinfrastruktur errichtet werden. Daher zählen die beiden nachfolgenden Handlungsoptionen zu den zwingend notwendigen Rahmenbedingungen, die für eine Dekarbonisierung der deutschen Glasindustrie unabdingbar sind.

Für den Einsatz und Betrieb klimaneutraler Produktionsanlagen müssen die hierzu benötigten Energieträger an den Glasstandorten in Deutschland zur Verfügung stehen.

7.2.1 Sicherstellung der Verfügbarkeit erneuerbarer Energieträger

Durch die anstehende Transformation der Glasindustrie zur Dekarbonisierung steigt sowohl der Strom- als auch der Wasserstoffbedarf der Glasunternehmen infolge der Umstellung der Prozesse auf voll- bzw. teil-elektrifizierte Schmelzwannen stark an.

Das Ziel der Klimaneutralität kann deshalb nur erreicht werden, wenn der in der Glasindustrie benötigte Strom und Wasserstoff zu 100% aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden kann. Dies setzt einen massiven Ausbau der entsprechenden Erzeugung in Deutschland oder Importe

aus dem Ausland voraus. Für den kontinuierlichen und ganzjährigen Betrieb der klimafreundlichen Schmelzwannen müssen diese erneuerbaren Energiemengen sowohl kontinuierlich als auch in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Die Betriebe der Glasindustrie können auf den eigenen Betriebsgeländen die erforderlichen Energiemengen nicht selbst erzeugen und bleiben so dauerhaft auf den externen Energiebezug angewiesen.

Über den Bedarf der Glasindustrie hinaus wird der Bedarf an grünem Strom und Wasserstoff auch in den übrigen energieintensiven Sektoren der Industrie, wie z.B. der Stahl- und Chemieindustrie sowie der Sektoren Mobilität und Haushalte, signifikant steigen. Entsprechend besteht ein allgemeiner Konsens darüber, dass der Strom- und Wasserstoffbedarf in Deutschland in den nächsten Jahrzehnten um ein Vielfaches steigen wird.

Zur Deckung dieses erhöhten Energieverbrauchs müssen entsprechende Kapazitäten an erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen gebaut werden. Mit der aktuellen bzw. der jüngsten Ausbaugeschwindigkeit werden die erforderlichen

Ausbauziele bis 2045 nicht zu realisieren sein. Für den Industriestandort Deutschland besteht deshalb die Gefahr, dass dekarbonisierte Produktionsanlagen nicht wie geplant kontinuierlich betrieben werden können oder Produktionskapazitäten wegen fehlender Energiemengen aus dem Markt gehen. Dementsprechend sollte die Bundesregierung den verstärkten und beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland mit höchster Priorität vorantreiben und gleichzeitig Konzepte zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit für die nächsten Jahrzehnte entwickeln. Denn ein Versorgungsausfall hätte katastrophale Folgen für die Anlagentechnik - insbesondere für die Glasindustrie. Die Gewährleistung der Versorgungssicherheit verbessert die unternehmerische Planungssicherheit bezüglich des Umstiegs auf erneuerbare Energieträger und ermöglicht frühzeitige Investitionsentscheidungen zur Abkehr vom Einsatz fossiler Energieträger.

Mit der aktuellen bzw. der jüngsten Ausbaugeschwindigkeit werden die erforderlichen Ausbauziele bis 2045 nicht zu realisieren sein.

7.2.2 Ausbau der Energieinfrastrukturen

Durch den steigenden Einsatz von grünen Energieträgern kommt es in der Glasindustrie zu einer signifikanten Veränderung der Energiebezüge in den Glaswerken, weg vom bisher dominierenden Erdgas hin zu den Energieträgern Strom und Wasserstoff.

Entsprechend muss die allgemeine Energieinfrastruktur in Deutschland sowie die Anbindung der Glaswerke an diese Infrastrukturen angepasst werden.

Durch die Elektrifizierung der Schmelzwannen steigt der Strombedarf der Glaswerke drastisch an. Dies erfordert den Ausbau der übergeordneten Übertragungsnetze, um den hauptsächlich im Norden produzierten grünen Strom in die verbrauchsstarken Regionen im Süden von Deutschland zu leiten. Insbesondere die Haupttrassen zu Industrieclustern und Ballungsgebieten müssen massiv ausgebaut werden, da über diese durch die anstehende sektorübergreifende Elektrifizierung die verstärkte Stromnachfrage transportiert werden muss.

Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Roadmap durchgeführten Untersuchungen zeigen auf, dass in einigen Regionen die Glasindustrie nicht vollständig durch eine Elektrifizierung der Schmelzwannen dekarbonisiert werden kann. Daher wird ein Anteil der benötigten Energie durch den Energieträger Wasserstoff bereitzustellen sein. Derzeit fehlen hier noch die erforderlichen Infrastrukturen, d.h. es ist der Aufbau eines flächendeckenden Wasserstoffnetzes in Deutschland erforderlich, damit die benötigten Mengen Wasserstoff über Wasserstoffpipelines von den Glaswerken bezogen werden können.

Der notwendige Netzauf- bzw. -ausbau hinkt jedoch sowohl für den Energieträger Strom als auch für Wasserstoff stark hinterher, insbesondere, wenn man die zusätzlich benötigten Mengen berücksichtigt, die für den Verbrauch in den weiteren energieintensiven Industrien sowie in den Sektoren Mobilität und Haushalte in den nächsten Jahren prognostiziert werden.

Für weitreichende Investitionsentscheidungen in innovative und teilweise disruptive Technologien benötigen die Unternehmen eine klare strategische Perspektive mit hoher Planungssicherheit. Im Vorfeld entsprechender Entscheidungen muss neben anderen Punkten insbesondere die Energiebereitstellung für die geplante Technologie gesichert sein. Es müssen dazu detaillierte Daten zu Zeitpunkt, Menge und Preis der benötigten Energieträger am Standort vorliegen. Daher muss der Aus- und Aufbau einer Energieinfrastruktur für grüne Energieträger in Deutschland zeitnah und flächendeckend priorisiert werden, um den geografisch in ganz Deutschland verteilten Glasunternehmen den Bezug der grünen Energieträger Strom und Wasserstoff zu ermöglichen.

7.3 Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der Deutschen Glasindustrie

Deutsche Glasunternehmen stehen mit ihren Produkten in einem internationalen Wettbewerb. Der anstehende Dekarbonisierungsprozess führt zunächst zu einem Anstieg der spezifischen Produktionskosten und verringert deshalb die Wirtschaftlichkeit der heimischen Glasherstellung im internationalen Wettbewerb.

Damit die Dekarbonisierung der Produktionsstätten trotz ökonomischer Herausforderungen in Gang kommt, sollte die Wettbewerbsfähigkeit für Unternehmen durch unterstützende Maßnahmen vom Staat gewährleistet werden. Ohne eine entsprechende Unterstützung wird es kurz- bis mittelfristig kein Business-Case für die Dekarbonisierung der deutschen Glasunternehmen geben. Die beiden folgenden Instrumente werden dabei als besonders geeignet betrachtet, um die finanziellen Belastungen der Unternehmen durch die Dekarbonisierung abzufedern.

Ohne eine entsprechende
Unterstützung wird es kurzbis mittelfristig kein
Business-Case für die
Dekarbonisierung der
Glasunternehmen geben.

7.3.1 Klimaschutzverträge - Carbon Contracts for Difference (CCfD)

Die anstehende Dekarbonisierung wird in der Glasindustrie hauptsächlich durch den Wechsel von Erdgas auf strom- und wasserstoffbasierte Schmelzwannen erfolgen.

Der Einsatz dieser relativ zum Erdgas teureren Energieträger führt zu einem deutlichen Anstieg der spezifischen Produktionskosten im Vergleich zu konventionellen Produktionsrouten, insbesondere in der Anfangsphase, wenn das Angebot an grünem Wasserstoff und Strom noch begrenzt ist. Diese erhöhten Produktionskosten können von den im internationalen Wettbewerb stehenden Unternehmen nicht im vollen Umfang an die Endkunden weitergegeben werden. Durch das Voranschreiten bei der Dekarbonisierung ergeben sich somit zunächst klare Wettbewerbsnachteile für die Unternehmen, die frühzeitig in CO₂-Minderungstechnologien investieren. Um diese zumindest anfängliche Benachteiligung der Unternehmen auszugleichen kann die Schließung der Kostenlücke durch Klimaschutzverträge (engl. Carbon Contracts for Difference (CCfD)) in zielführender Weise den Übergang unterstützen.

CCfDs sind projektspezifische Verträge, die zwischen einem Unternehmen und dem Staat geschlossen werden, um die anfallenden Mehrkosten durch den Betrieb von dekarbonisierten Produktionsrouten auszugleichen. Mit Hilfe der Verträge sollen die erhöhten Energiekosten durch den Einsatz von grünen Energieträgern und der daraus resultierende Kostennachteil verglichen mit konventionellen Konkurrenzprodukten kompensiert werden.

Durch das Schließen entsprechender Verträge zwischen der Bundesregierung und einzelnen Glasunternehmen könnte das wirtschaftliche Risiko durch eine Umstellung auf klimafreundliche Produktionsrouten für Unternehmen deutlich reduziert und die notwendige Planungssicherheit erhöht werden. Zudem könnte durch entsprechende Verträge die Implementierung klimaneutraler Technologien zeitlich vorgezogen werden und damit eine deutliche Emissionsminderung erzielt werden, auch bevor der Einsatz wirtschaftlich gleichwertig zu den konventionellen Technologien ist.

7.3.2 Investitionsförderung für die dekarbonisierte Glasproduktion

Der Einsatz von Dekarbonisierungsmaßnahmen führt nicht nur zu erhöhten Betriebskosten, sondern auch zu einer deutlichen Steigerung der Investitionsbedarfe.

Zum einen sind die innovativen Dekarbonisierungstechnologien aktuell noch deutlich teurer als die bereits etablierten konventionellen Technologien. Zum anderen führt der vollständige Umbau bestehender Produktionsanlagen und der Energieinfrastruktur zu kostenträchtigen Produktionsausfällen und Zusatzkosten für den Ausbau der werksinternen Energieinfrastrukturen und ihren Anschluss an die umliegenden Energienetze.

Zudem sind mit dem erstmaligen Einsatz neuer Technologien immer Risiken hinsichtlich der Umsetzung, der zeitlichen Abläufe beim Umbau und letztendlich auch der zu erreichenden Produktqualität verbunden. Dadurch fallen erhebliche Zusatzkosten und Zusatzrisiken bei der ersten Implementierung von Dekarbonisierungsmaßnahmen an. Dies stellt die teilweise als Familienbetriebe geführten Unternehmen der Glasindustrie vor große Belastungen, die durch die Zahlung

von Investitionszuschüssen für die Produktionsumstellungen zur Dekarbonisierung abgefedert werden sollten, um eine zügige Umsetzung der Vorhaben zu ermöglichen.

Gegenstand dieser Förderung sollte eine Anteilsfinanzierung zur Umrüstung und Umstellung der Energieversorgung und der Produktionsanlagen sein. Im Falle einer Elektrifizierung von konventionellen erdgasbetriebenen Schmelzwannen würde dies bspw. die erhöhten Kosten der vollelektrischen Schmelzwannen sowie die zusätzlichen Ausgaben für den Umbau der werksinternen Energieinfrastruktur und Anbindung an das Stromnetz umfassen. Besonders mittelständische Unternehmen stellen Investitionen in der erforder-

lichen Größenordnung vor große Probleme, die im Falle eines "stranded investments" das gesamte Unternehmen in seinem Bestand gefährden können. Die bereits existierenden Förderprogramme zur Unterstützung von CO2-Minderungstechnologien sollten verbreitert und hinsichtlich der Zugangshürden verbessert werden, um die Förderung nicht nur auf einzelne First-Mover zu beschränken, sondern den Einsatz der Dekarbonisierungsmaßnahmen flächendeckend zu fördern. Hierdurch könnten Investitionen in der gesamten Branche in CO2-neutrale Produktionsrouten und Technologien beschleunigt und damit ein wesentlicher Beitrag zu einer schnellen Minderung der CO2-Emissionen geleistet werden.

7.4 Stand der Umsetzung

Die Unternehmen der Glasindustrie nehmen die Herausforderung der Dekarbonisierung an und arbeiten an ihren individuellen Lösungsmöglichkeiten für die einzelnen Standorte.

Die durch den Ukraine-Krieg ausgelösten aktuellen Herausforderungen in der Gasversorgung ("Gasmangellage") und bei den Energiepreisen haben bei vielen Unternehmen Investitionen in fossile Backup-Technologien erforderlich gemacht. Gleichzeitig bereiten sich Unternehmen auf die nächsten Schritte der Transformation vor, zögern jedoch mit der Umsetzung von Projekten, da die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen zur Dekarbonisierung im aktuellen wirtschaftlichen Umfeld in den kommenden Jahren nicht gesehen wird. Aktuell richtet sich der Fokus bei der Förderung häufig auf die Unternehmen der Stahl-, Zementoder Chemieindustrie, aber auch die Glasindustrie könnte mit entsprechender Unterstützung einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele leisten, sofern sie eine vergleichbare Unter-stützung erhalten würde.

Die Glasindustrie könnte mit entsprechender Unterstützung einen großen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele leisten...

8 Literaturverzeichnis

Alois Kessler (2020): Vorlesung Energieeffizienz in der Industrie - Glasindustrie.

BMUV (2015): Klimakonferenz in Paris. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/themen/klimaschutz-anpassung/klimaschutz/inter- nationale-klimapolitik/pariser-abkommen.

British Glass (2021): Glass sector Net Zero Strategy 2050.

Bundesministerium der Justiz (2017): Verpackungsgesetz (VerpackG).

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Energiewende in der Industrie. Technologiesteckbrief Glasindustrie.

Bundesministerum der Justiz (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im- internet.de/.

Bundesnetzagentur (2021): Bericht zum Zustand und Ausbau der Verteilernetze 2020.

Bundesnetzagentur (2022): Bestätigung Netzentwicklungsplan 2021-2035.

Bundesverband Glasindustrie e.V. (2014): BV Glas-Stellungnahme zum BMUB-Entwurf des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess) II.

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt: Emissionshandelspflichtige Anlagen in Deutschland 2019 (Stand 04.05.2020).

Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im Umweltbundesamt (2020): Treibhausgasemissionen 2019. Emissionshandelspflichtige stationäre Anlagen und Luftverkehr in Deutschland (VET-Bericht 2019).

Fiehl, Marcel; Leicher, Jörg; Giese, Anne; Görner, Klaus; Fleischmann, Bernhard; Spielmann, Simone (2017): Biogas as a co-firing fuel in thermal processing industries: implementation in a glass melting furnace. In: *Energy Procedia* 120, S. 302–308. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.221.

Fleischmann, B. (2011): Welches Potential zur Energieeinsparung ist bei modernen Glasschmelzwannen noch vorhanden?

Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (2022): Wasserstoffnutzung in der Glasindustrie als Möglichkeit zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und des Einsatzes erneuerbarer Gase.

Glass International (2020): Sorg launches hybrid furnace for high tonnage glass manufacturing. Online verfügbar unter https://www.glass-international.com/news/sorg-launches-hybrid-furnace-for-high-tonnage-glass-manufacturing, zuletzt geprüft am 14.06.2022.

Institut für Fenstertechnik (2019): Recycling von Flachglas im Bauwesen. Analyse des Ist-Zustandes und Ableitung von Handlungsempfehlungen: Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Ansgar Rose und Norbert Sack. Rosenheim: ift Rosenheim (ift-Forschungsbericht).

International Energy Agency (2021): World Energy Outlook 2021.

Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (2022): PROSPECT – Treibhausgasarme Schmelztechnologie für pharmazeutisches Spezialglas. Hg. v. Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien. Online verfügbar unter https://www.klimaschutz-industrie.de/foerderung/projekte/schott-prospect/.

R. Stormont (2010): Electric Melting & Boosting for Glass Quality Improvement. In: Glass Worldwide.

Schaeffer, Helmut A.; Langfeld, Roland (2014): Werkstoff Glas. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Statistische Bundesamt (Destatis) (2022): Daten zur Energiepreisentwicklung - Lange Reihe.

Statistisches Bundesamt (Destatis): Kostenstruktur der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden - Fachserie 4 Reihe 4.3 - 2017.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2021): Jahreserhebung über die Energieverwendung im Verarbeitenden Gewerbe, im Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden 2020.

Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (2021): Branchenausblick 2030+. Die Glasindustrie. Berlin.

Trier, Wolfgang (1984): Glasschmelzöfen. Konstruktion und Betriebsverhalten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas e.V. (2021): Netzentwicklungsplan Gas 2020-2030.

World Resources Institute (2011): Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard. Supplement to the GHG protocol corporate accounting and reporting standard. Washington, DC: World Resources Institute [u.a.] (Greenhouse gas protocol).

Zier, Michael; Stenzel, Peter; Kotzur, Leander; Stolten, Detlef (2021): A review of decarbonization options for the glass industry. In: *Energy Conversion and Management:* X 10, S. 100083. DOI: 10.1016/j.ecmx.2021.100083.

9 Anhang

9.1 Beteiligung der Glasunternehmen an der Darstellung des Status Quo (Teilnahme an Fragebogen)

Branche	Anzahl Schmelzwannen	% an Gesamtanzahl	Produktionsmenge [t]	% an Gesamtmenge
Behälterglas	56	98	4.063.422	98
Flachglas	9	69	1.887.812	78
Spezial- und Gebrauchsglas	6	12	89.057	32

9.2 Prognostizierte Entwicklung der Energieträger und CO2-Zertifikate

Energieträger	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Erdgas	€/GJ	8,0	6,1	6,2	6,2	6,3	6,3
Erdgas (inkl. CO ₂ -Kosten)	€/GJ	9,5	9,1	10,4	11,9	13,3	14,7
Wasserstoff	€/GJ	130	115	101	81	64	60
Strom	€/GJ	24,4	26,1	30,4	32,4	33,8	29,98
CO ₂ -Zertifikate	€/t-CO ₂	26,6	51,3	75,9	100,6	125	150

Tabelle 17: Prognostizierte Entwicklung der Energieträgerpreise und CO2-Zertifikate

9.3 Entwicklung des Stromsektors bzw. CO₂-Emissionsfaktors für Strom

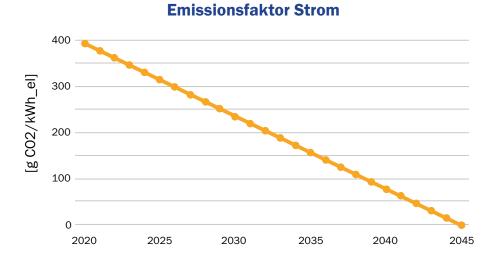


Abbildung 50: Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für Strom in Deutschland bis 2045