



**WASSERSTOFF
KOMPASS**

INDUSTRIEZWEIGE

Glasindustrie





WASSERSTOFF KOMPASS

ÜBERGREIFENDE ASPEKTE

- Regulatorischer Rahmen
- Zielgerichteter H₂-Einsatz
- Fachkräftesicherung
- Akzeptanz und Sicherheit
- Klima und Ressourcen

BEREITSTELLUNG

- H₂-Erzeugung
- H₂-Import
- Infrastruktur

INDUSTRIEZWEIGE

- Stahlindustrie
- Chemische Industrie
- Raffinerien
- Zementindustrie
- Glasindustrie**

MOBILITÄT UND TRANSPORT

- Kraftfahrzeuge
- Schifffahrt
- Luftverkehr
- Schienenverkehr

ENERGIEVERSORGUNG

- Gebäudewärme
- Prozesswärme
- Stromsystem

GLOSSAR

1 Generelle Aspekte der Glasindustrie

- Energiebedingte Emissionen dominieren
- Herstellung von Glas
- Treibhausgasemissionen
- Ökonomische Aspekte
- Versorgungssicherheit
- Endenergiebedarf

8 Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

- Wasserstoffanlieferung
- Wasserstoffproduktion vor Ort
- Anschluss an Gasverteilnetze mit Wasserstoff-Beimischung
- Materialanpassungen
- Wärmebereitstellung
- Verfahrenstechnische Anpassungen
- Reduktion der prozessbedingten Emissionen
- Begleitforschung

10 Handlungsoptionen

- Beimischung von Wasserstoff
- Verbrennung von einhundert Prozent Wasserstoff
- Synthetisches und biogenes Methan
- Hybride und superhybride Schmelzwannen
- Vollelektrische Schmelzwannen, Kühltöfen und Feeder
- Alternative Verfahren zur Glasherstellung auf Strombasis
- Weitere Brennstoffe

38 Literatur



Glasiindustrie

- › Einige wichtige Glasarten lassen sich nicht rein elektrisch schmelzen, sodass klimafreundliche Brennstoffe wie Wasserstoff für die Glasiindustrie unverzichtbar sein werden.
- › Für das Jahr 2045 wird primär eine Kombination aus vollelektrischen und Wasserstoff(-hybriden) Schmelzwannen erwartet. Die weiteren, heute fossil betriebenen Prozessschritte (Kühlofen und Feeder) werden zukünftig voraussichtlich elektrisch betrieben.
- › Schmelzwannen können nur ungefähr alle 15 Jahre im Rahmen einer Hauptreparatur auf einen anderen Energieträger umgebaut werden. Sind sie einmal auf einen Energieträger (zum Beispiel reinen Wasserstoff) eingerichtet, ist ein Wechsel zum ursprünglichen Energieträger (etwa Erdgas) nicht ohne Weiteres möglich.
- › Bei der Verwendung von Wasserstoff verändern sich die Glaseigenschaften.

Generelle Aspekte der Glasiindustrie

Glas findet als Werkstoff in vielen Bereichen Anwendung. Unterschieden wird zwischen Flachglas (Basisglas für Anwendungen wie zum Beispiel für Fenster oder Solarzellen), Behälterglas (etwa für Flaschen), Glasfasern (etwa für Glasfaserkabel oder Dämmstoffe wie Glaswolle) und Spezialglas (etwa für Laborbedarfe). Neben der Herstellung zählt zur Glasiindustrie ebenfalls die Verarbeitung von Basisglas zum Endprodukt – zum Beispiel die Verarbeitung von Flachglas zur Windschutzscheibe.^[1]

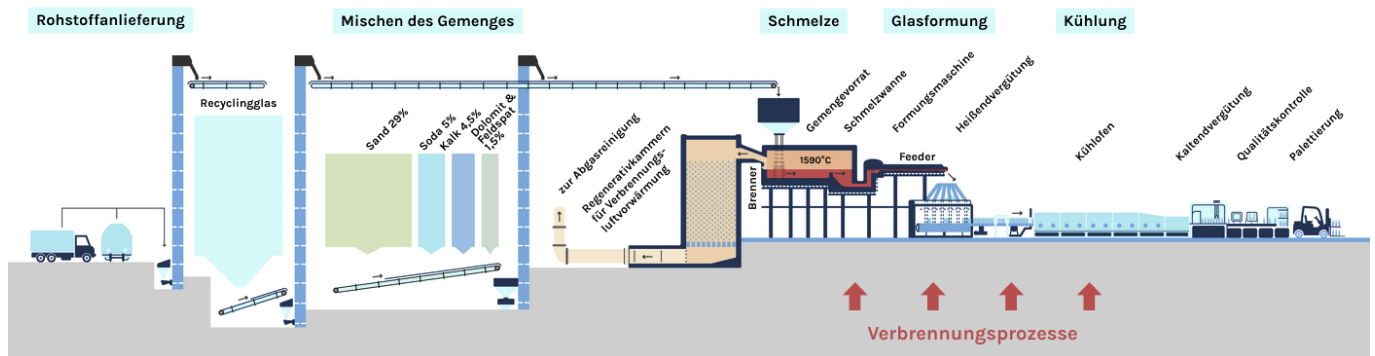
Energiebedingte Emissionen dominieren

Treibhausgasemissionen entstehen insbesondere bei der Erzeugung von Prozesswärme, heute weitestgehend durch die Verbrennung von fossilem Erdgas. Wasserstoff und seine Derivate, der Einsatz von Biogas aber insbesondere auch die Elektrifizierung der Wärmebereitstellung bieten ein großes Potenzial zur Defossilisierung der Glasindustrie. Rohstoffbedingte Emissionen insbesondere aus der Verarbeitung von Karbonaten (wie Soda, Kalk und Dolomit) gilt es zusätzlich durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden.

Herstellung von Glas

Trotz der sehr unterschiedlichen Produkte lassen sich sechs grobe Prozessschritte zur Herstellung von Glas benennen: Gemengebereitung, Schmelzen, Formgebung, Abkühlen und Entspannen, Veredlung sowie Verpackung.^[2] Eine genauere Aufgliederung der Prozessschritte wird in nachfolgender Abbildung am Beispiel von Behälterglas gezeigt.

Prozessschritte der
Behälterglasproduktion^[4]
© Bundesverband Glasindustrie e.V.

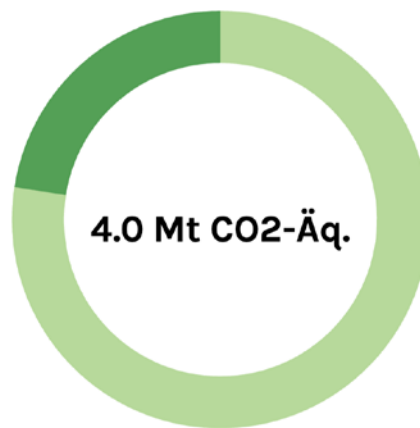


Die für die Glasproduktion verwendeten Schmelzwannen sind dabei zwischen 10 und 20 Jahre dauerhaft in Betrieb und können erst nach Ablauf dieser Zeit, in der sogenannten Hauptreparatur, auf einen anderen Energieträger umgerüstet werden. Die Umrüstungen können nicht im laufenden Betrieb durchgeführt werden (zum Beispiel Brenner mit angepasster Geometrie) und einmal umgerüstet, können die Änderungen an der Schmelzwanne auch erst in der nächsten Hauptreparatur umgekehrt werden. Ein Wechsel des Energieträgers ist somit auch erst wieder in der nächsten Hauptreparatur möglich.^{[2][4]} Dementsprechend muss die langfristige Versorgung mit dem jeweiligen Energieträger sichergestellt sein, da bei fehlender Energiezufuhr die Wanne Schaden nimmt und anschließend neu aufgebaut werden müsste, was bis zu 2 Jahre dauern und bis zu 50 Millionen Euro kosten kann.^[33]

Treibhausgasemissionen

Seit 2005 liegen die Scope 1-Treibhausgasemissionen konstant bei rund 4 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr,^{[9][11]} davon fallen 22,5 Prozent (0,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr) prozessbedingt und 77,5 Prozent (3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr) energiebedingt an.^[13]

Scope-1-Emissionen der deutschen Glasindustrie
nach prozess- und energiebedingten Emissionen



■ Energiebedingt
 ■ Prozessbedingt

Aktuell werden die Brenner in Schmelzwannen, Feeder und Kühlöfen (letztere zumindest in der Behälterglasindustrie) vorwiegend mit Erdgas betrieben. Um die aus dieser Verbrennung entstehenden Treibhausgasemissionen zu vermeiden, kann unter anderem Wasserstoff eingesetzt werden.^[4] Neben Wasserstoff können die fossilen Energieträger auch durch Elektrizität, synthetisches oder biogenes Methan oder andere Brennstoffe, wie zum Beispiel Biogas oder Ammoniak ersetzt werden.^{[5][6]} Diese Alternativen sowie die entsprechenden Technologien werden nachfolgend genauer beleuchtet. Allerdings wird keine der Möglichkeiten allein die Lösung zur Defossilisierung der Glasindustrie sein.

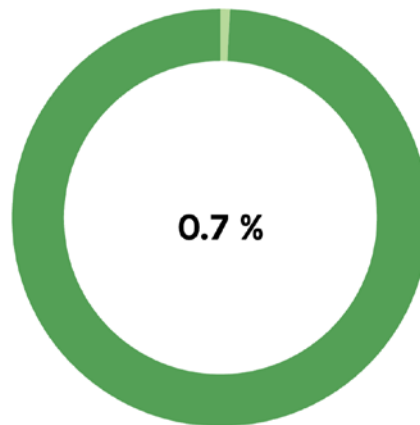
Die zweite große Treibhausgasquelle bei der Glasproduktion ist prozess- beziehungsweise materialbedingt. Glas wird aus natürlichen und naturidentischen Rohstoffen hergestellt, die in Deutschland gewonnen werden.^[4] Hierzu zählen im Allgemeinen Quarzsand, Soda, Kalk, Dolomit und Feldspat. Abhängig von der Glassorte können aber auch weitere Materialien wie Borate (insbesondere bei Spezialglas) zum Einsatz kommen.^{[4][7]} Bei der Glasschmelze entsteht aus den eingesetzten Karbonaten (Kalk, Dolomit, Soda) das jeweilige Oxid und CO₂. Diese prozessbedingten Emissionen lassen sich nicht durch den Ersatz von Erdgas vermeiden, sondern

- > durch eine Erhöhung des Anteils an Scherben,^{[5][6][7][8]}
- > den Einsatz von vorkalzinierten oder anderen CO₂-freien Rohstoffen^[9]
- > und durch Abscheidetechnologien für CO₂.^{[9][19]}

Die Scope 1- und Scope 2-Emissionen in der Glasherstellung belaufen sich auf ca. 5,8 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr.^[6]



Treibhausgasemissionen der Glasindustrie anteilig an den Gesamtemissionen



■ Glasindustrie (Scope 1 und Scope 2; 2019) ■ andere

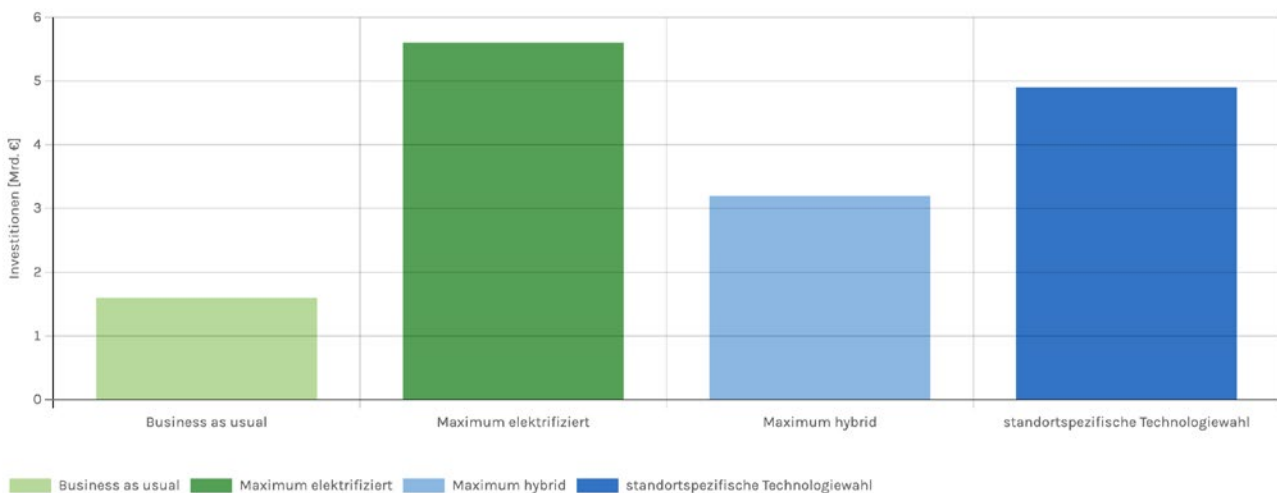
Ökonomische Aspekte

Die Glasindustrie nimmt mit ungefähr 400 Betrieben und circa 56.000 Beschäftigten eine wichtige Rolle unter den Industriebranchen Deutschlands ein.^{[1][9]} In Deutschland werden durchschnittlich rund 7,2 Millionen Tonnen pro Jahr^[10] verkaufsfertiges Glas produziert. Die Glasindustrie erwirtschaftet jährlich einen Umsatz von circa zehn Milliarden Euro^{[1][8][9]}. Die in Deutschland produzierten Mengen beziehungsweise der Umsatz machen circa zwanzig Prozent^[1] der europäischen Glasherstellung aus, sodass Deutschland im europäischen Vergleich die Spitzenposition in der Herstellung von Glas und Glaswaren (nach Umsatz) einnimmt. Gemessen am Umsatz werden durchschnittlich 53 Prozent^[10] der in Deutschland produzierten Glaswaren exportiert und 47 Prozent^[10] der in Deutschland verkauften Glaswaren (Inlandsverbrauch) importiert. Dieser Anteil unterscheidet sich je nach Produktklasse: So werden gemessen am jeweiligen Umsatz vergleichsweise wenig Behälterglas und unverarbeitetes Flachglas importiert (Anteil am Inlandsverbrauch jeweils circa 20 Prozent), während Glasfasern zu durchschnittlich 65 Prozent importiert werden. Gleichzeitig wird der Umsatz mit Glasfasern, Spezialgläser und sonstigem Hohlglas zu circa 60 Prozent im Ausland gemacht im Vergleich zu circa 40 Prozent bei Behälterglas und veredeltem Flachglas.^[10] Deutschlands wichtigste Handelspartner für den Export von Glas sind Frankreich (10,7 Prozent), die Niederlande (8,5 Prozent) und die USA (8,1 Prozent). Die wichtigsten Einfuhrländer sind China (10,8 Prozent), Polen (10,0 Prozent) und USA (8,6 Prozent).^[9]

Die Umrüstung der Glasindustrie bedarf in jedem Fall erheblicher Investitionen (zweistelliger Millionenbereich je Standort). Die kumulierten Investitionen für die deutsche Glasindustrie bis 2045 belaufen sich je nach Szenario auf 3,2 bis 5,6 Milliarden Euro. Die vier dargestellten Szenarien stammen aus der Roadmap des Projektes Glas 2045 <https://www.bvglas.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2738&token=d0e5fc3de0c90256568ee3a064ec4d470e41b500>. Beim Referenzszenario werden die Schmelzwannen auch weiterhin mit den aktuell genutzten Techno-logien betrieben. Beim Transformationspfad Elektrifizierung wird der Anteil des Stroms am Energiemix unter Berücksichtigung technischer

und ökonomischer Hemmnisse maximiert. Somit werden möglichst viele Schmelzwannen rein elektrisch oder mit einem hohen elektrischen Anteil beheizt. Beim Transformationspfad Wasserstoff wurde für jede Schmelzwanne bestimmt, ob und wann ein Anschluss an die Wasserstoffinfrastruktur jeweils wahrscheinlich ist. Zudem wurde an den Standorten, die wahrscheinlich angeschlossen werden, mit hybriden Schmelzwannen eine schrittweise Defossilisierung prognostiziert. Für Standorte, wo wahrscheinlich kein Anschluss an die Wasserstoffinfrastruktur gegeben ist, werden vollelektrische Schmelzwannen genutzt. Im letzteren Szenario wurde unter Berücksichtigung von technischen und ökonomischen Faktoren für jeden Standort separat entschieden, welches die geeignetste Technologie für die Defossilisierung ist.^[9]

Kumulierte Investitionen für verschiedene Szenarien zur Defossilisierung der Glasindustrie
in Milliarden Euro.^[9]



Durch die neuen Energieträger werden ebenfalls erhöhte Betriebskosten entstehen und auch jetzt entstehen durch die Abhängigkeit vom Erdgas und dessen Verteuerung schon zusätzliche Kosten. All diese Mehrkosten können aufgrund des internationalen Wettbewerbs nur selten an die Endabnehmer in Form einer Preiserhöhung weitergegeben werden, was die deutschen Glashersteller vor existenzielle Herausforderungen stellt.^[9]

Versorgungssicherheit

Glas ist ein bedeutender Werkstoff. Er wird in Gebäuden (Fenster, Glaswolle), als Behälter für Medikamente und Lebensmittel, für Displays und Infrastruktur (Glasfaserkabel) genutzt.^{[4][7]} Bei Nutzung als Dämmmaterial oder Fenster trägt Glas auch zur Einsparung von Heizenergie bei. Als Faustregel gilt zum Beispiel, dass moderne Isolierverglasungen (unter der Voraussetzung, dass auch der Rest des Hauses isoliert ist) die CO₂-Emissionen ihrer Herstellung nach 1 bis 2 Jahren wieder eingespart haben.^[8]

Da die Rohstoffe von Glas in Deutschland verfügbar sind, können bei heimischer Produktion Abhängigkeitsverhältnisse minimiert werden.^{[4][7]} Allerdings ist die Glasindustrie aktuell hochgradig abhängig vom Energieträger Erdgas. Diese



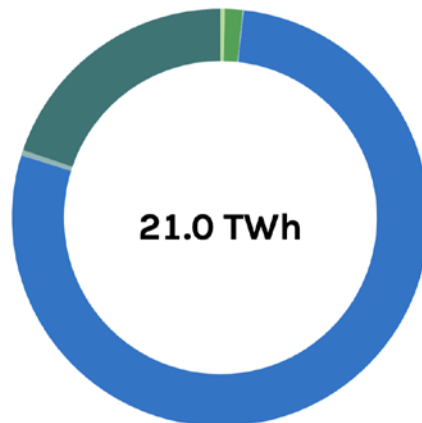
Abhängigkeit kann nur allmählich reduziert werden, indem die Schmelzwannen in ihrer jeweiligen Hauptreparatur auf andere Energieträger umgerüstet werden. Hinzu kommt, dass die Umsetzung der Umrüstung von der Entscheidungsphase bis zur Inbetriebnahme 5 bis 7 Jahre dauern kann. Es braucht also bald Entscheidungen von den Glasherstellern und somit Planungssicherheit für sie, um notwendige Umrüstungen für eine klimaneutrale Glasindustrie bis 2045 umsetzen zu können.^[9]

Die Glasindustrie braucht dabei auch eine Versorgungssicherheit mit Wasserstoff oder anderen Gasen, da die reine Elektrifizierung nicht für jeden Standort (abhängig von Größe und produzierter Glassorte) technisch umsetzbar ist.

Endenergiebedarf

Die Glasindustrie benötigt jährlich 21 Terawattstunden Energie.^[9]

Jährlicher Energiebedarf nach Energieträgern
in Terawattstunden (Daten von 2021).^[9]

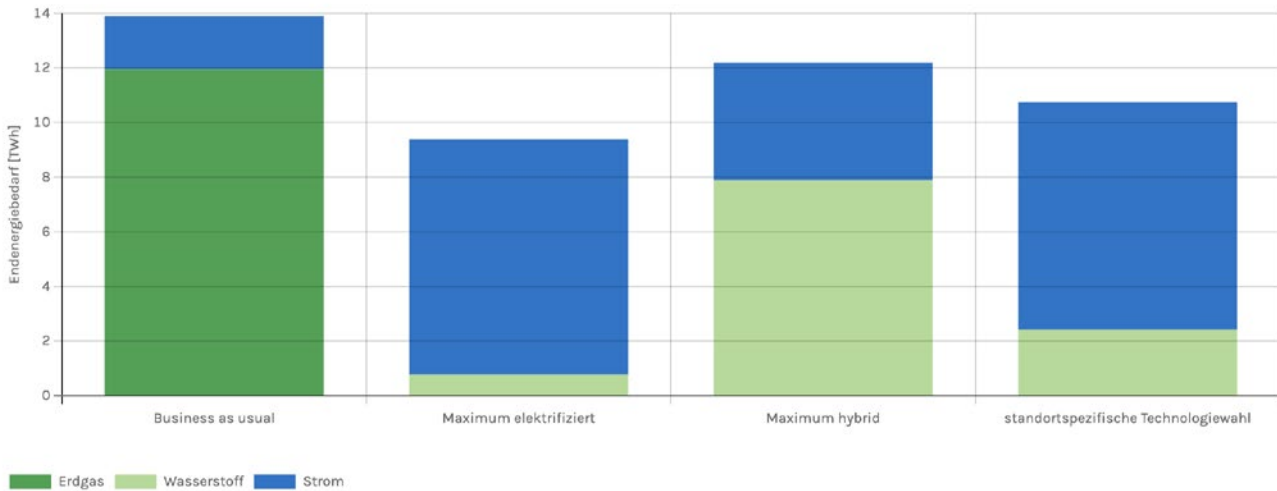


leichtes Heizöl schweres Heizöl Flüssiggas Erdgas (inkl. anderer Gase) Fernwärme Strom

Der Anteil an Heizöl nimmt seit Jahren ab, da mehr und mehr Schmelzwannen auf andere Energieträger, primär Erdgas, umgerüstet werden.^[6] Neben Erdgas machen andere fossile Brennstoffe, die in der Schmelzwanne eingesetzt werden, zusammen genommen nur 1,8 Prozent des Energiemix der Glasindustrie^[9] aus. Für diese ist bereits eine Umrüstung geplant.^[6] Dementsprechend wird hier primär auf die Umrüstung von erdgasbetriebenen Schmelzwannen eingegangen.

Da davon ausgegangen wird, dass zukünftig vermehrt auf die effizientere elektrische Energiezufuhr gesetzt wird, wird der Endenergiebedarf der Glasindustrie voraussichtlich abnehmen.

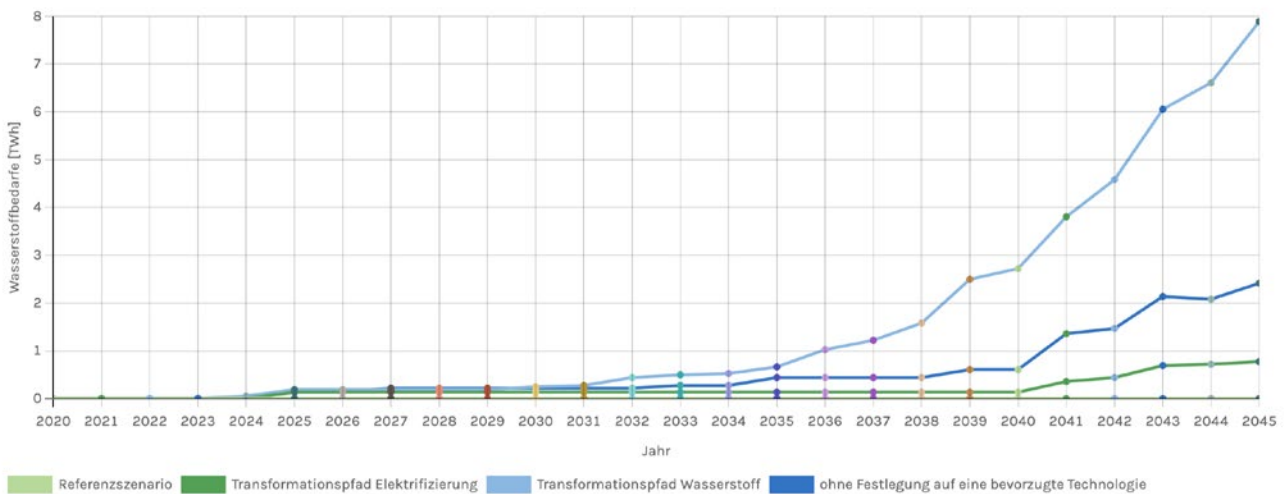
Endenergiebedarf für 2045 für verschiedene Szenarien zur Defossilisierung der Glasindustrie
in Terawattstunden.^[9]



Wasserstoffbedarfe

Die notwendigen Anpassungen zur Defossilisierung der Glasindustrie führen entsprechend der Roadmap von Glas 2045 <https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/glas-2045/> zu einem Anstieg des bisherigen, jährlichen Wasserstoffbedarfs von 5,83 Gigawattstunden (für den Floatprozess)^[6] auf voraussichtlich 0,8 bis 7,9 Terawattstunden im Jahr 2045^[9].

Zukünftige Entwicklung der Wasserstoffbedarfe
in Terawattstunden.^[9]



RELEVANTE PROJEKTE

- > Glas 2045^[9] ^[13]
<https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/glas-2045/>



Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Wasserstoffanlieferung

Rund um die Versorgung mit Wasserstoff und seinen Derivaten ergeben sich Fragestellungen, etwa zur benötigten Qualität und wie diese dauerhaft sichergestellt werden kann, aber auch zur Infrastrukturanbindung. Zusätzlich werden bei unsicherer Versorgungslage auch lokale Speichermöglichkeiten benötigt.

Wasserstoffproduktion vor Ort

Erfolgt die Wasserstoffherzeugung auf dem Werksgelände selbst, ergeben sich Fragen rund um die Systemintegration, zum Beispiel zur Bereitstellung von erneuerbarem Strom, Betriebsweisen von Elektrolyseuren, Sicherheit, Energie- und Wasserstoffspeicherung sowie bereitgestellter Reinheit.

Anschluss an Gasverteilnetze mit Wasserstoff-Beimischung

Bei Anschluss an ein Gasverteilnetz, bevor eine Umrüstung der Produktionsstätte erfolgen konnte, können maximal zehn Prozent beigemischt werden. Somit entstehen bei einem größeren Anteil in den Verteilnetzen Fragestellungen der Entmischung und wie die Entmischung in das lokale System der Glashütte integriert werden kann.

Materialanpassungen

- › Die Wasserstoffbeständigkeit aller Materialien und Komponenten muss gegeben sein.
- › Eine generelle Fragestellung der Glasindustrie ist die Entwicklung verschleißfester Feuerfestmaterialien. Bei Anwendung von Wasserstoff wird diese Fragestellung durch die Wechselwirkung des Wasserstoffs mit den Feuerfestmaterialien noch einmal stärker in den Vordergrund gerückt. Aber auch bei der Nutzung vollelektrischer Schmelzwannen ergeben sich hier Forschungs- und Entwicklungsbedarfe durch eine punktuell stärkere Belastung der Materialien.

Wärmebereitstellung

- › Eine Weiterentwicklung der Wasserstoffbrenner muss erfolgen. Um eine optimale Wärmeverteilung zu gewährleisten, muss unter anderem die Brennergeometrie angepasst werden. Die Anforderungen an die Brenner sind unterschiedlich, je nachdem, ob sie in der Schmelzwanne oder im Feeder verwendet werden, ob der Brennstoff konventionell mit Luft oder mit reinem Sauerstoff verbrannt wird. Werden die Brenner weiterhin mit Luft betrieben, muss zum Beispiel auch eine Möglichkeit zur Reduktion der NO_x gefunden werden.
- › Auch für andere Brennstoffe, wie zum Beispiel Ammoniak sind Anpassungen der Brenner notwendig und diese angepassten Brenner müssen für die Industrie verfügbar sein. Bei Ammoniak stellen die entstehenden NO_x-Gase eine besondere Herausforderung dar.
- › Um den Wärmeübergang von der Flamme in die Schmelze zu verbessern, wird an radikal neuen Schmelzkonzepten geforscht.
- › Für das elektrische Schmelzen müssen Möglichkeiten für die Hochskalierung gefunden werden. Dies bedarf vor allem der Erforschung und Weiterentwicklung neuer Geometrien für vollelektrische Schmelzwannen im industriellen Maßstab.

Verfahrenstechnische Anpassungen

- › Die bei der Verwendung von Wasserstoff veränderten Glaseigenschaften müssen weiter untersucht werden. Eine wichtige Frage wird sein, wie die Glaszusammensetzung geändert werden muss, um die gewünschten Eigenschaften weiterhin zu erreichen.
- › Generell müssen veränderte Strömungsverhalten und Anpassungen der Mess-Steuer-Regel-Technik untersucht werden.
- › Aktuell werden die heißen Abgase zur Vorwärmung der Gase für die Verbrennung beziehungsweise der eingespeisten Materialien für das Glas und für den Betrieb der nachgeschalteten Kühltöfen genutzt. Die Auswirkungen auf eine veränderte (zum Beispiel beim Wasserstoff) oder eine reduzierte (zum Beispiel hybride Schmelzwannen) Wärmerückgewinnung müssen untersucht werden und die Systeme angepasst werden.

Reduktion der prozessbedingten Emissionen

- › Werden CO₂-Abscheidetechnologien genutzt, um die CO₂-Emissionen weiter zu reduzieren, muss die jeweilige Technologie ins Glaswerk integriert werden. Hinzu kommt die Frage, inwieweit das abgeschiedene CO₂ als synthetisches Methan im Kreis geführt werden kann und wie die dafür benötigten Prozesse in die Glashütte integriert werden können.
- › Für die Nutzung von CO₂-freien Rohstoffen wie zum Beispiel Natronlauge als Ersatz für die Karbonate (Soda, Kalk und Dolomit) müssen Fragen der Verfügbarkeit und der Auswirkungen auf den Prozess geklärt werden.
- › Um den Scherbenanteil weiter zu erhöhen, müssen weitreichende Sammel- und Sortiersysteme für die verschiedenen Glassorten etabliert werden.

Begleitforschung

Neben den hier genannten Forschungsbedarfen könnten weitere Fragestellungen aufkommen, etwa zu sozialer Akzeptanz, Auswirkungen bei Abwanderung beziehungsweise Auslagerung von Teilschritten. Auch weiterführende ökonomische und ökologische Analysen können notwendig sein.

Handlungsoptionen

Beimischung von Wasserstoff

Wasserstoff kann der bestehenden Erdgasversorgung beigemischt werden. Bei Nutzung der bestehenden Brenner in Schmelzwannen, Feedern und Kühlöfen können laut Betreibern aber maximal 10 Volumenprozent H₂ für Schmelzwannen und Feeder beziehungsweise 40 Volumenprozent für Kühlöfen beigemischt werden. Sollen höhere H₂-Anteile beigemischt werden, bedarf es einer aufwendigeren Umrüstung, die nur in der ungefähr alle 15 Jahre stattfindenden Hauptreparatur möglich ist. Wird also in einem Erdgasverteilnetz eine höhere Beimischung vorgenommen, bevor die angeschlossenen Glashütten umgestellt werden konnten, müssen die Glashütten zusätzlich eine Entmischung vornehmen.^[4]

Für die Herstellung von Glas im Oxy-Fuel-Prozess konnten auch für H₂-Beimischungen von bis zu 35 Volumenprozent (in den Schmelzwannen) schon Gläser mit guter Qualität erreicht werden. Auf diese Weise wird auch der bei der Elektrolyse entstehende Sauerstoff direkt verwertet, was wiederum NO_x-Emissionen reduziert, die sonst bei der Verbrennung des Wasserstoffs in größeren Mengen entstehen.^[4]

Die Verwendung von Wasserstoff verändert die Flamme und somit auch der Wärmeverteilung. Außerdem verändert sich die Gaszusammensetzung: Der Wasserstoff- und der Wasseranteil sind höher. All dies führt zu Veränderungen in den Glaseigenschaften und auch zu einer stärkeren Belastung der Feuerfestmaterialien.^{[4][15]}

Voraussetzungen

- › Ausreichend Wasserstoff muss für den dauerhaften Betrieb mit dem jeweiligen Anteil bereitgestellt werden, um die Beimischung konstant zu halten.
- › Glaswerke müssen an die Wasserstoffinfrastruktur angeschlossen werden oder ausreichend große Elektrolyseure und Speichermöglichkeiten vor Ort haben.
- › Wasserstofftaugliche Gasverteilssysteme und Leitungen in und zur Glashütte sind erforderlich (keine Wasserstoffversprödung).



Vorteile

- › Es sind keine beziehungsweise lediglich kleinere Umrüstungen notwendig für geringe Beimischungsquoten bis zu 10 Volumenprozent (Schmelzwanne und Feeder) beziehungsweise 40 Volumenprozent (Kühlofen).^[4]
- › Anlagen können frühzeitig an eine Wasserstoffinfrastruktur angeschlossen werden und als Abnehmer fungieren, auch wenn die vollständige Umstellung auf Wasserstoff und die damit verbundene Umrüstung erst in der Hauptreparatur möglich ist.
- › Bereits mit kleineren Umrüstungen während des Betriebs können Treibhausgasemissionen eingespart werden.

Nachteile

- › Ab Beimischungsquoten von mehr als 10 beziehungsweise 40 Volumenprozent sind teils aufwendige Umrüstungen notwendig, die nicht im laufenden Betrieb und somit nur während der Hauptreparatur erfolgen können.
- › Keine vollständige Vermeidung der energiebedingten Treibhausgasemissionen.
- › Es wird weiterhin ein Anteil an Erdgas benötigt.

Folgen

- › Anlagen, die frühzeitig an eine Wasserstoffinfrastruktur angeschlossen werden, können sofort einen Anteil des Erdgases ersetzen. Die Wasserstoffbedarfe und Treibhausgaseinsparungen sind vorerst vergleichsweise gering und steigen erst nach einer Umrüstung.
- › Durch die Nutzung von Wasserstoff können die Glaseigenschaften, wie zum Beispiel die Farbe, die Menge an Blasen im Glas oder die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen beeinflusst werden. Um diese Eigenschaftsveränderung zu kompensieren, wird es voraussichtlich Anpassungen in der Glaszusammensetzung geben.^[3]

Ökonomische Aspekte

Bei geringeren Beimischungsquoten ist eine Verwendung von Wasserstoff direkt möglich, ohne zusätzlichen Investitionsbedarf. Allerdings wird erneuerbarer beziehungsweise CO₂-armer Wasserstoff zunächst deutlich teurer als Erdgas sein, sodass die laufenden Kosten kurzfristig steigen werden. Wird dem Erdgasverteilnetz, an dem das Glaswerk angeschlossen ist, bereits ein höherer Volumenanteil Wasserstoff beigemischt, bevor die Anlagen in der Hauptreparatur umgerüstet wurden, kann eine Entmischung notwendig werden, die wiederum Kosten verursacht und zusätzliche Energie benötigt.

Bei höheren Beimischungsquoten sind Umrüstungen und somit Investitionen notwendig, was allerdings erst in der Hauptreparatur möglich ist. Bei höheren Anteilen des kurzfristig teureren Wasserstoffes steigen auch die Produktionskosten des Glases.

Die so entstehenden betrieblichen Mehrkosten können auch zu erhöhten Preisen für die Endverbraucher führen. Dies wäre aber ein Nachteil für den internationalen Wettbewerb.^[9]

Versorgungssicherheit

Wenn eine Produktionsstätte nicht ausreichend Wasserstoff erhält, kann bei ohnehin geringen Beimischungsraten problemlos zu einem Betrieb ohne Wasserstoff zurückgekehrt werden. Bereits umgerüstete Betriebe können dies nicht ohne Weiteres. Da für einen Betrieb mit mehr Erdgas die Anlage in den Zustand vor der Umrüstung zurückversetzt werden müsste, was nur in der Hauptreparatur geht, verlieren diese Betriebe ihre Investition und können erst in bis zu zwei Jahren die Schmelzwanne wieder in Betrieb nehmen, nachdem erneute Investitionen zur Reparatur der Wanne getätigt wurden.

Die Glashütten wären zusätzliche relevante Wasserstoffabnehmer und eine dauerhafte Versorgung mit Wasserstoff müsste gewährleistet sein.

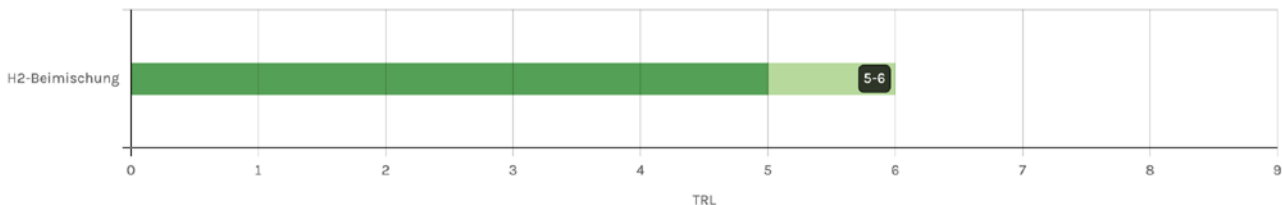
Akteur*innen

> Glashütten

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für die H₂-Beimischung in der Glasherstellung liegt aktuell bei 5-6.^{[3][14][15][16][17]}



Endenergiebedarf

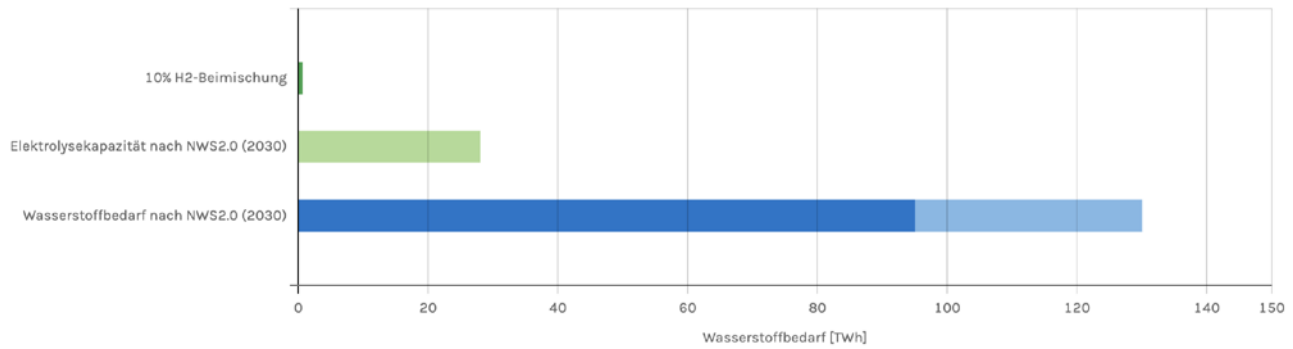
Durch die Wasserstoffbeimischung verändert sich der Energiebedarf der Anlagen nur marginal, es wird nur ein größerer Anteil der für die Glasproduktion benötigten Energie durch Wasserstoff statt Erdgas gedeckt.^[9] Für die Wasserstoffproduktion wird aber wiederum zusätzliche Energie benötigt.

Wasserstoffbedarfe

Die Bedarfe an Wasserstoff sind abhängig von der Zumischungsrate. Werden 10 Volumenprozent Wasserstoff zum Erdgas zugemischt, müssen, bezogen auf den Brennstoffverbrauch der Glasindustrie von 2021^[9], 0,59 Terawattstunden pro Jahr durch Wasserstoff gedeckt werden. Dies entspricht 15.000 Tonnen H₂ pro Jahr.

Wasserstoffbedarf für die Beimischung zum Erdgas für die Glasindustrie

Werden die fossilbasierten Brennstoffe in der Glasindustrie zu 10 Prozent durch H₂ ersetzt, werden 0,59 Terawattstunden Wasserstoff benötigt.



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > Kopernikus P2X^{[14][15]}
https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news/glaserstellung_mit_guenem_wasserstoff_erstmalig_erfolgreich_getestet
- > HyGlass^{[3][4]}
<https://www.energy4climate.nrw/themen/best-practice/hyglass>

Minderungspotential

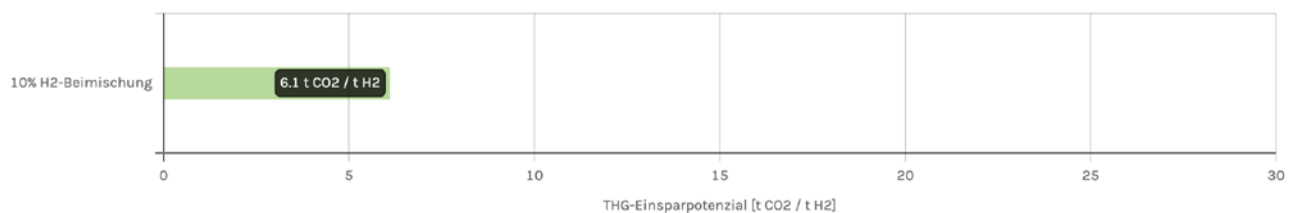
Die verbleibenden Treibhausgasemissionen sind abhängig von dem Anteil an Wasserstoff, der zugemischt wird. Für eine Beimischung von zehn Prozent erneuerbaren Wasserstoff können 99.000 Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden.^[4]

Die 0,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente prozessbedingter Emissionen pro Jahr verbleiben und leisten keinen Beitrag zu den Treibhausgaseinsparungen.

Werden diese Treibhausgaseinsparungen und der Wasserstoffbedarf für eine Beimischung von zehn Volumenprozent zur Berechnung des Minderungspotentials verwendet, ergibt sich ein Minderungspotenzial von 6,1 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Tonne Wasserstoff. Dabei muss aber beachtet werden, dass die zugrunde liegenden Zahlen für die Treibhausgaseinsparung sich auf eine Behälterglas-schmelzwanne im Labormaßstab, die Methan statt Erdgas verbrennt, beziehen.^[4]

Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Durch den Ersatz von Methan durch H₂ im Brennstoff können 6,1 t CO₂-Äq. / t H₂ eingespart werden.





MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Unterstützter Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur

Die staatliche Unterstützung und Lenkung des Infrastrukturausbaus gibt potenziellen Abnehmern von H₂ wie Glasherstellern die Sicherheit, dass sie den H₂ werden erhalten können.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



> Unter den Stakeholder*innen herrschte weitestgehend Konsens, dass der Infrastrukturausbau, insbesondere der Bau von H₂-Pipelinenetzen, staatlich unterstützt werden sollte.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen

MASSNAHME

> Steigerung der Nachfrage

Alternative Prozesse sind gegenüber konventionellen Verfahren oftmals wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig. Durch eine staatlich angereizte Steigerung der Nachfrage kann dennoch ein Absatzmarkt für alternativ erzeugte Produkte generiert werden. Für die Reduktion von Treibhausgasemission in der Glasindustrie eignet sich beispielsweise eine Förderung der Investitionskosten.

MASSNAHME

> CO₂-Preis in Form der EU ETS

Im Rahmen des Europäischen Emissionshandels (EU ETS) müssen die Emissionen bis 2030 um 62 Prozent gegenüber 2005 sinken.^[36] Somit wird der CO₂-Preis steigen und Glashersteller werden ein Zeichen erhalten, dass der Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine wirtschaftlich immer größere Bedeutung zukommt. Allerdings ist es nicht bekannt, ab wann der CO₂-Preis tatsächlich eine Lenkungswirkung in der Glasindustrie entfalten wird.^[37]

Verbrennung von einhundert Prozent Wasserstoff

Traditionell fossil beheizte Schmelzwannen, Feeder und Kühlöfen können theoretisch auch mit einhundert Prozent Wasserstoff betrieben werden, wenn die Geräte entsprechend umgerüstet werden.^[4]

Allerdings ist der Betrieb mit Wasserstoff noch nicht ausgereift und verschiedene Hürden sind noch zu überwinden. Zum einen werden durch den erhöhten Anteil an Wasserstoff und Wasserdampf die Glaseigenschaften und somit auch die Qualität negativ beeinflusst. Zum anderen werden durch den höheren Wasserstoffanteil die Feuerfestmaterialien stärker beeinflusst. Zu diesen Punkten braucht es weitere Forschung, aber die bisherigen Ergebnisse deuten darauf hin, dass dieses Hindernis überwunden werden kann.^{[4][14][15]} Zum anderen hat Wasserstoff auch andere Flammencharakteristika als das aktuell verwendete Erdgas, was zum Beispiel Anpassungen der Brennergeometrien erfordert.^{[4][17]} Auch entstehen durch die höheren Flammtemperaturen bei der Wasserstoffverbrennung mehr Stickoxide. Um dies zu vermeiden, wird diese Verbrennung häufig als Oxy-Fuel-Prozess betrieben.^{[4][15]}

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



› Laut einigen Stakeholder*innen ist der Einsatz von reinen Wasserstoff-Schmelzwannen fraglich. Grund hierfür ist die Unsicherheit, ob eine ausreichende und konstante Verfügbarkeit über ein flächendeckendes Wasserstoffnetz zu bezahlbaren Kosten gegeben sein wird. Zudem besteht auch Unsicherheit, inwiefern die Glaswerke beim Anschluss an die Wasserstoffinfrastruktur hinter anderen Industrieanlagen zurücktreten muss.^{[6][9]}

Voraussetzungen

- › Ausreichend Wasserstoff muss für den dauerhaften Betrieb bereitgestellt werden.
- › Glaswerke müssen an die Wasserstoffinfrastruktur angeschlossen werden oder ausreichend große Elektrolyseure und Speichermöglichkeiten vor Ort haben.
- › Wasserstofftaugliche Gasverteilssysteme und Leitungen in und zur Glashütte sind erforderlich.
- › Neues Equipment, also zum Beispiel angepasste Brenner oder Feuerfestmaterialien in der Schmelzwanne müssen vorhanden sein.^{[4][9]}
- › Die Zusammensetzung muss so weit angepasst werden, dass die erforderlich Glasqualität trotz Wasserstoffverbrennung gegeben ist.



Vorteile

- › Es werden nur kleinere Umrüstungen benötigt, die in der Hauptreparatur erledigt werden können und dadurch im Vergleich zu anderen Umrüstungen auf zum Beispiel elektrische Schmelzwannen geringere Investitionskosten erfordern.^{[5][9]}
- › Kann prinzipiell für jede Glasart angewendet werden.
- › Im Vergleich zu synthetischem Methan ist der Primärenergiebedarf kleiner, da weniger verlustbehaftete Umwandlungsschritte notwendig sind.
- › Es entstehen keinerlei energiebedingte CO₂-Emissionen.

Nachteile

- › Direktelektrifizierung ist effizienter im Vergleich zum Einsatz von Wasserstoff.^[5]
- › Bei Unterbrechung der Wasserstoffversorgung und notwendigem Abbruch des Dauerbetriebs entstehen große Schäden an der Schmelzwanne.

Folgen

- › Durch die Nutzung von Wasserstoff können die Glaseigenschaften, wie zum Beispiel die Farbe, die Menge an Blasen im Glas oder die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen beeinflusst werden. Um diese Eigenschaftsveränderung zu kompensieren, wird es voraussichtlich Anpassungen in der Glaszusammensetzung geben.^[3]

Ökonomische Aspekte

Für den Betrieb mit Wasserstoff sind Investitionen in Umrüstungen notwendig. Diese fallen mittelfristig geringer aus als für Umrüstungen zu vollelektrischen oder hybriden Schmelzwannen, aber höher als für den Wechsel auf synthetisches Methan, wobei die Umrüstungen gänzlich entfallen und nur die regulären Reparaturkosten entstehen.^[9]

Bei Umstellung auf einhundert Prozent Wasserstoff liegen die Betriebskosten der Schmelzwannen zwischen denen von vollelektrischen Schmelzwannen (niedriger) und denen, die mit synthetischem Methan (höher) betrieben werden. Es wird erwartet, dass der Preis für Wasserstoff in den nächsten Jahrzehnten zwar sinkt, aber 2045 mit circa 0,2 Euro pro Kilowattstunde^[9] noch ungefähr doppelt so hoch sein wird wie der Strompreis^[9] und ungefähr zehnmal so hoch wie der Erdgaspreis (wobei im Rahmen der Erfassung der Datenlage der Ukrainekrieg nicht mitberücksichtigt wurde). In jedem Fall sind die Kosten für die Glaswerke mittelfristig höher als aktuell.

Die so entstehenden betrieblichen Mehrkosten können auch zu erhöhten Preisen für die Endverbraucher führen. Dies wäre aber ein Nachteil für den internationalen Wettbewerb.^[9]

Versorgungssicherheit

Wenn eine Produktionsstätte nicht ausreichend Wasserstoff erhält, kann erst in der nächsten Hauptreparatur die Anlage auf einen anderen Energieträger umgestellt werden. Anlagen, die nicht dauerhaft betrieben werden können, nehmen Schaden und sind daher eine Fehlinvestition. Für die erforderlichen Genehmigungsverfahren und den Ersatz der kaputten Materialien können bis zu zwei Jahre bis zur Wiederinbetriebnahme der Schmelzwanne vergehen.^[33] Es bedarf also einer konstanten Versorgung mit Wasserstoff, wenn ein Glaswerk auf Wasserstoff umgestellt wurde.

Die Glashütten wären zusätzliche relevante Wasserstoffabnehmer und eine dauerhafte Versorgung mit Wasserstoff müsste gewährleistet sein.

Akteur*innen

- > Glashütten
- > Zulieferer für Brenner und anderes Equipment
- > Gasverteilnetzbetreiber

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von 100 Prozent H₂ als Brennstoff in der Glasherstellung liegt aktuell bei 5.^{[5][6]}



Endenergiebedarf

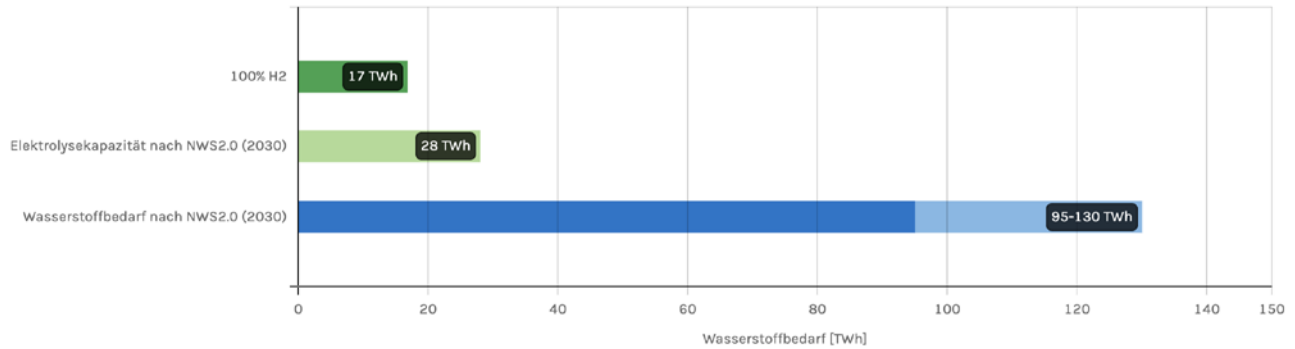
Durch die Nutzung von Wasserstoff verändert sich der Energiebedarf der Anlagen nur marginal, es wird nur der bisher durch fossile Brennstoffe gedeckte Anteil (16,8 Terawattstunden) der für die Glasproduktion benötigten Energie (21 Terawattstunden) durch Wasserstoff gedeckt.^[9] Bei der Wasserstoffproduktion entsteht wiederum ein zusätzlicher Primärenergiebedarf.

Wasserstoffbedarfe

Im angenommenen Extremfall, dass alle bisher fossil betriebenen Anlagen mit erneuerbarem Wasserstoff betrieben würden, müssten 16,8 Terawattstunden pro Jahr^[9] durch Wasserstoff gedeckt werden. In Summe entspricht das 507.000 Tonnen H₂/a bezogen auf den Heizwert von Wasserstoff.

Wasserstoffbedarf

Werden die fossilbasierten Brennstoffe in der Glasindustrie vollständig durch H₂ ersetzt, werden 16,8 Terawattstunden Wasserstoff benötigt.



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

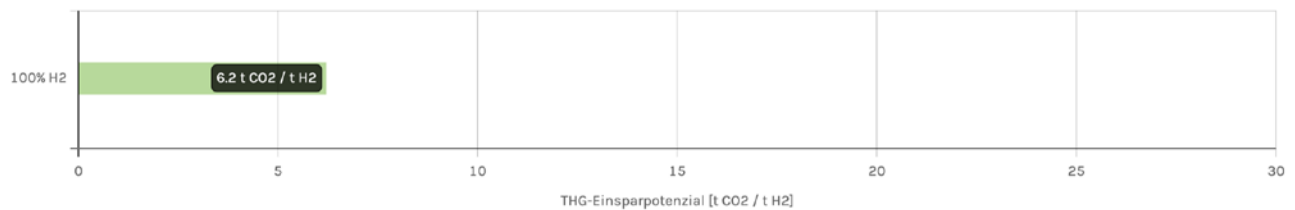
- > Kopernikus P2X ^{[14][15]}
https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news/glasherstellung_mit_guenem_wasserstoff_erstmalig_erfolgreich_getestet
- > HyGlass ^{[3][4]}
<https://www.energy4climate.nrw/themen/best-practice/hyglass>

Minderungspotential

Wird angenommen, dass alle bisher fossil betriebenen Schmelzwannen durch erneuerbaren Wasserstoff betrieben würden, entstünden nur noch die prozessbedingten Emissionen (0,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr)^[13]. Dementsprechend würden 3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr eingespart. Dies entspricht einem Minderungspotenzial von 6,2 Tonnen CO₂-Äquivalenten pro Tonne Wasserstoff.

Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Durch den Ersatz von Methan durch H₂ im Brennstoff können 6,2 t CO₂-Äq. / t H₂ eingespart werden.





MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Unterstützter Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur

Die staatliche Unterstützung und Lenkung des Infrastrukturausbaus gibt potenziellen Abnehmern von H₂ wie Glasherstellern die Sicherheit, dass sie den H₂ für die Umstellung ihrer Prozesse werden erhalten können.



STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

> Unter den Stakeholder*innen herrschte weitestgehend Konsens, dass der Infrastrukturausbau, insbesondere der Bau von H₂-Pipelinennetzen, staatlich unterstützt werden sollte.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen

MASSNAHME

> Steigerung der Nachfrage

Alternative Prozesse sind gegenüber konventionellen Verfahren oftmals wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig. Durch eine staatlich angereizte Steigerung der Nachfrage kann dennoch ein Absatzmarkt für alternativ erzeugte Produkte generiert werden. Für die Reduktion von Treibhausgasemission in der Glasindustrie eignet sich beispielsweise eine Förderung der Investitions- und Betriebskosten per Klimaschutzvertrag (CCfD).

MASSNAHME

> CO₂-Preis in Form der EU ETS

Im Rahmen des Europäischen Emissionshandels (EU ETS) müssen die Emissionen bis 2030 um 62 Prozent gegenüber 2005 sinken.^[36] Somit wird der CO₂-Preis steigen und Glashersteller erhalten ein Zeichen, dass eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen immer wirtschaftlich bedeutsamer wird. Allerdings ist es nicht bekannt, ab wann der CO₂-Preis tatsächlich eine Lenkungswirkung in der Glasindustrie entfalten wird.^[37]



Synthetisches und biogenes Methan

Anstelle von H₂ beziehungsweise dem bisher genutzten Erdgas kann auch Methan für die Wärmebereitstellung bei der Glasproduktion genutzt werden. Dieses kann aus Biogas gewonnen oder synthetisch aus CO₂ und H₂ erzeugt werden.^[5] Wenn das CO₂, das bei der Glasherstellung energie- und prozessbedingt entsteht, abgeschieden wird, kann synthetisches Methan auch direkt vor Ort mit dorthin transportiertem beziehungsweise dort produziertem H₂ hergestellt werden.^{[5][19]}

Voraussetzungen

- › Große Mengen an erneuerbaren Ressourcen (biogene Rohstoffe für die Erzeugung von Biomethan, erneuerbare Energien und entsprechende Mengen an Wasserstoff und CO₂ für synthetisches Methan) werden benötigt.
- › Wenn das bei der Glasherstellung anfallende CO₂ direkt genutzt wird, braucht es H₂ und Anlagen zur Methanisierung direkt am Ort der Glasproduktion.

Vorteile

- › Es sind keine Umrüstungen an konventionellen Glasanlagen notwendig und dementsprechend werden keine zusätzlichen Investitionen für die Glasanlagen benötigt.
- › Wenn das CO₂ direkt genutzt wird, gibt es keinen Unterschied zwischen prozessbedingten und energiebedingten Emissionen. Somit können mehr Treibhausgasemissionen vermieden werden als durch den reinen Ersatz des Erdgases durch einen Energieträger, der keine Treibhausgasemissionen verursacht. Durch CO₂-Abscheidung und Methanisierung wird ein Großteil des Kohlenstoffs im Kreis geführt. Dies ist aber sehr energieaufwendig.
- › Methanüberschüsse, die bei der Produktion im Glaswerk entstehen, können an umliegendes produzierendes Gewerbe verkauft werden.^[9]
- › Synthetisches und biogenes Methan ermöglichen den Betrieb der Anlage bis zur nächsten Hauptreparatur ohne fossile Brennstoffe.

Nachteile

- › Durch Wirkungsgradverluste ist die Herstellung synthetischen Methans energieintensiv und teuer.^[5] Durch die Methanisierung (Wirkungsgrad 80 Prozent) verringert sich der Gesamtwirkungsgrad von 70 Prozent bei grünem Wasserstoff auf 56 Prozent für synthetisches Methan.^[35] Durch weitere Wärmeverluste im Schmelzprozess entsteht in beiden Fällen ein weiterer Wirkungsgradverlust.^[35]
- › Bei biogenem Methan werden große Flächen zum Anbau der Biomasse benötigt, was unter anderem in Konkurrenz zur Lebensmittelerzeugung stehen könnte.



Folgen

- › Im Vergleich mit anderen Optionen zur Defossilisierung der Glasindustrie entstehen hohe H₂ und Primärenergiebedarfe.
- › Es besteht die Gefahr, sich hier auf eine Technologie festzulegen, bei der die Versorgungssicherheit mit den erneuerbaren Rohstoffen nicht sichergestellt ist, die aber die Möglichkeit bietet, im Zweifel zum fossilen Rohstoff zurückwechseln zu können, was eine längere Nutzung fossiler Rohstoffe bedeuten würde.

Ökonomische Aspekte

Die Investitionskosten für das Glaswerk selbst sind geringer als bei anderen Möglichkeiten zur Defossilisierung der Glasindustrie, da die konventionellen Schmelzwannen weiter genutzt werden könnten. Bis zum Jahr 2045 wären ohne Technologieumstellungen kumulierte Investitionen von circa 1,6 Milliarden Euro für die gesamte deutsche Glasindustrie zu erwarten.^[9]

Synthetisches Methan weist aktuell und laut verschiedener Prognosen auch in Zukunft deutlich höhere Kosten auf als vergleichbare fossile Energieträger.^{[20][21]} Die Kosten sind aufgrund der zusätzlichen Umwandschritte und der damit einhergehenden Verluste für synthetisches Methan auch höher als für Wasserstoff oder Strom.

Die so entstehenden betrieblichen Mehrkosten können auch zu erhöhten Preisen für die Endverbraucher führen. Dies wäre aber ein Nachteil für den internationalen Wettbewerb.^[9]

Versorgungssicherheit

Wenn eine Produktionsstätte nicht ausreichend mit synthetischem, biogenem oder fossilem Methan (Erdgas) beliefert wird, kann erst in der nächsten Hauptreparatur die Anlage auf einen anderen Energieträger umgestellt werden. Anlagen, die nicht dauerhaft betrieben werden können, nehmen Schaden und sind daher eine Fehlinvestition. Für die erforderlichen Genehmigungsverfahren und den Ersatz defekter Bauteile können bis zu zwei Jahre bis zur Wiederinbetriebnahme der Schmelzwanne vergehen.^[33] Es bedarf also einer konstanten Versorgung mit Methan beziehungsweise Erdgas.

Aktuell fehlt es an ausreichend synthetischem oder biogenem Methan.^[9] Wird das synthetische Methan direkt im Glaswerk produziert, wird Wasserstoff benötigt. Dieser Wasserstoffbedarf steht in Konkurrenz zu anderen Sektoren und fällt höher aus als bei der Verbrennung von einhundert Prozent Wasserstoff.

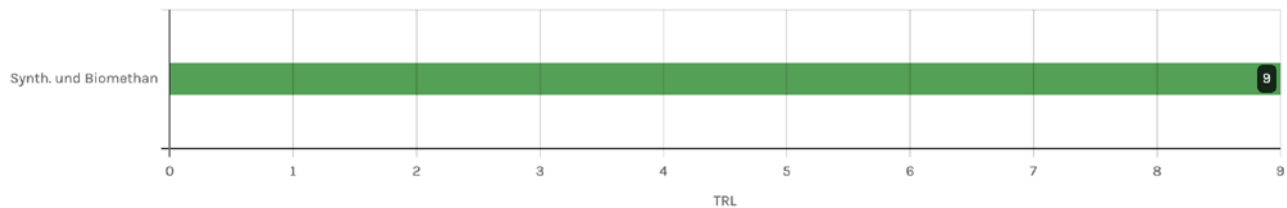
Akteur*innen

- › Glashütten
- › Produzenten von synthetischem und biogenem Methan

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für die Nutzung von synthetischem Methan oder Biomethan als Brennstoff in der Glasherstellung liegt bei 9.^[5]



Bei der direkten Nutzung des abgeschiedenen CO₂ sind neben der Nutzung des Methans (TRL: 9)^[5] auch die Methanisierungsanlagen (je nach Technologie TRL: 4-8)^[22] und Abscheidetechnologien (je nach Technologie TRL: 4-9)^[23] zu berücksichtigen. Allerdings müssen diese Technologien noch zusammengebracht werden. Das Projekt Glas-CO₂ <http://www.hvg-dgg.de/forschung/aktuelle-forschung/glas-co2.html> macht hierzu einen ersten Schritt.^[19]

Endenergiebedarf

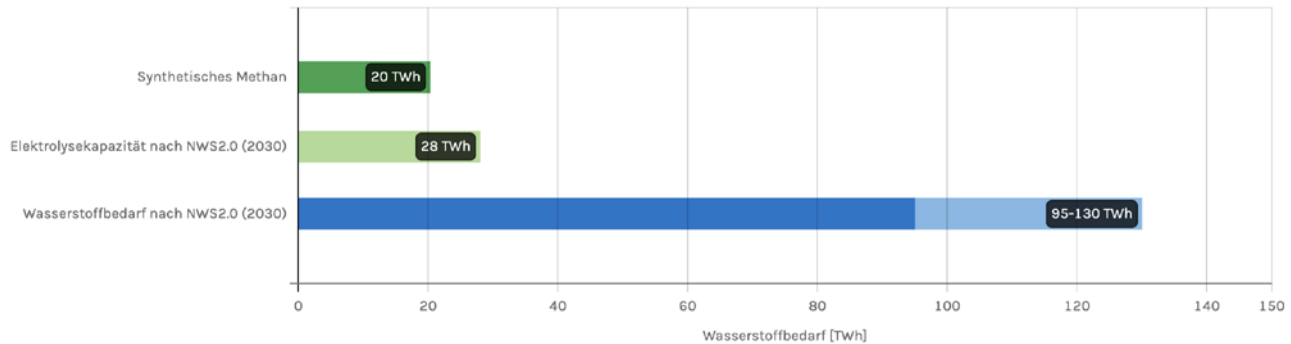
Durch die Nutzung von synthetischem oder biogenem Methan verändert sich der Endenergiebedarf der Anlagen nur marginal, es wird nur ein größerer Anteil der für die Glasproduktion benötigten Energie durch synthetisches beziehungsweise biogenes Methan statt Erdgas gedeckt. Für die Herstellung von synthetischem Methan wird aber wiederum Energie gebraucht. Wird synthetisches Methan direkt an der Glashütte produziert, erhöht sich deren Energiebedarf durch die CO₂-Abscheidung erheblich.

Wasserstoffbedarfe

Im angenommenen Maximalfall, dass alle bisher fossil betriebenen Anlagen mit synthetischem Methan betrieben würden, müssten 16,8 Terawattstunden jährlich^[9] mit diesem gedeckt werden. Bezogen auf den Heizwert von Methan und da bei nahezu vollständigem Umsatz^[22] pro Methanmolekül 4 H₂-Moleküle eingesetzt werden müssen, ergibt sich inklusive des beim Floatprozess anfallenden H₂-Bedarfs (bezogen auf den Heizwert von H₂) ein Gesamtbedarf von ca. 611.000 Tonnen H₂ (entsprechen 20,3 Terawattstunden) jährlich für die deutsche Glasindustrie.

Wasserstoffbedarf für die Beimischung zum Erdgas für die Glasindustrie

Werden die fossilbasierten Brennstoffe in der Glasindustrie vollständig durch synthetisches Methan ersetzt, werden für dessen Produktion 20,3 Terawattstunden Wasserstoff benötigt.



Für biogenes Methan wird kein Wasserstoff benötigt.

AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

> Glas-CO₂^[19]

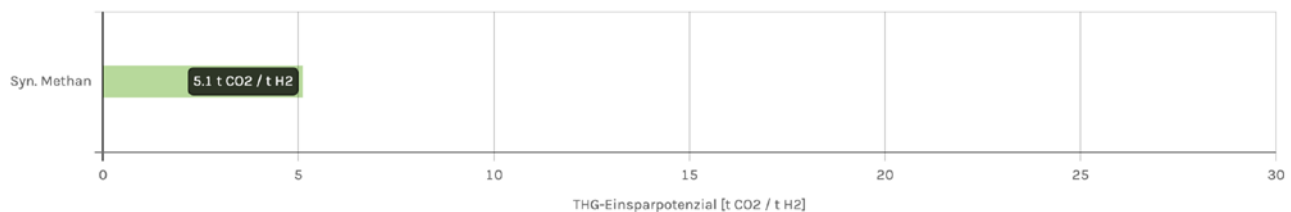
<http://www.hvg-dgg.de/forschung/aktuelle-forschung/glas-co2.html>

Minderungspotential

Bei der Verwendung von Methan ist keine große Veränderung zu den aktuell anfallenden Treibhausgasemissionen (vier Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr (2019)^[12]) zu erwarten. Die energiebedingten Treibhausgasemissionen tragen aber zum Gesamtsystem nicht bei, wenn das Methan aus nachhaltigen Quellen stammt (somit verblieben rein bilanziell nur die 0,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr^[13] prozessbedingte Emissionen). Dies entspricht einer Reduktion um 3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. Unter der Annahme, dass es sich um eine nachhaltige Kohlenstoffquelle (zum Beispiel Biomasse) handelt, können rein bilanziell 5,1 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Tonne Wasserstoff eingespart werden.

Treibhausgasminderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Durch den Ersatz von Methan durch H₂ im Brennstoff können 5,1 t CO₂-Äq. / t H₂ eingespart werden.



Auch durch die Abscheidung des CO₂ können die Treibhausgasemissionen gemindert werden. Dies sind jedoch Minderungen, die nicht auf den Wasserstoffeinsatz zurückzuführen sind oder mit diesem in Konkurrenz stehen, sodass sie an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden. Diese Einsparungen sind auch von der Abscheidetechnologie abhängig.



Da für biogenes Methan kein Wasserstoff benötigt wird, kann das Minderungspotenzial nur pro Terawattstunde angegeben werden. Unter der Annahme, dass alle bisher fossil betriebenen Schmelzwannen mit biogenem Methan betrieben würden, können pro Terawattstunde Biomethan circa 0,19 Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden.

MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Unterstützter Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur

Die staatliche Unterstützung und Lenkung des Infrastrukturausbaus gibt potenziellen Abnehmern von H₂ wie Glasherstellern die Sicherheit, dass sie den H₂ für die Umstellung ihrer Prozesse werden erhalten können.



STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

> Unter den Stakeholder*innen herrschte weitestgehend Konsens, dass der Infrastrukturausbau, insbesondere der Bau von H₂-Pipelinenetzen, staatlich unterstützt werden sollte.

INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen

MASSNAHME

> Steigerung der Nachfrage

Alternative Brennstoffe sind gegenüber den konventionellen oftmals wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig. Durch eine staatlich angereizte Steigerung der Nachfrage kann dennoch ein Absatzmarkt für alternativ erzeugte Produkte generiert werden. Für die Reduktion von Treibhausgasemission in der Glasindustrie eignet sich beispielsweise eine Förderung der Betriebskosten beim Umstieg von Erdgas auf synthetisches Methan.

MASSNAHME

> CO₂-Preis in Form der EU ETS

Im Rahmen des Europäischen Emissionshandels (EU ETS) müssen die Emissionen bis 2030 um 62 Prozent gegenüber 2005 sinken.^[36] Somit wird der CO₂-Preis steigen und Glashersteller erhalten ein Zeichen, dass der Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine wirtschaftlich immer größere Bedeutung zukommt. Allerdings ist es nicht bekannt, ab wann der CO₂-Preis tatsächlich eine Lenkungswirkung in der Glasindustrie entfalten wird.^[37]



Hybride und superhybride Schmelzwannen

Schmelzwannen könnten zukünftig auch hybrid (20 bis 40 Prozent elektrisch) oder superhybrid (60 bis 80 Prozent elektrisch) betrieben werden. Der elektrische Anteil der Energie wird dabei über Elektroden in den Schmelzwannen zugeführt und der Restanteil an Energie durch Verbrennung eines Brennstoffes bereitgestellt. Als Brennstoff kann vorläufig noch Erdgas (oder ein anderer fossiler Brennstoff) verwendet werden, langfristig kann aber auf H₂ oder andere Brennstoffe zurückgegriffen werden.^[13]

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



› Es besteht eine prinzipielle Einigkeit bei den Stakeholder*innen, dass vollelektrische Schmelzwannen sowie hybride und superhybride Schmelzwannen zukünftig den Großteil der Anlagen darstellen werden.^{[6][24]}

Voraussetzungen

- › Die erneuerbaren Energien müssen ausgebaut werden.
- › Die Kapazität des Stromanschlusses und die zur Glashütte führenden Stromleitungen müssen ausgebaut werden. Die Stromversorgung im Werk (insbesondere zur Schmelzwanne) muss neu ausgelegt werden. Grund hierfür ist, dass die bisherige Infrastruktur überlastet würde.

Bei Wasserstoffhybridsystemen zusätzlich:

- › Ausreichend H₂ muss für den dauerhaften Betrieb mit dem jeweiligen Anteil Wasserstofferzeugung werden.
- › Wasserstofftaugliche Gasverteilsysteme und Leitungen innerhalb und zu der Glashütte müssen vorhanden sein.
- › Neues Equipment, also zum Beispiel angepasste Brenner oder Feuerfestmaterialien in der Schmelzwanne müssen vorhanden sein.^{[4][9]}
- › Die Zusammensetzung muss so weit angepasst werden, dass die erforderliche Glasqualität trotz Wasserstoffverbrennung gegeben ist.

Vorteile

- › H₂-Bedarfe sind geringer als bei reiner H₂-Verbrennung.
- › Hybride Systeme können auch für Glasarten, die wegen Farbe, Zusammensetzung oder für Chargen, die aufgrund der Größe nicht rein elektrisch geschmolzen werden können, genutzt werden.^{[9][13]}
- › Je höher der elektrische Anteil der (super-)hybriden Schmelzwanne, desto energieeffizienter ist sie, da bei der Verbrennung und gegebenenfalls bei der Erzeugung des Brennstoffs Verluste auftreten.
- › Werden fossile durch erneuerbare Energieträger beziehungsweise erneuerbare Energien (teilweise) ersetzt, werden anteilig Treibhausgasemissionen eingespart.

Nachteile

- › Es sind größere Umrüstungen der Schmelzwannen und dementsprechend hohe Investitionen notwendig (siehe Ökonomische Aspekte).

Folgen

- › Treibhausgaseinsparungen auch ohne sofortige Umstellung auf erneuerbare Brennstoffe.

Bei Wasserstoffhybridsystemen zusätzlich:

- › Durch die Nutzung von Wasserstoff können die Glaseigenschaften, wie zum Beispiel die Farbe, die Menge an Blasen im Glas oder die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen beeinflusst werden. Um diese Eigenschaftsveränderung zu kompensieren, wird es voraussichtlich Anpassungen in der Glaszusammensetzung geben.^[3]

Ökonomische Aspekte

Die Investitionskosten für Umrüstungen sind für die (super-)hybriden Schmelzwannen geringer als für vollelektrische Schmelzwannen, aber höher als für konventionelle.^[9]

Aufgrund des höheren Energiebedarfs bei der Erzeugung der erneuerbaren Brennstoffe (Wasserstoff) ist zu erwarten, dass die Betriebskosten höher ausfallen, wenn der Brennstoffanteil im Energiemix zunimmt. In jedem Fall sind die Betriebskosten aber höher als aktuell.

Die so entstehenden betrieblichen Mehrkosten können auch zu erhöhten Preisen für die Endverbraucher führen. Dies wäre aber ein Nachteil für den internationalen Wettbewerb.^[9]

Versorgungssicherheit

Wenn eine Produktionsstätte nicht ausreichend Brennstoff oder Strom erhält, kann erst in der nächsten Hauptreparatur die Anlage auf einen anderen Energieträger umgestellt werden. Allerdings können bei hybridem Betrieb kleinere Schwankungen durch den jeweils anderen Energieträger ausgeglichen werden.^[2] Anlagen, die trotzdem nicht dauerhaft betrieben werden können, nehmen Schaden und sind daher eine Fehlinvestition. Für die erforderlichen Genehmigungsverfahren und den Ersatz defekter Bauteile können bis zu zwei Jahre bis zur Wiederinbetriebnahme der Schmelzwanne vergehen.^[33]

Die Glashütten wären relevante Wasserstoffabnehmer und eine dauerhafte Versorgung mit Wasserstoff müsste gewährleistet sein. Der Bedarf ist allerdings abhängig von der Ausgestaltung und kann mit vollelektrischen und (super-)hybriden Schmelzwannen auf ein Minimum gedrückt werden. Wo vollelektrische Systeme also technisch nicht möglich sind, sind (super-)hybride Systeme eine Alternative, die vergleichsweise wenig H₂ benötigt.

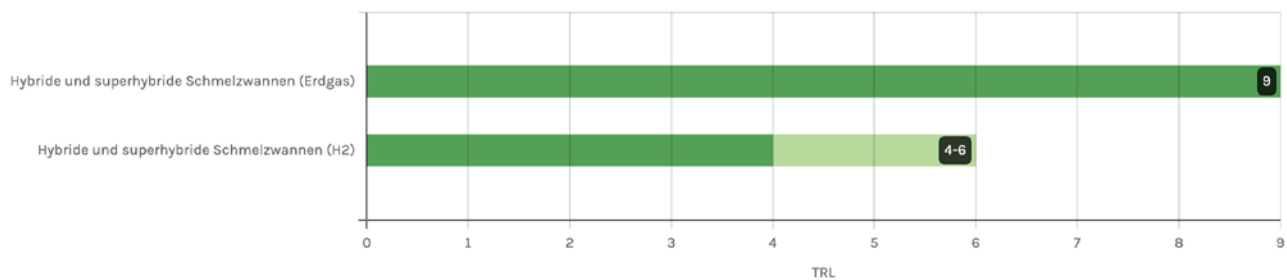
Akteur*innen

- › Glashütten

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für hybride und superhybride Schmelzwannen in Kombination mit Erdgas liegt bei 9,^{[5][25][26][27]} in Kombination mit Wasserstoff bei 4-6.^{[24][28]}



Endenergiebedarf

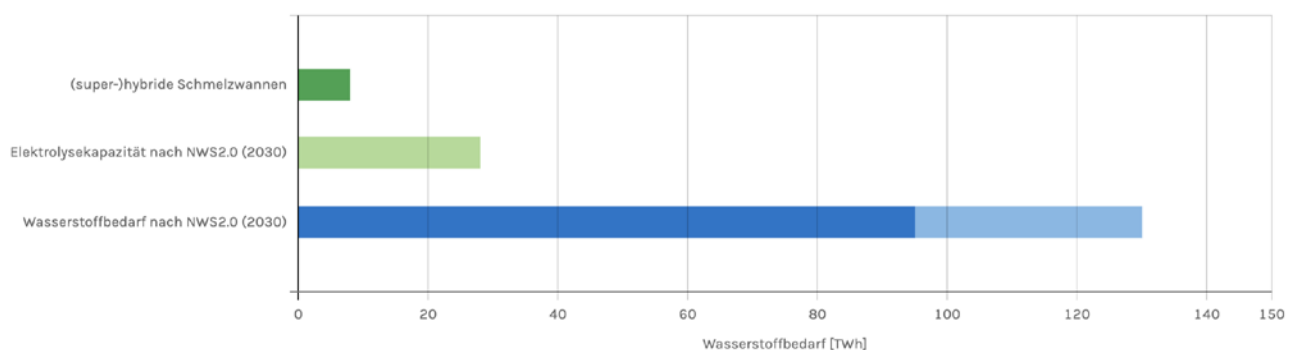
Durch den effizienteren elektrischen Energieeintrag (thermische Effizienz: 85 Prozent für eine vollelektrische Schmelzwanne, die 170 Tonnen Glas pro Tag produziert, im Vergleich zu 45 Prozent für eine konventionelle der gleichen Größe)^[9] verringert sich der Gesamtenergiebedarf auch für Hybridsysteme. Dementsprechend ergeben sich auch in Glas 2045 <https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/glas-2045/> für das Szenario mit dem Maximum an (super-)hybriden Schmelzwannen mit 12,2 Terawattstunden für 2045 noch geringere Energiebedarfe als für das Referenzszenario, aber höher als für die Szenarien mit mehr vollelektrischen Schmelzwannen.^{[9][13]}

Wasserstoffbedarfe

Für das Szenario von Glas 2045 <https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/glas-2045/> mit einem Maximum an (super-)hybriden Schmelzwannen (wobei sich neben 96 hybriden und 5 superhybriden noch 21 vollelektrische Schmelzwannen im Einsatz befinden) sind für das Jahr 2045 Wasserstoffbedarfe von 7,9 Terawattstunden pro Jahr zu erwarten.^[9] Dies entspricht einem H₂-Bedarf von 237.000 Tonnen pro Jahr bezogen auf den Heizwert von H₂.

Wasserstoffbedarf für ein Maximum an (super-)hybriden Schmelzwannen

Werden die Schmelzwannen, für die ein Anschluss an die Wasserstoffinfrastruktur wahrscheinlich ist, (super-)hybrid betrieben, werden 7,9 Terawattstunden Wasserstoff benötigt.



AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

- > Glas 2045^{[9][13]}
<https://www.ier.uni-stuttgart.de/forschung/projekte/abgeschlossen/glas-2045/>
- > Furnaces for the Future^{[24][27]} (eingestellt)
<https://feve.org/glass-industry/projects/furnace-future/>
- > ZeroCO₂Glas^[29]
<https://www.iob.rwth-aachen.de/projekte/zeroco2glas/>

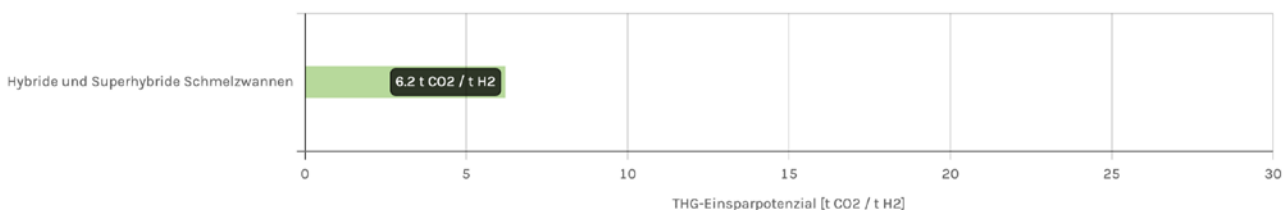
Minderungspotential

Wird angenommen, dass alle bisher fossil betriebenen Schmelzwannen in Deutschland hybrid betrieben würden, wobei der Brennstoff H₂ ist, würden nur noch die prozessbedingten Emissionen (0,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr)^[13] zurückbleiben. Dies entspricht einer Einsparung von 3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr.

Ein nicht unerheblicher Teil der Einsparung wird durch die Elektrizität erreicht. Wird der durch Elektrizität vermiedene Anteil nicht berücksichtigt, ergibt sich das gleiche Ergebnis wie für eine ausschließlich mit Wasserstoff betriebene Schmelzwanne: 6,2 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Tonne H₂.

Treibhausgas-minderungspotenzial in Tonnen CO₂ pro Tonne Wasserstoff

Durch den Ersatz von Methan durch H₂ im Brennstoff können auch beim Einsatz von hybriden und superhybriden Schmelzwannen 6,2 t CO₂-Äq. / t H₂ eingespart werden.



MASSNAHMEN

MASSNAHME

> Unterstützter Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur

Die staatliche Unterstützung und Lenkung des Infrastrukturausbaus gibt potenziellen Abnehmern von H₂ wie Glasherstellern die Sicherheit, dass sie den H₂ für die Umstellung ihrer Prozesse werden erhalten können.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



- > Unter den Stakeholder*innen herrschte weitestgehend Konsens, dass der Infrastrukturausbau, insbesondere der Bau von H₂-Pipelinennetzen, staatlich unterstützt werden sollte.



INITIATOREN

- > Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
- > Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen

MASSNAHME

> Steigerung der Nachfrage

Alternative Technologien sind gegenüber konventionellen oftmals wirtschaftlich nicht wettbewerbsfähig. Durch eine staatlich angereizte Steigerung der Nachfrage kann dennoch ein Absatzmarkt für alternativ erzeugte Produkte generiert werden. Für die Reduktion von Treibhausgasemission durch den Einsatz hybrider und superhybrider Schmelzwannen eignet sich beispielsweise eine Förderung der Investitionskosten.

MASSNAHME

> CO₂-Preis in Form der EU ETS

Im Rahmen des Europäischen Emissionshandels (EU ETS) müssen die Emissionen bis 2030 um 62 Prozent gegenüber 2005 sinken.^[36] Somit wird der CO₂-Preis steigen und Glashersteller erhalten ein Zeichen, dass der Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine wirtschaftlich immer größere Bedeutung zukommt. Allerdings ist es nicht bekannt, ab wann der CO₂-Preis tatsächlich eine Lenkungswirkung in der Glasindustrie entfalten wird.^[37]

Vollelektrische Schmelzwannen, Kühlöfen und Feeder

Vollelektrische Schmelzwannen, sowie elektrische Kühlöfen und Feeder sind eine Möglichkeit, heute fossil betriebene Geräte zu ersetzen und so den CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Kommerziell eingesetzt werden gegenwärtig schon vollelektrische Schmelzwannen, allerdings beträgt deren Kapazität maximal 50 Tonnen pro Tag (vergleiche Kapazität von Flachglas-Schmelzwannen: 1.000 Tonnen am Tag; Behälterglas: bis zu 400 Tonnen am Tag).^{[2][8]} Um die Kapazität elektrischer Schmelzwannen zu vergrößern, wird an anderen Geometrien der Schmelzwanne geforscht. Diese Probleme werden aber grundsätzlich als lösbar angesehen, sodass mittelfristig auch größere vollelektrische Schmelzwannen möglich sein werden.^[9]

Auch elektrische Feeder und Kühlöfen werden bereits kommerziell genutzt.^{[4][30]}

Bei der Flachglas- und Spezialglasherstellung kommen heute schon fast ausschließlich elektrische Kühlöfen zum Einsatz.^{[4][6]}

Bei elektrisch betriebenen Schmelzwannen wird mittels Stabelektroden Strom in die Schmelze eingeleitet und die Ionenleitfähigkeit der Schmelze ausgenutzt, um diese zu erwärmen. Die Ionenleitfähigkeit hängt jedoch von der Glaszusammensetzung ab, sodass nur bestimmte Glassorten elektrisch geschmolzen werden können.^{[5][8][31]}



STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG

- › Es besteht eine prinzipielle Einigkeit bei den Stakeholder*innen, dass vollelektrische Schmelzwannen, hybride und superhybride Schmelzwannen, zukünftig den Großteil der Anlagen darstellen werden.^{[6][24]}
- › Es besteht eine prinzipielle Einigkeit bei den Stakeholder*innen: Kühlöfen sollen zukünftig elektrisch betrieben werden.^[4]

Voraussetzungen

- › Die erneuerbaren Energien müssen ausgebaut werden.
- › Die Kapazität des Stromanschlusses und die zur Glashütte führenden Stromleitungen müssen auf mehr als das Zehnfache der heutigen Kapazität ausgebaut werden. Die Stromversorgung im Werk (insbesondere zur Schmelzwanne) muss neu ausgelegt werden, da sonst die bisherige Infrastruktur überlastet würde.^[9]
- › Eine Notstromversorgung muss vorhanden sein.^[9]

Vorteile

- › Die Effizienz des Energieeintrags ist bei vollelektrischen Schmelzwannen höher (vollelektrisch: 85 Prozent, konventionell: 45 Prozent), da die Energie durch die Elektroden direkt in den Schmelzprozess eingebracht wird und Verluste (beispielsweise durch Abgas) minimiert werden.^[9]
- › Die Umwandlungsverluste bei der Energieträgererzeugung bleiben für Strom minimal.
- › Es entstehen keine Schadstoff- und Treibhausgase durch Verbrennung (aber bei der Stromerzeugung, falls diese noch nicht vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt ist).

Nachteile

- › Vollelektrische Schmelzwannen können einige Gläser für speziellen Anwendungen aufgrund ihrer fehlenden Ionenleitfähigkeit nicht schmelzen.^[8]
- › Das Glas kann durch Zersetzung der Elektrode verunreinigt werden.^[6]
- › Für aktuelle vollelektrische Schmelzwannen sind die Tagesmargen für einige weiterführende Formgebungsprozesse (zum Beispiel Floatprozess) zu gering, was eine modulare Bauweise der Schmelzwannen notwendig macht und somit mehr Platz (der nicht an jedem Standort gegeben ist) erfordert.
- › Es sind weitreichende Umrüstungen und entsprechend hohe Investitionen notwendig.
- › Elektrische Schmelzwannen haben im Vergleich zu konventionellen Schmelzwannen einen kürzeren Investitionszyklus (5 bis 7 Jahre zwischen den Hauptreparaturen)^[9], da die Feuerfestmaterialien punktuell stärker belastet werden und somit häufiger ausgetauscht werden müssen.^[9]

Folgen

› Um die höheren Strombedarfe der vollelektrischen Schmelzwannen beim Ausbau dauerhaft decken zu können, werden saisonale Speicher mit ausreichend Kapazität benötigt.

Ökonomische Aspekte

Vollelektrische Schmelzwannen erfordern vergleichsweise hohe Investitionen für die Umrüstungen (siehe Übersicht Glas).^[9] Dafür liegen die Betriebskosten (2045 voraussichtlich 0,1 Euro die Kilowattstunde) unter jenen für andere erneuerbare Heizmittel (beispielsweise für Wasserstoff 0,2 Euro pro Kilowattstunde), aber immer noch höher als aktuell.

Die so entstehenden betrieblichen Mehrkosten können auch zu erhöhten Preisen für die Endverbraucher führen. Dies wäre aber ein Nachteil für den internationalen Wettbewerb.^[9]

Versorgungssicherheit

Für vollelektrische Schmelzwannen wird kein Wasserstoff benötigt, sondern nur (vorzugsweise erneuerbarer) Strom in ausreichender Menge. Dieser muss allerdings dauerhaft zur Verfügung stehen, damit die Schmelzwanne keinen Schaden nimmt. Nimmt sie Schaden, können für die erforderlichen Genehmigungsverfahren und den Ersatz der kaputten Materialien bis zu zwei Jahre bis zur Wiederinbetriebnahme der Schmelzwanne vergehen.^[33]

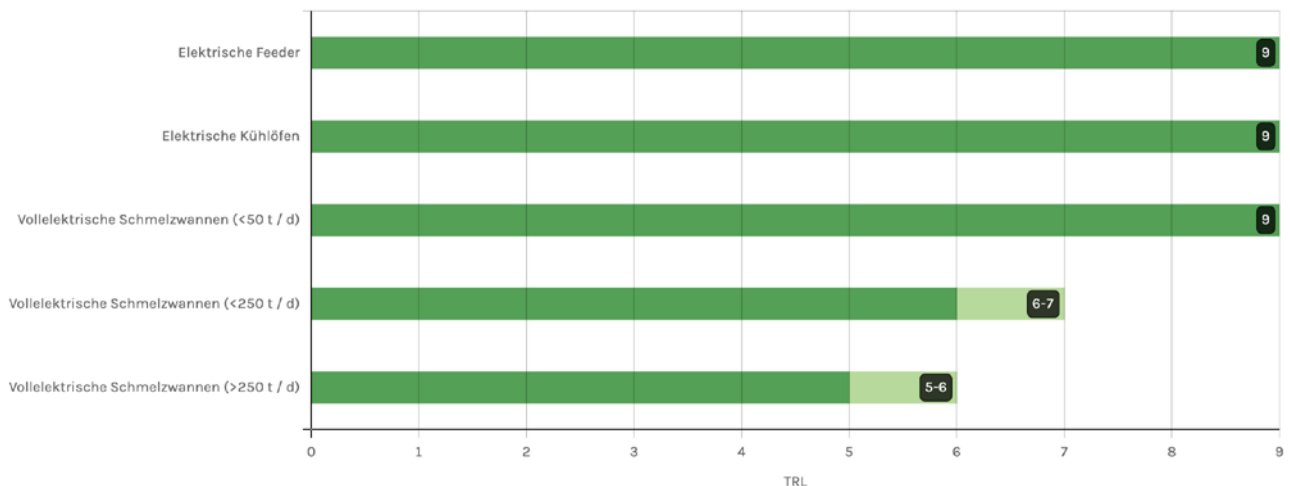
Akteur*innen

- › Glashütten
- › Netzbetreiber/-planer

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für elektrische Feeder^[30], elektrische Kühlöfen^{[4][6]} und vollelektrische Schmelzwannen mit einer Kapazität kleiner 50 Tonnen pro Tag^[2] liegt bei 9, für vollelektrische Schmelzwannen mit einer Kapazität kleiner 250 Tonnen pro Tag bei 6-7^[5] und für größere vollelektrische Schmelzwannen bei 5-6.^{[5][24]}



Endenergiebedarf

Durch den effizienteren elektrischen Energieeintrag (thermische Effizienz: 85 Prozent für eine vollelektrische Schmelzwanne, die 170 Tonnen Glas pro Tag produziert, im Vergleich zu 45 Prozent für eine konventionelle der gleichen Größe)^[9] verringert sich der Endenergiebedarf. Demensprechend ergeben sich auch in Glas 2045 <https://www.bvglas.de/index.php?elD=dumpFile&t=f&f=2738&token=d0e5fc3de0c90256568ee3a064ec4d470e41b500> für das Szenario mit einem Maximum an vollelektrischen Schmelzwannen mit 9,5 Terawattstunden für das Jahr 2045 geringere Energiebedarfe als für alle anderen Szenarien.^{[9][13]}

AUSWAHL RELEVANTER PROJEKTE

> Glas 2045 ^{[9][13]}

<https://www.bvglas.de/index.php?elD=dumpFile&t=f&f=2738&token=d0e5fc3de0c90256568ee3a064ec4d470e41b500>

Minderungspotential

Wird angenommen, dass alle bisher fossil betriebenen Schmelzwannen durch vollelektrische Schmelzwannen ersetzt werden, würden nur noch die prozessbedingten Emissionen zurückbleiben. Dies entspricht einer Reduktion um 3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. Das ist jedoch technisch nicht möglich, da einige Glasarten nicht elektrisch geschmolzen werden können, und bleibt somit ein theoretischer Fall. Pro Terawattstunde können circa 0,18 Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden, wenn angenommen wird, dass alle bisher fossil beheizten Schmelzwannen elektrifiziert werden (technisch nicht möglich).

Alternative Verfahren zur Glasherstellung auf Strombasis

Anstatt der aktuellen vollelektrischen Verfahren können auch andere strombasierte Verfahren zur Erwärmung der Glasschmelze genutzt werden. Verschiedene solche Technologien werden gerade erforscht.^[2] Technologien, die ein ausreichend hohes Temperaturniveau erreichen (ca. 1.400–1.700 °C)^[4] und die technischen Anforderungen des Schmelzprozesses erfüllen können, sind:^{[2][5]}

- > induktive Erwärmung
- > dielektrische Erwärmung, insbesondere als Mikrowellenerwärmung
- > Lichtbogenerwärmung
- > Plasmaerwärmung



Voraussetzungen

- › Die erneuerbaren Energien müssen ausgebaut werden.
- › Die Kapazität des Stromanschlusses und die zur Glashütte führenden Stromleitungen müssen auf mehr als das Zehnfache ausgebaut werden. Die Stromversorgung im Werk (insbesondere zur Schmelzwanne) muss neu ausgelegt werden, weil sonst die bisherige Infrastruktur überlastet werden würde.^[9]
- › Eine Notstromversorgung muss vorhanden sein.^[9]
- › Die Technologien müssen weiterentwickelt und für die Glasindustrie angepasst werden.

Vorteile

- › Der Wirkungsgrad zur Erzeugung von Wärme bezogen auf den Primärenergiebedarf liegt bei diesen Technologien (Ausnahmen: dielektrische Erwärmung) über derjenigen von synthetischen Brennstoffen (wie Wasserstoff oder synthetisches Methan).^{[2][35]}
- › Es entstehen keine Schadstoff- und Treibhausgase durch Verbrennung (aber bei der Stromerzeugung, falls diese noch nicht vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt ist).
- › Es können auch Glasarten geschmolzen werden, die nicht durch vollelektrische Schmelzwannen geschmolzen werden können.

Nachteile

- › Diese Technologien sind noch weit von der Einsatzfähigkeit entfernt (siehe TRL), sodass erst deutlich später als bei anderen Optionen ein Beitrag zur Defossilisierung der Glasindustrie mit der Umrüstung der Produktionsstätten möglich ist.
- › Weitreichende Umrüstungen und entsprechend hohe Investitionen sind notwendig.

Folgen

- › Aufgrund der zum Teil geringen TRL und der notwendigen Umrüstungen kämen diese Technologien voraussichtlich erst langfristig für die Transformation der Glasindustrie infrage. Wenn also auf diese Technologie gesetzt wird, können notwendige Umrüstungen gegebenenfalls erst später durchgeführt werden.
- › Um die höheren Strombedarfe der strombasierten Technologien beim Ausbau dauerhaft decken zu können, werden saisonale Speicher mit ausreichend Kapazität benötigt.

Ökonomische Aspekte

Da der Strompreis pro Kilowattstunde (laut Prognosen auch 2045) noch circa fünfmal^[9] so hoch sein wird wie der aktuelle Erdgaspreis liegen die Betriebskosten mittelfristig in jedem Fall über den aktuellen. Die so entstehenden betrieblichen Mehrkosten können auch zu erhöhten Preisen für die Endverbraucher führen. Dies wäre aber ein Nachteil für den internationalen Wettbewerb.^[9]

Versorgungssicherheit

Für vollelektrische Schmelzwannen wird kein Wasserstoff benötigt, sondern nur (vorzugsweise erneuerbarer) Strom in ausreichender Menge. Dieser muss allerdings dauerhaft zur Verfügung stehen, damit die Schmelzwanne keinen Schaden nimmt. Nimmt sie Schaden, können für die erforderlichen Genehmigungsverfahren und den Ersatz der kaputten Materialien bis zu zwei Jahre bis zur Wiederinbetriebnahme der Schmelzwanne vergehen.^[33]

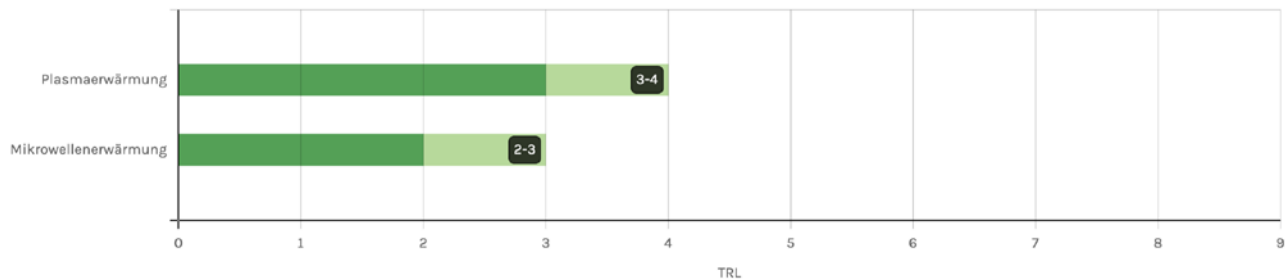
Akteur*innen

- > Glashütten
- > Netzplaner
- > Stromnetzbetreiber

Technologiereifegrad

TRL

Alternative Technologien zur Glasherstellung befinden sich aktuell noch in der Grundlagenentwicklung. Keine der beforschten Technologien geht über eine Überprüfung im Labormaßstab (TRL 4) hinaus.^[2] Der TRL für die Plasmaerwärmung liegt bei 3-4 und für die Mikrowellenerwärmung bei 2-3.^[5]



Endenergiebedarf

Einige Technologien können, sobald sie ausgereift sind, einen ähnlichen Energiebedarf haben wie heutige vollelektrische Schmelzwannen, einige, insbesondere die Mikrowellenerwärmung, auch einen höheren.^[2]

Minderungspotential

Es könnten alle durch fossile Brennstoffe emittierten Treibhausgase (3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr) eingespart werden, wenn angenommen wird, dass bisher fossil betriebene Schmelzwannen durch die oben genannten Technologien und mit CO₂-freiem Strom betrieben würden. Die dafür notwendige Energiemenge ist jedoch ungewiss, da die verschiedenen Technologien unterschiedliche Wirkungsgrade haben und für die Anwendung in der Glasindustrie noch nicht ausgereift sind.



Weitere Brennstoffe

Einige andere Heizgase sind ebenfalls zum Betrieb von Schmelzwannen geeignet. Hierzu zählen:

- › Gemische, die viel Wasserstoff enthalten, wie zum Beispiel Kokereigas (Hauptbestandteile: Wasserstoff (circa 55 Prozent), Methan (circa 25 Prozent), Stickstoff (circa 10 Prozent), Kohlenstoffmonoxid (circa 5 Prozent)), das in einigen Anlagen im Ruhrgebiet auch schon Verwendung findet.^[6]
- › Gemische, die wenig bis keinen Wasserstoff enthalten, zum Beispiel Biogas (Hauptbestandteile: Methan, Kohlenstoffdioxid), das bei wenigen Behälterglasherstellern von lokalen Landwirtschaften bezogen und schon eingesetzt wird.^{[5][9]} Bei Verallia in Bad Wurzbach <https://de.verallia.com/s/sfsites/c/sfc/servlet.shepherd/document/download/0692o0000015b0WAAR> wurde die Nutzung von Biogas bereits 2013 getestet.^{[6][32]}
- › Reinstoffe wie zum Beispiel Ammoniak, die zum Teil mit Wasserstoff hergestellt werden können.^[5]

Diesen Brennstoffen ist gemein, dass die Entwicklung für die Nutzung in der Glasindustrie noch nicht weit fortgeschritten ist oder es sich um Nischenanwendungen handelt, die nur aufgrund von ganz bestimmten Standortfaktoren sinnvoll sind.

STIMMEN AUS DEM STAKEHOLDERDIALOG



- › Es gibt Stakeholder*innen, die der Meinung sind, dass Ammoniak eine gute Möglichkeit zur Befuerung ist. Sie sind der Meinung, dass die daraus resultierenden höheren Stickoxidemissionen technisch handhabbar sind. Andere Stakeholder sind der Meinung, dass der Einsatz von Ammoniak sich lediglich als Transportoption für Wasserstoff anbietet, bis die Anbindung der Anlagen über Wasserstoffpipelines erfolgt. Grund hierfür ist, dass Ammoniak leicht verflüssigt und daher einfach und in großen Mengen transportiert werden kann. An den Glashütten kann Ammoniak dann wieder in Wasserstoff und Stickstoff umgewandelt werden, wobei ersterer als Brennstoff eingesetzt würde. Diese Stakeholder folgern, dass keine Forschungsgelder in eine Technologie gesteckt werden sollten, die zwar theoretisch möglich ist, am Ende vermutlich aber kaum Verwendung finden würde.^[6]

Voraussetzungen

- › Die entsprechenden Heizgase müssen ausreichend und dauerhaft zur Verfügung stehen.
- › Die Glaswerke müssen an eine entsprechende Infrastruktur angeschlossen sein.
- › Es muss der Nachweis erbracht werden, dass keine Qualitätseinbußen durch das entsprechende Heizgas entstehen.

Vorteile

- › Einige Heizgase (etwa Biogas) können zum bestehenden Erdgas zugemischt werden.^[5]
- › Für Biogas existiert bereits ein Markt.^[5]
- › Bei Biogas wird bilanziell kein CO₂ der Atmosphäre zugeführt.



Nachteile

- › Der Einsatz einiger Heizgase in der Glasindustrie hat noch niedrige TRL.
- › Bei Gasen, die Kohlenstoff enthalten, können weitere CO₂-Emissionen entstehen.
- › Bei Gasen, die Stickstoff enthalten (zum Beispiel Ammoniak) oder bei einer höheren Temperatur verbrennen als Erdgas, können die Stickoxidemissionen erhöht sein.
- › Voraussichtlich sind Anpassungen der Brenner notwendig.
- › Bei Gemischen kann eine fluktuierende Zusammensetzung die Glasqualität negativ beeinflussen, wenn die Brenner nicht zeitgleich an die Veränderungen des Temperaturprofils angepasst werden.
- › Biogas ist eine begrenzte Ressource. Wird es großflächig für die Glasindustrie genutzt, kann es zu Konkurrenz um landwirtschaftlich genutzte Flächen kommen.

Folgen

- › Aufgrund der zum Teil geringen Technologiereifegrade und der notwendigen Umrüstungen, kämen einige Heizgase voraussichtlich erst langfristig für die Transformation der Glasindustrie infrage. Wenn also auf diese Technologie gesetzt wird, können notwendige Umrüstungen gegebenenfalls erst später durchgeführt werden.

Ökonomische Aspekte

Die Investitionen für die Schmelzwannenumrüstungen liegen abhängig vom Gas voraussichtlich zwischen jenen für den Einsatz von Wasserstoff und für den Einsatz von Methan als Brennstoff.^[5]

Hinzu können gegebenenfalls Investitionen für weitere Anlagen kommen, die für die Bereitstellung der Brennstoffe benötigt werden, wie zum Beispiel ein Ammoniakcracker.

Versorgungssicherheit

Wenn eine Produktionsstätte nicht ausreichend mit dem entsprechenden Heizgas beliefert wird, kann in der Regel erst in der nächsten Hauptreparatur die Anlage auf einen anderen Energieträger umgestellt werden. Einige Heizgase sind jedoch untereinander austauschbar, wie zum Beispiel Erdgas und Biogas.^[9] Anlagen, die nicht dauerhaft betrieben werden können, nehmen Schaden und sind daher eine Fehlinvestition. Für die erforderlichen Genehmigungsverfahren und den Ersatz der kaputten Materialien können bis zu zwei Jahre bis zur Wiedereinbetriebnahme der Schmelzwanne vergehen.^[33] Es bedarf also einer konstanten Versorgung mit dem jeweiligen Heizgas (beziehungsweise hinreichend ähnlichen Heizgasen).

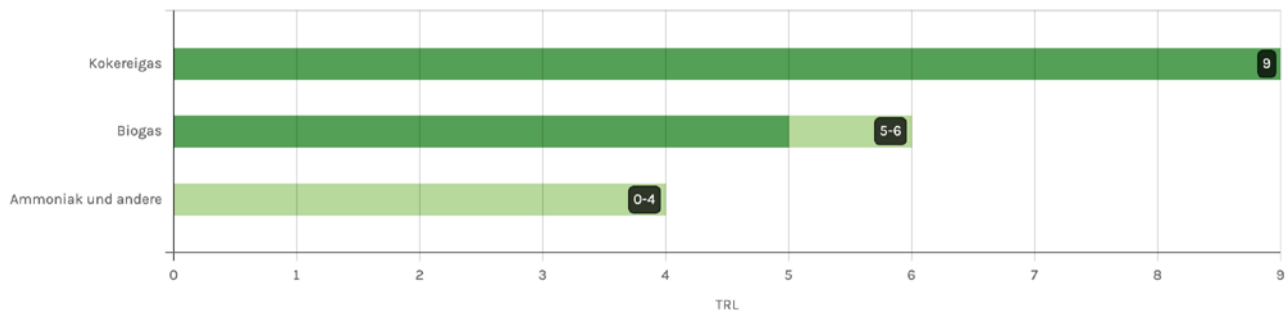
Akteur*innen

- › Glashütten
- › Erzeuger des jeweiligen Heizgases
- › Infrastrukturbetreiber

Technologiereifegrad

TRL

Der Technologiereifegrad für die Verwendung von Kokereigas für die Glasherstellung liegt bei 9^[6], für Biogas bei 5-6^[5] und für andere Brennstoffe wie zum Beispiel Ammoniak unter 4^[6].



Endenergiebedarf

Durch die verschiedenen Heizgase verändert sich der Energiebedarf der Anlagen nur marginal, es wird nur ein geringerer Anteil der für die Glasproduktion benötigten Energie durch Erdgas gedeckt.

Für die Herstellung der verschiedenen Heizgase können aber weitere Energiebedarfe anfallen, falls diese synthetisch hergestellt werden. Diese Energiebedarfe könnten aber auch ins Ausland verlagert werden, wenn die Brennstoffe an Standorten mit hohen Potenzialen für erneuerbare Energien produziert und nach Deutschland importiert werden.

Wasserstoffbedarfe

Ob Wasserstoff benötigt wird, ist abhängig vom Gas und allgemein schlecht abschätzbar.

Minderungspotential

Das Minderungspotenzial ist schwer abzuschätzen, da bei den verschiedenen Brennstoffen zum Teil noch Treibhausgasemissionen entstehen können. Für den Fall, dass alle aktuell fossil betriebenen Schmelzwannen mit einem Brennstoff, der keine Treibhausgase produziert, betrieben werden, können die Treibhausgasemissionen um 3,1 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr reduziert werden.

MASSNAHME

MASSNAHME

> CO₂-Preis in Form der EU ETS

Im Rahmen des Europäischen Emissionshandels (EU ETS) müssen die Emissionen bis 2030 um 62 Prozent gegenüber 2005 sinken.^[36] Somit wird der CO₂-Preis steigen und Glashersteller erhalten ein Zeichen, dass der Reduzierung der Treibhausgasemissionen eine wirtschaftlich immer größere Bedeutung zukommt. Allerdings ist es nicht bekannt, ab wann der CO₂-Preis tatsächlich eine Lenkungswirkung in der Glasindustrie entfalten wird.^[37]



Literatur

- [1] **Navigant Energy Germany (2020):** Branchensteckbrief der Glasindustrie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [2] **Ausfelder et. al. (2019):** Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie II Analysen I Technologien I Beispiele. https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Kopernikus_Flexoptionen_Band+II_kompl.pdf
- [3] **NRW.Energy4Climate:** HyGlass, zuletzt aufgerufen am: 29.03.2023. <https://www.energy4climate.nrw/themen/best-practice/hyglass>
- [4] **Islami et. al. (2021):** Wasserstoffnutzung in der Glasindustrie als Möglichkeit zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und des Einsatzes erneuerbarer Gase – Untersuchung der Auswirkungen auf den Glasherstellungsprozess und Analyse der Potenziale in NRW. <https://www.bvglas.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2514&token=69553e2ada72ffc160a9ebce8174bfcedf2870ec>
- [5] **Zier et. al. (2021):** A review of decarbonization options for the glass industry, Energy Conversion and Management: X, 10, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100083>
- [6] **H2-Kompass (2023):** Roundtable Glas.
- [7] **BV Glas (2022):** Glas. Ein Werkstoff mit vielen Talenten. https://www.bvglas.de/media/Weitere_Veroeffentlichungen/BV_Glas_Broschuere_Glas_ein_Werkstoff_mit_vielen_Talenten.pdf
- [8] **Schaeffer, Helmut A. und Langfeld, Roland (2020):** Werkstoff Glas – Alter Werkstoff mit großer Zukunft, 2. Auflage, ISBN: 978-3-662-60260-7.
- [9] **Leisin, Matthias und Radgen, Peter (2022):** Glas 2045 – Dekarbonisierung der Glasindustrie. IER, Universität Stuttgart, Studie im Auftrag des Bundesverband Glasindustrie e.V., Stuttgart. <https://www.bvglas.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2738&token=d0e5fc3de0c90256568ee3a064ec4d470e41b500>
- [10] **BV-Glas:** Zahlen und Fakten, zuletzt aufgerufen am: 25.07.2023. <https://www.bvglas.de/zahlen-fakten/>
- [11] **Gärtner et al. (2021):** Simulation and Techno-Economic Analysis of a Power-to-Hydrogen Process for Oxyfuel Glass Melting, Energies, 14, 24, 8603. <https://doi.org/10.3390/en14248603>
- [12] **Deutsche Emissionshandelsstelle (2020):** Treibhausgasemissionen – VET-Bericht. <https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/VET-Bericht-2019.pdf>
- [13] **Overath, Johann, 09.02.2023, Zukunft Gas, Webinar:** »Bei Wasserstoff voll aufdrehen in der Industrie« [Vortrag]. https://www.youtube.com/watch?v=kS615QD3grI&list=PLGk_Bzhv_gqKXa6bmmawpNUrez5M_aqHb&index=2&ab_channel=ZukunftGas
- [14] **SCHOTT:** SCHOTT und Mainzer Stadtwerke testen Glasherstellung mit klimafreundlichem Wasserstoff, zuletzt aufgerufen am: 30.03.2023. <https://www.schott.com/de-de/news-and-media/pressemitteilungen/2022/schott-und-mainzer-stadtwerke-testen-glasherstellung-mit-klimafreundlichem-wasserstoff>
- [15] **Pakura, Maria (2021):** Glasherstellung mit Grünem Wasserstoff erstmals erfolgreich getestet, zuletzt aufgerufen am: 30.03.2023. https://www.kopernikus-projekte.de/aktuelles/news/glasherstellung_mit_guenem_wasserstoff_erstmalig_erfolgreich_getestet

- [16] **Morris, Greg, 27.02.2020:** NSG to test hydrogen fuel for glassmaking at St Helens site, Glass international. <https://www.glass-international.com/news/nsg-to-use-hydrogen-fuel-for-glassmaking-at-st-helens-site>
- [17] **Keeley, Andrew, 05.07.2022:** Hydrogen Combustion on a Float Glass Furnace [Vortrag im Rahmen des 26. ICG].
- [18] **Air Liquide:** Eine saubere Sache: Glas schmelzen mit Oxyfuel-Verfahren – für effiziente und emissionsarme Glasherstellung, zuletzt aufgerufen am: 31.03.2023. <https://de.airliquide.com/ihre-anwendung/verbrennung-und-erwärmung/glas-schmelzen-mit-sauerstoff>
- [19] **HVG-DGG:** Nutzung des aus dem Glasschmelzprozess freiwerdenden Kohlendioxids zur Kreislaufführung und Herstellung synthetischer Brennstoffe, zuletzt aufgerufen am: 13.04.2023. <http://www.hvg-dgg.de/forschung/aktuelle-forschung/glas-co2.html>
- [20] **Nelissen et. al. (2020):** 1 190236 – Availability and costs of liquefied bio- and synthetic methane, CE Delft. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_190236_Availability_and_costs_of_liquefied_bio_and_synthetic_methane_Def.pdf
- [21] **Gorre, Jachin; Ortloff, Felix und van Leeuwen, Charlotte (2019):** Production costs for synthetic methane in 2030 and 2050 of an optimized Power-to-Gas plant with intermediate hydrogen storage, Applied Energy, 253, 113594. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113594>
- [22] **Schmidt et. al. (2018):** Technologiebericht 4.2a Power-to-gas (Methanisierung chemisch-katalytisch) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7059/file/7059_Power-to-gas.pdf
- [23] **Ecra (2022):** The Ecra Technology Papers 2022. <https://ecra-online.org/research/technology-papers/>
- [24] **Böck, Hanno, 27.06.2022:** Wie die Glasindustrie vom Erdgas abhängt, klimareporter. <https://www.klimareporter.de/technik/wie-die-glasindustrie-vom-erdgas-abhaengt>
- [25] **Horn Glass Industries:** Hybridwannen, zuletzt aufgerufen am: 17.04.2023. <https://www.hornglass.com/de/produkte/schmelzwannen-und-ausruestung/hybridwannen>
- [26] **Sorg:** It's time for a clean start, zuletzt aufgerufen am: 17.04.2023. <https://sustainablenmelting.sorg.de/hybrid-melting/>
- [27] **Müller-Arnold, Benedikt, 07.04.2022:** Warum die Glasindustrie ein Embargo fürchtet, Süddeutsche Zeitung. <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/gerresheimer-lohr-tettau-1.5562702>
- [28] **FEVE:** Furnaces of the Future, zuletzt aufgerufen am: 17.04.2023. <https://feve.org/glass-industry/projects/furnace-future/>
- [29] **RWTH:** ZeroCO2Glas: Entwicklung einer neuartigen, mit Wasserstoff befeuerten, Glasschmelzwanne mit dem Ziel einer CO₂-neutralen Behälterglasproduktion, zuletzt aufgerufen am: 17.04.2023. <https://www.iob.rwth-aachen.de/projekte/zeroco2glas/>
- [30] **Horn Glass Industries:** Elektro-Vorherde, zuletzt aufgerufen am: 19.04.2023. <https://www.hornglass.com/de/produkte/glaskonditionierungsanlagen/elektro-vorherde>
- [31] **Ausfelder et. al. (2018):** Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie Methoden | Potenziale | Hemmnisse. https://dechema.de/dechema_media/Bilder/Publikationen/Buch_FLEXIBILITAETSOPTIONEN.pdf



- [32] **Verallia (2021):** 75 Jahre Glasproduktion in Bad Wurzach – Von Oberland zu Verallia. <https://de.verallia.com/s/sfsites/c/sfc/servlet.shepherd/document/download/0692o0000015b0WAAR>
- [33] **BV Glas (2022):** BV Glas-Stellungnahme zur Versorgungssicherheit mit Erdgas Stand März 2022. https://glas-fritz.de/wp-content/uploads/2022/03/Anlage-1_BV-Glas-Stellungnahme-Versorgungssicherheit-Erdgas_final.pdf
- [34] **Umweltbundesamt:** Treibhausgas-Emissionen in Deutschland, zuletzt aufgerufen am: 11.07.2023. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>
- [35] **In4climate.NRW (2021):** Industrierwärme Klimaneutral: Strategien und Voraussetzungen für die Transformation. Ein Diskussionspapier der Arbeitsgruppe Wärme, Gelsenkirchen. https://www.energy4climate.nrw/fileadmin/Service/Publikationen/Ergebnisse_IN4climate.NRW/2021/diskussionspapier-klimaneutrale-waerme-industrie-cr-in4climatenrw.pdf
- [36] **Europäisches Parlament, 19.12. 2022, Klimaschutz:** Einigung über ehrgeizigeren EU-Emissionshandel (ETS) [Pressemitteilung]. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20221212IPR64527/klimaschutz-einigung-uber-ehrgeizigeren-eu-emissionshandel-ets>
- [37] **Bundesrechnungshof (2022):** Abschließende Mitteilung an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz über die Prüfung. Ausgestaltung des Emissionshandels. Teil II: Europäischer Emissionshandel. https://www.bundesrechnungshof.de/SharedDocs/Downloads/DE/Berichte/2022/europaeischerr-emissionshandel-volltext.pdf?__blob=publicationFile&v=2



Beteiligte Institutionen

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

www.acatech.de

Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.

Die DECHEMA ist das kompetente Netzwerk für chemische Technik und Biotechnologie in Deutschland. Sie vertritt als gemeinnützige Fachgesellschaft diese Gebiete in Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft. Die DECHEMA fördert den technisch-wissenschaftlichen Austausch von Fachleuten unterschiedlicher Disziplinen, Organisationen und Generationen und bündelt das Know-how von über 5.500 Einzel- und Fördermitgliedern. Sie engagiert sich in (inter-)nationalen technischen Expertengremien und ist in öffentlich geförderten F&E-Projekten sowie der Auftragsforschung aktiv. Dabei koordiniert sie große Forschungsverbünde und ist in verschiedenen Fördermaßnahmen für die Begleitforschung verantwortlich.

www.dechema.de

Autor*innen

- > **Dr. Jens Artz**
Teamleiter DECHEMA
- > **Dr. Benjamin Baur**
Referent Stakeholder-Dialog acatech
- > **Marie Biegel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Dr. Dominik Blaumeiser**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Jasper Eitze**
Teamleiter acatech
- > **Dr. Alexandra Göbel**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Tamara Hanstein**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Christopher Hecht**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **Thomas Hild**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Florian Hölting**
Wissenschaftlicher Referent ISEA RWTH Aachen University / acatech
- > **David Knichel**
Wissenschaftlicher Referent acatech
- > **Valerie Kwan**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Jördis Lemke**
Teamassistentin acatech
- > **Dr. Michaela Löffler**
Wissenschaftliche Referentin DECHEMA
- > **Dr. Andrea Lübcke**
Teamleiterin acatech
- > **Alena Müller**
Referentin Stakeholder-Dialog acatech
- > **Lars Ole Reimer**
Redakteur Multimedia acatech
- > **Dr. Damien Rolland**
Wissenschaftlicher Referent DECHEMA
- > **Anna Runkel**
Studentische Hilfskraft acatech
- > **Emre Yildirim**
Studentische Hilfskraft acatech

Ansprechpartner*innen acatech

- > **Jasper Eitze**
eitze@acatech.de
- > **Dr. Andrea Lübcke**
luebcke@acatech.de

Ansprechpartner*innen DECHEMA

- > **Dr. Jens Artz**
jens.artz@dechema.de
- > **Dr. Michaela Löffler**
michaela.loeffler@dechema.de



WASSERSTOFF KOMPASS

IMPRESSUM

Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft

Herausgebende

**acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften e.V.**

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0) 89 / 52 03 09-0
F +49 (0) 89 / 52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

**DECHEMA Gesellschaft für
Chemische Technik und Biotechnologie e.V.**

Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
T +49 (0) 69 / 75 64-0
info@dechema.de
www.dechema.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums / acatech

Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather,
Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier,
Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Vorstand i.S.v. § 26 BGB:
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Verantwortlicher im Sinne des Presserechts

Dr. Jens Artz, DECHEMA

Redaktion

Jasper Eitze, Dr. Andrea Lübcke / acatech
Dr. Jens Artz, Dr. Michaela Löffler / DECHEMA

Gestaltung und Satz

Lindner & Steffen GmbH, www.lindner-steffen.de

Bildnachweis

AdobeStock: Lucky Ai

Die Projektpartner danken dem Bundesministerium
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) sowie dem
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens
(FKZ 03EWT002).

Betreut wurde das Projekt durch den Projektträger Jülich.

Erschienen im März 2024 in Frankfurt am Main

1. Auflage

ISBN 978-3-89746-245-8

www.wasserstoff-kompass.de

Empfohlene Zitierweise

acatech, DECHEMA (Hrsg.): Wasserstoff-Kompass
- Handlungsoptionen für die Wasserstoffwirtschaft,
Frankfurt am Main 2023, ISBN: 978-3-89746-245-8
<https://www.wasserstoff-kompass.de/handlungsfelder#>



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages