



Die  
Bundesregierung



NATIONALE  
WASSERSTOFF-  
STRATEGIE  
Schlüsselement  
der Energiewende

# Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie

*Ergebnispapier zum NWS-Industriedialog*

**Anmerkung**

Dieses Ergebnispapier wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) als Zusammenfassung des Dialogs „Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie“ im Rahmen der Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie erstellt. Die Daten wurden zum Teil von den Teilnehmenden zur Verfügung gestellt.

**Impressum****Herausgeber**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)  
Öffentlichkeitsarbeit  
11019 Berlin  
[www.bmwk.de](http://www.bmwk.de)

**Stand**

Juni 2022

Diese Publikation wird ausschließlich als Download angeboten.

**Gestaltung**

PRpetuum GmbH, 80801 München

**Bildnachweis**

iStock  
Henrik5000/S. 2  
smirkdingo/Titel

**Zentraler Bestellservice für Publikationen  
der Bundesregierung:**

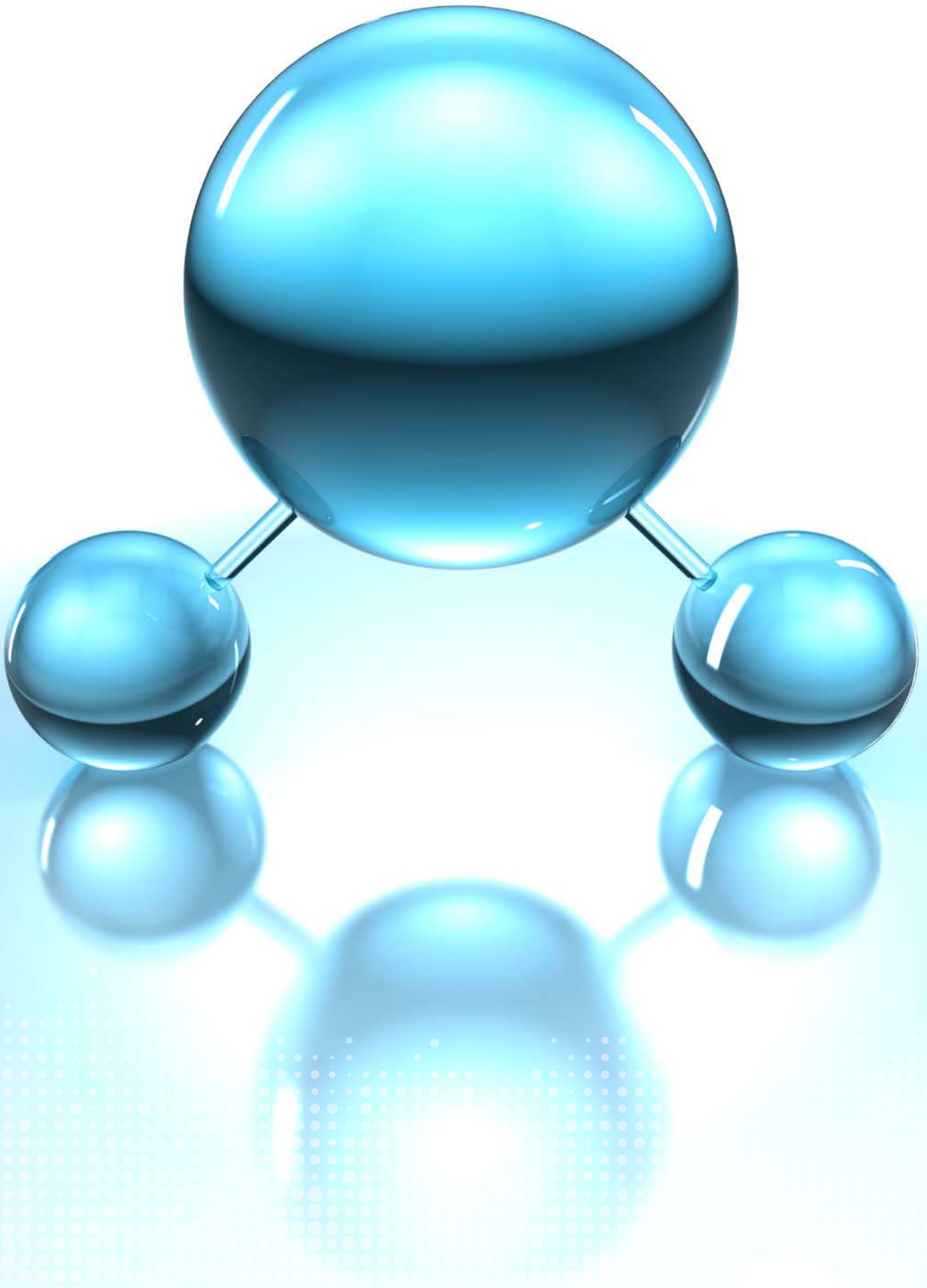
E-Mail: [publikationen@bundesregierung.de](mailto:publikationen@bundesregierung.de)  
Telefon: 030 182722721  
Bestellfax: 030 18102722721

Diese Publikation wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Die Publikation wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

# Inhalt

1	Einleitung	3
2	Kurzbeschreibung der Industriebranchen	4
2.1	Glasindustrie	4
2.2	Keramikindustrie	5
2.3	Papierindustrie	6
2.4	NE-Metallindustrie	7
3	Dekarbonisierungsoptionen und mögliche Entwicklung der Wasserstoffbedarfe	9
4	Aktuelle Forschungs- und Pilotprojekte	12
5	Ergebnisse des Dialogs: Herausforderungen und Handlungsoptionen	16
	Literaturverzeichnis	19





# 1 Einleitung

Im Rahmen der Nationalen Wasserstoffstrategie hat sich die Bundesregierung vorgenommen, „gemeinsam mit Stakeholdern – insbesondere der energieintensiven Industrie – innerhalb branchenspezifischer Dialogformate langfristige Dekarbonisierungsstrategien auf der Basis von Wasserstoff zu entwickeln“<sup>1</sup>. In diesem Rahmen haben Branchendialoge mit der Stahl- und der Chemieindustrie und ein Austausch mit weiteren energieintensiven Industrien – die im Vergleich zur Stahl- und Chemieindustrie bislang bei der Diskussion um den Einsatz von grünem Wasserstoff noch nicht so stark im Vordergrund stehen – der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie stattgefunden.

Auch das Thema wasserstoffbasierte CCU-Verfahren wurde in diesem Kontext mit der Industrie diskutiert.

Dieses Ergebnispapier fasst den aktuellen Stand rund um den Einsatz von Wasserstoff zur Dekarbonisierung in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie sowie die Ergebnisse der Diskussion im Rahmen des Industriedialogs am 24. November 2021 zusammen. Die Inhalte stellen nicht die Meinung der Bundesregierung oder des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz dar.

## 2 Kurzbeschreibung der Industriebranchen

Die folgenden Beschreibungen sollen eine kurze Einordnung zum Thema Wasserstoff und möglichen Anwendungsbereichen in den vier Industriebranchen geben. Dazu wird die jeweilige Branchenstruktur kurz erläutert, außerdem werden aktuelle Verbräuche nach Energieträgern aufgelistet.

### 2.1 Glasindustrie

Die aktuell erdgasbetriebenen Schmelzprozesse in der Glasindustrie, insbesondere die großen Schmelzwannen, lassen sich z. T. schwer elektrifizieren und können daher zukünftig möglicherweise leichter durch grünen Wasserstoff dekarbonisiert werden. Durch den Einsatz von grünem Wasserstoff im Schmelzprozess der Glasindustrie ließen sich deutschlandweit rund 3,3 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Jahr einsparen<sup>2</sup>. Zusätzlich zu brennstoffbedingten Emissionen sind in der Glasindustrie ca. 16 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen prozessbedingt. Diese Emissionen ließen sich nur durch eine andere Rohstoffbasis (Verzicht auf Carbonate) oder CCU/S vermeiden.<sup>3</sup> Die Glasindustrie beschäftigte im Jahr 2020 53.690 Menschen und erzielte einen Umsatz von 9,8 Mrd. Euro<sup>4</sup>. Aktuell gibt es verschiedene

Forschungsaktivitäten u. a. zum Einsatz von Wasserstoff in großen Schmelzwannen der Glasindustrie. Eine besondere Herausforderung und Gegenstand der Forschung ist hier u. a. die Auswirkung der Wasserstoff-Flamme auf das Produkt. Die Glasindustrie umfasst die Branchenzweige Behälterglaswaren, Flachglasherstellung und -veredelung, Hohl- und Wirtschaftsglas, Glasfasern und Gebrauchs- und Spezialglas. Besonders energie- und emissionsintensiv sind die Branchenzweige Flachglasherstellung und Hohlglas.

Die knapp 5 Mio. t CO<sub>2Äq</sub>-Emissionen der Glasindustrie sind zu einem Großteil energiebedingt (84 Prozent). Erdgas ist der wichtigste Energieträger der Branche und deckt über 70 Prozent des Gesamtenergiebedarfs, der Verbrauch liegt bei 13,5 TWh/a.

Tabelle 1: Produktionsmenge, Umsatz und Strukturdaten Glasindustrie (2020)<sup>5</sup>

Industriezweig	Produktionsmenge in Mio. Tonnen	Umsatz in Mio. Euro	Produktionsstandorte*	Arbeitsplätze
Glasindustrie Gesamt	7,4	9.808	388	53.690
Flachglasherstellung	2,0	935	17	3.972
Hohlglas	4,1	2.046	31	9.826

\*Betriebe über 20 Mitarbeitende

2 NRW.Energy4Climate (2021a)

3 BMWi (2019a)

4 BVGlas (2021a)

5 BVGlas (2021a)

Tabelle 2: Energieverbräuche, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Prozesstemperaturen der Glasindustrie (2015)

Industriezweig	Energieverbrauch [TWh/a]						Gesamt- emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq	Prozess- temperaturen
	Gesamt	Strom	Erdgas	Öl	Kohle	Sonst.		
<b>Glasindustrie Gesamt<sup>6</sup></b>	18,5	4,0	13,5	0,8	k. a.	k. a.	4,9	89% der Wärmeenergie ≥ 500 °C; Schmelzwanne ca. 1.450 °C bis 1.650 °C
<b>Flachglasherstellung<sup>7</sup></b>	k. a.	0,5	4,9	k. a.	k. a.	k. a.	1,4	
<b>Hohlglas<sup>8</sup></b>	k. a.	1,7	6,4	k. a.	k. a.	k. a.	1,6	

## 2.2 Keramikindustrie

Spezielle Prozesse in der Keramikindustrie, insbesondere die großen Tunnelöfen, die aktuell mit Erdgas betrieben werden, lassen sich z.T. schwer elektrifizieren und könnten durch den Ersatz von Erdgas durch grünen Wasserstoff dekarbonisiert werden. Erste Forschungsaktivitäten zum Einsatz von Wasserstoff in der Keramikindustrie und insbesondere in der Ziegelindustrie gibt es bereits. Eine besondere Herausforderung sind die erhöhte

Flammgeschwindigkeit beim Einsatz von Wasserstoff und die Wechselwirkungen mit dem Produkt, die sich u. a. auf die Produktfarbe auswirken können. Darüber hinaus ist die Keramikindustrie z.T. Entwickler und Anbieter für Technologien rund um die Wasserstoffherstellung und -anwendung.

Die Keramikindustrie umfasst die Branchenzweige Ziegel, Fliesen, Geschirr, Sanitär, Technische Keramik, Feuerfest und Sonstige.

Tabelle 3: Produktionsmenge, Umsatz und Strukturdaten Keramikindustrie (2020)<sup>9</sup>

Industriezweig	Produktionsmenge in Mio. Tonnen	Umsatz in Mio. Euro	Produktionsstandorte	Arbeitsplätze
<b>Keramikindustrie Gesamt</b>	11,3	6.100	315	35.606
<b>Ziegel</b>	9,4	1.600	123	8.500
<b>Fliesen</b>	1,0	500	24	4.200
<b>Geschirr</b>	0,04	490	38	4.939
<b>Sanitär</b>	0,03	510	6	2.886
<b>Techn. Keramik</b>	0,06	1.090	46	6.281
<b>Feuerfest</b>	1,3*	1.640	62	6.700
<b>Sonstige</b>	0,02	230	16	2.100

\*davon 0,7 gebrannt

6 BMWi (2019a)

7 Angaben des Branchenverbands BVGlas

8 Angaben des Branchenverbands BVGlas

9 Angaben der Branchenverbände (Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, Deutsche Feuerfest Industrie, Bundesverband Keramische Industrie, Bundesverband Keramische Fliesen)

In der Keramikindustrie ist Erdgas aktuell mit über 75 Prozent der am häufigsten eingesetzte Energieträger<sup>10</sup>. In der Ziegelindustrie lag der Anteil von Erdgas im Jahr 2020 sogar bei ca. 89 Prozent. Lediglich 11 Prozent des Energiebedarfs werden dort aktuell durch Strom gedeckt<sup>11</sup>.

### 2.3 Papierindustrie

Zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Papierindustrie ist neben einer Elektrifizierung der Prozesse auch der Einsatz von Wasserstoff sowohl in den KWK-Anlagen als auch in speziellen Trocknungsprozessen eine Option. Die Industriekraftwerke der Papierindustrie bieten zukünftig auch

ein mögliches Flexibilisierungspotenzial mit stärker systemdienlichem Einsatz. Ein erstes Kraftwerk in der Papierindustrie wurde in Deutschland bereits erfolgreich auf eine neue Gasturbine umgerüstet, die mit einem Anteil von bis zu 50 Prozent Wasserstoff betrieben werden kann. Die dezentrale Wasserstoffherzeugung könnte aufgrund der Erzeugung von Nebenprodukten wie Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) eine interessante Option für die Papierindustrie sein.

Mit einem Gesamtenergieverbrauch von rund 65 TWh/a<sup>14</sup> gehört die Papierindustrie zu den energieintensiven Industrien, wobei ca. 42 Prozent des Strombedarfs und über 80 Prozent des Wärmebedarfs durch Eigenerzeugung in KWK-Anlagen gedeckt werden<sup>15</sup>.

Tabelle 4: Energieverbräuche, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Prozesstemperaturen Keramikindustrie (2020)<sup>12</sup>

Industriezweig	Energieverbrauch [TWh/a]						Gesamtemissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq	Prozesstemperaturen
	Gesamt	Strom	Erdgas	Öl	Kohle	Sonst.		
<b>Gesamt</b>	10,7	1,4	9,3	k.a.	k.a.	k.a.	2,3	80 bis 90% des Gesamtenergieverbrauchs zwischen 500 bis 2.500 °C
<b>Ziegel</b>	5,8	0,6	5,2	k.a.	k.a.	k.a.	1,5	900 bis 1.200 °C
<b>Fliesen</b>	1,9	0,2	1,7	k.a.	k.a.	k.a.	0,3	1.100 bis 1.250 °C
<b>Geschirr</b>	0,5	0,1	0,4	k.a.	k.a.	k.a.	0,1	850 bis 1.400 °C
<b>Sanitär</b>	0,2	0,04	0,2	k.a.	k.a.	k.a.	0,04	1.200 bis 1.300 °C
<b>Techn. Keramik</b>	0,7	0,2	0,5	k.a.	k.a.	k.a.	0,2	750 bis 2.200 °C
<b>Feuerfest</b>	1,3	0,2	1,1	k.a.	k.a.	k.a.	0,2	1.300 bis 1.800 °C
<b>Sonstige</b>	0,3	0,1	0,2	k.a.	k.a.	k.a.	0,04	750 bis 2.500 °C

Tabelle 5: Produktionsmenge, Umsatz und Strukturdaten Papierindustrie (2019)

Industriezweig	Produktionsmenge in Mio. Tonnen	Umsatz in Mio. Euro	Produktionsstandorte	Arbeitsplätze
<b>Papier und Zellstoff<sup>13</sup></b>	22,1	14.334	153	39.750

10 BMWi (2019b)

11 Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie (2021)

12 Angaben der Branchenverbände; nach offizieller Energiestatistik

13 DIE PAPIERINDUSTRIE (2021)

14 DIE PAPIERINDUSTRIE (2021)

15 BMWi (2019c)



**Tabelle 6: Energieverbräuche, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Prozesstemperaturen der Papierindustrie (2019)<sup>16, 17</sup>**

Industriezweig	Energieverbrauch [TWh/a]						Gesamt-emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq	Prozesstemperaturen
	Gesamt	Strom	Erdgas	Öl	Kohle	Sonst.		
Papier und Zellstoff	65,2*	16,2**	24,3	0,2	3,5	21,0	13,1	Dampf: 100 °C; weitere Prozessschritte: bis zu 180 °C; in Sonderfällen auch über 200 °C

\*Abzüglich Eigenerzeugung: 58,4 TWh; \*\*Stromeinsatz (davon ca. 42 Prozent Eigenerzeugung)

## 2.4 NE-Metallindustrie

Insbesondere die Aluminium- und Kupferherstellung sowie die Weiterverarbeitung von NE-Metallen in Gießereien sind als energieintensive Industriezweige einzuordnen. Neben einem großen Bedarf an elektrischer Energie wird aktuell vor allem Erdgas als Brennstoff eingesetzt<sup>18</sup>. Ergänzend zur weiteren Elektrifizierung der Prozesse könnten auch die energetische und die stoffliche Nutzung

von Wasserstoff (z.B. Umrüstung von Glühöfen, H<sub>2</sub> als Reduktionsmittel) eine Option zur Senkung der THG-Emissionen in der NE-Metallindustrie darstellen. Der Einsatz von Wasserstoff zur Herstellung von Kupferanoden wurde zuletzt in einem Pilotprojekt erfolgreich getestet. Insgesamt sind aber die Aktivitäten im Bereich Wasserstoffnutzung in der NE-Metallindustrie noch vergleichsweise verhalten.

**Tabelle 7: Produktionsmenge, Umsatz und Strukturdaten NE-Metallindustrie (2019)<sup>19</sup>**

Industriezweig	Produktionsmenge in Mio. Tonnen	Umsatz in Mio. Euro	Produktionsstandorte	Arbeitsplätze
Gesamt	8,0	52.583	647	111.808
Aluminiumindustrie*	3,8	12.991	123	27.688
Kupferindustrie*	2,0	13.329	61	16.649
NE-Metallgießereien	1,1	6.967	197	36.964

\* Erzeugung und erste Bearbeitung (bis Halbzeug)

16 DIE PAPIERINDUSTRIE (2021)

17 BMWi (2019c)

18 BMWi (2019d)

19 WVMetalle (2020a)

Die großen Branchenzweige der NE-Metallindustrie sind die Erzeugung und erste Bearbeitung von Edelmetallen, von Aluminium, von Blei, Zink und Zinn, von Kupfer und von sonstigen NE-Metallen, die NE-Metallgießereien, die Aluminiumweiter-

verarbeitung und die Feuerverzinkungsindustrie. Die drei energieintensivsten Branchenzweige sind dabei die Aluminiumindustrie, die Kupferindustrie und NE-Metallgießereien.

**Tabelle 8: Energieverbräuche, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Prozesstemperaturen NE-Metallindustrie**

Industriezweig	Energieverbrauch [TWh/a]						Gesamt- emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> Äq	Prozess- temperaturen
	Gesamt	Strom	Erdgas	Öl	Kohle	Sonst.		
<b>Gesamt (2019)<sup>20</sup></b>	28,4	15,3	10,1	2,0	k.a.	1,0	k.a.	
<b>Aluminium (2017)<sup>21</sup></b>	12,3	8,1	2,1	0,2	k.a.	k.a.	6,4	Elektrolyse ca. 950 °C; Aufbereitung der Schrotte ca. 660 °C
<b>Kupfer (2017)<sup>22</sup></b>	1,7	0,5	k.a.	k.a.	k.a.	k.a.	0,6	Aufschmelzen Kupfer- konzentrat ca. 1.200 °C
<b>NE-Gießereien (2017)<sup>23</sup></b>	4,2	1,8	2,1	0,1	k.a.	k.a.	1,8	

20 WVMetalle (2020a)

21 BMWi (2019d)

22 ebd.

23 ebd.

# 3 Dekarbonisierungsoptionen und mögliche Entwicklung der Wasserstoffbedarfe

Alle vier im Rahmen des Dialogs betrachteten Branchen stehen vor großen Herausforderungen, die energie- und prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen im Rahmen der Klimaziele der Bundesregierung zu senken. In allen Branchen gibt es dafür verschiedene Dekarbonisierungsoptionen. Teilweise bestehen bereits Roadmaps für die Dekarbonisierung der Branchen oder einzelner Branchen Zweige, die potenzielle Transformationspfade bis 2045 bzw. 2050 aufzeigen. Energieeffizienz, Recycling und die Elektrifizierung spielen hierbei in allen Branchen

eine wichtige Rolle, haben jedoch etwas unterschiedliche Potenziale. Im Folgenden soll insbesondere die Rolle von grünem Wasserstoff bei der Dekarbonisierung der Industriebranchen dargestellt werden. Hierbei kann grüner Wasserstoff zukünftig zur Erzeugung von Hochtemperatur-Prozesswärme, in flexiblen KWK-Anlagen und als Reduktionsmittel zum Einsatz kommen. Die mögliche Entwicklung der Wasserstoffbedarfe der vier Branchen ist hierbei abhängig von verschiedenen Rahmenbedingungen.

**Tabelle 9: Neue emissionsarme Produktions- und Verfahrenstechnologien in den vier Industriebranchen<sup>24</sup>**

Produkte	Status Quo		Neu			
	Prozess	Haupt-energeträger	Prozess/Technologie	Haupt-energeträger	Anmerkung	
<b>Glas</b>	Klassische Schmelzwanne	Erdgas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wasserstoff-Schmelzwanne</li> <li>Elektrische Schmelzwanne</li> <li>Hybridofen</li> </ul>	Strom, Wasserstoff	CCU/CCS für Prozessemissionen möglich	
<b>Keramik</b>	Rohstoffaufbereitung, Mischen, Trocknen, Brennen in Tunnel-, Rollen-, oder Batchöfen	Erdgas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wasserstoff-Ofen</li> <li>Elektrischer Ofen</li> <li>Hybridofen</li> </ul>	Strom, Wasserstoff	–	
<b>Papier</b>	<i>Primär</i>	Papierfaserherstellung (mechanisch/chemisch/thermisch)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strom</li> <li>Erdgas für (Strom- und) Dampferzeugung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elektrische Dampferzeugung (P2H/Wärmepumpen)</li> <li>Biomasse- oder H<sub>2</sub>-betriebene (Strom- und) Dampferzeugung</li> <li>Geothermie für Dampferzeugung</li> <li>Biogas- oder H<sub>2</sub>-betriebene Feuerungsprozesse</li> </ul>	Strom, Biomasse, Geothermie, Wasserstoff	–
	<i>Sekundär</i>	Papierfaserherstellung (Recycling)				
<b>Aluminium</b>	<i>Primär</i>	Hall-Héroult, point feeder	Strom	Einsatz inerter Anoden	Strom	Vermeidung CO <sub>2</sub> -Emissionen durch Anodenbrand
	<i>Sekundär</i>	Erdgas-Schmelzöfen	Erdgas	Hybrid-/Stromofen	Strom, Wasserstoff	–
<b>Kupfer</b>	<i>Primär</i>	Schmelzen und Raffination	<ul style="list-style-type: none"> <li>Strom</li> <li>Erdgas</li> <li>Steinkohle</li> </ul>	Umstellung von fossilen Energieträgern auf Strom und Wasserstoff	Strom, Wasserstoff	–
	<i>Sekundär</i>	Kupferrecycling				

## Glasindustrie

Für die Vermeidung der energetischen Emissionen der Glasindustrie aus dem Einsatz von Erdgas in Schmelzöfen gibt es primär zwei Optionen: die Elektrifizierung und den Einsatz von grünem Wasserstoff. Die drei großen zuletzt erschienenen Studien (dena (2021), BDI (2021), Ariadne (2021)) gehen davon aus, dass die Bedeutung der Elektrifizierung in der Glasindustrie zunehmen wird. Auch so genannte Hybridöfen und wasserstoffbefeuerte Öfen werden vermehrt zum Einsatz kommen (Projekt Schmelzwanne der Zukunft: 80 Prozent Strom, 20 Prozent Brenngas/synthetisches Gas<sup>25</sup>). Hieraus ergeben sich nach Einschätzung des Branchenverbands BVGlass folgende zukünftige Wasserstoffbedarfe: 2030: ca. 1,5 TWh; 2045: ca. 3 TWh.

Für die Minderung der Prozessemissionen besteht die Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Abscheidung (CCU/CCS). Darüber hinaus könnte zukünftig auch der Einsatz kohlenstofffreier Rohstoffe (Hydroxide statt Carbonate) als Minderungsoption zum Gegenstand von Forschungsprojekten werden.<sup>26</sup>

## Keramikindustrie

In der Keramikindustrie sind die Dekarbonisierungsoptionen der einzelnen Branchenzweige zum Teil sehr unterschiedlich. Das hängt u. a. von den unterschiedlichen Ofenformen (Batch vs. Tunnelofen) und -größen, aber auch von den Prozessen und den eingesetzten Rohstoffen ab. Eine Roadmap zur Transformation der Keramikindustrie wird aktuell erarbeitet. Die Ziegelindustrie, welche den größten Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Keramikindustrie ausmacht<sup>27</sup>, hat bereits eine „Roadmap 2050“<sup>28</sup> mit potenziellen Transformationspfaden und Wasserstoffbedarfen erstellt.

Die relevantesten Dekarbonisierungsmaßnahmen in der Ziegelindustrie sind:

- Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbunds
- Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen für Trockner
- wasserstoffbefeuerte Öfen
- elektrische Öfen
- Einsatz biogener Porosierungsmittel

Der Bedarf an grünem Wasserstoff für die Keramikindustrie liegt laut Angaben der Branchenverbände Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie, Deutsche Feuerfest Industrie, Bundesverband Keramische Industrie und Bundesverband Keramische Fliesen in Summe bei ca. 1 TWh im Jahr 2030 und bei 2,2 TWh im Jahr 2045. Der größte Teil, ca. 1,0 TWh (im Jahr 2050),<sup>29</sup> wird davon in der Ziegelindustrie benötigt. Die Branchenzweige Geschirr, Sanitär, technische Keramik und Sonstige werden zusammen voraussichtlich 0,5 TWh Wasserstoff benötigen. In der Feuerfestindustrie liegt der Wasserstoffbedarf ca. bei 0,4 TWh im Jahr 2045.<sup>30</sup>

## Papierindustrie

Aufgrund des großen Anteils von Niedrig- bis Mitteltemperaturwärme am Gesamtenergiebedarf der Papierindustrie ist die Elektrifizierung der Prozessdampferzeugung ein wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierung. Darüber hinaus sind auch der Einsatz biogener Brennstoffe und Wärme aus erneuerbaren Energien (Solarthermie und Geothermie) wichtige Dekarbonisierungsoptionen. Grüner Wasserstoff könnte in der Papierindustrie perspektivisch in den z.T. industrie-eigenen KWK-Anlagen zum Einsatz kommen welche durch eine systemdienliche Fahrweise zukünftig auch ein mögliches Flexibilisierungspotenzial bieten (Projekt HyflexPower in Frankreich).<sup>31, 32</sup>

25 FEVE (2021)

26 KEI (2021a)

27 KEI (2021b)

28 Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie (2021)

29 ebd.

30 Angaben der Branchenverbände

Zusätzlich gibt es spezielle Trocknungsprozesse, in welchen der Einsatz von Erdgas aktuell auch einen gewünschten Einfluss auf das Produkt hat. Hier bietet der Einsatz von grünem Wasserstoff bzw. grüner Gase aktuell die einzige Dekarbonisierungsoption.<sup>33</sup>

Der Bedarf an grünem Wasserstoff in der Papierindustrie liegt laut EWI (2021) im Jahr 2045 bei rund 2 TWh<sup>34</sup>. Nach Einschätzung des Branchenverbands DIE PAPIERINDUSTRIE liegt der Wasserstoffbedarf bei 3 bis 6 TWh im Jahr 2045 – der mögliche Wasserstoffbedarf für die Dampferzeugung ist dabei noch nicht inkludiert.

## NE-Metallindustrie

Auch in der NE-Metallindustrie spielt die Elektrifizierung bei der Dekarbonisierung eine wichtige Rolle (Einsatz von Induktionsöfen). Darüber hinaus wird künftig auch der Ersatz von Erdgas durch grünen Wasserstoff bzw. grüne Gase zur Dekarbonisierung der NE-Metallindustrie beitragen. Zur Flexibilisierung der Prozesse sind Hybridöfen eine geeignete Option.<sup>35</sup> Darüber hinaus kann grüner Wasserstoff zukünftig auch als Reduktionsmittel z. B. in der Kupferindustrie eine Rolle spielen.

Die Wasserstoffbedarfe der NE-Metallindustrie liegen im Jahr 2030 voraussichtlich bei ca. 1 TWh und im Jahr 2045 bei ca. 4 TWh.<sup>36</sup>

31 EWI (2021)

32 StAU (2021)

33 BDI (2021)

34 EWI (2021)

35 EWI (2021)

36 ebd.

## 4 Aktuelle Forschungs- und Pilotprojekte

Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten rund um den Einsatz von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, NE-Metall- und Papierindustrie haben in den letzten zwei Jahren deutlich an Fahrt aufgenommen. Die hier aufgeführten Projekte zeigen auch die Vielfältigkeit der Fragestellungen und Herausforderungen, mit welchen die Branchen konfrontiert sind, und zeigen zeitgleich, dass Wasserstoff in immer mehr Branchen als eine mögliche Option zur Dekarbonisierung bestimmter Prozesse gesehen wird.

### HYGLASS

Wasserstoffnutzung in der Glasindustrie als Möglichkeit zur Reduzierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Einsatzes erneuerbarer Gase – Untersuchung der Auswirkungen auf den Glasherstellungsprozess und Analyse der Potenziale in NRW

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel, die Möglichkeiten des Einsatzes von grünem Wasserstoff in der Glasindustrie darzustellen. Im Rahmen des Projekts werden die einzelnen Prozessschritte entlang der gesamten Glasherstellungskette charakterisiert und Möglichkeiten, Wasserstoff zu integrieren, skizziert. Darüber hinaus werden Untersuchungen des Einflusses von Wasserstoffbeimischungen und reiner Wasserstoffanwendung auf die Glasqualität an einem Versuchsofen durchgeführt sowie das Verbrennungsverhalten bei Zumischung von Wasserstoff (Erdgas-Wasserstoff-Mischungen) im Glasmelzofen anhand von Simulationen charakterisiert. Außerdem wird eine Potenzialanalyse mittels GIS zur Ermittlung vorhandener und potenzieller Standorte mit Wasserstoffquellen in NRW durchgeführt, und abschließend soll eine Darstellung möglicher CO<sub>2</sub>-Ersparnisse für die betrachteten Szenarien erstellt werden. Das Projekt wird umgesetzt vom Bundesverband Glasindustrie e.V. (bvGlas) und dem Gas- und Wärmeinstitut Essen

e.V. (gwi). Die Projektlaufzeit beträgt 1,5 Jahre (07.2020 bis 12.2021). Gefördert wird das Projekt durch das Land NRW im Rahmen der In4Climate-Initiative.<sup>37, 38</sup>

### H2-GLAS

Wasserstoffzumischung ins Erdgas als Chance zur Minderung der brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Auswirkung auf den Glasherstellungsprozess

Das Forschungsprojekt hat zum Ziel, den Einfluss von Wasserstoffbeimischungen (Erdgas-Wasserstoff-Mischungen) auf verschiedene Prozessschritte der Glasherstellung und auf die Glasqualität mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen zu ermitteln. Im Rahmen des Projekts sollen das Verbrennungsverhalten unter Beimischung von Wasserstoff in Air-Fuel- und Oxy-Fuel-Anwendungen sowie beim Einsatz von Vormischbrennern im Feeder charakterisiert und die möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparungen für verschiedene Szenarien dargestellt werden. Abschließend sollen anhand der Ergebnisse Handlungsempfehlungen und Lösungsmöglichkeiten abgeleitet werden, von welchen insbesondere auch kleine und mittlere Unternehmen ohne eigene Forschungsmöglichkeiten profitieren sollen. Das Projekt wird umgesetzt vom Gas- und

37 BVGlas (2021b)

38 GWI (2020)

Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) und dem Institut der Hüttentechnischen Vereinigung, der Deutschen Glasindustrie e.V. (HVG-DGG), hat eine Laufzeit von gut zwei Jahren (04.2021 bis 06.2023) und wird gefördert durch das Forschungsnetzwerk Mittelstand im Auftrag des BMWK.<sup>39, 40</sup>

## MIGWA

Mikrowelle-Glas-Wasserstoff – CO<sub>2</sub>-Einsparung bei der Glasherstellung durch neuartige und klimaschonende Beheizung

Ziel des Forschungsprojekts MiGWA ist es, zwei neuartige Technologien für die Glasherstellung – eine Beheizung über Mikrowellenstrahlung und eine Beheizung über Wasserstoffbrenner in Schmelze und Heißnachverarbeitung – zu untersuchen. Im Rahmen des Projekts sollen die möglichen Auswirkungen dieser Verfahren auf die Schmelz- und Umformungsprozesse, auf die Emissionen und auch auf Glaseigenschaften analysiert werden. Es sollen zunächst effiziente und schadstoffarme H<sub>2</sub>-Oxy-Brenner und Mikrowellen-Strahler zur gerichteten MW-Einkopplung in die Glasschmelze entwickelt werden, um durch die Substitution fossiler Energieträger die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren zu können. Nach erfolgreicher Entwicklung sollen die entwickelten Technologien anschließend an produktionsnahen Anlagen (Technikumsmaßstab) demonstriert werden. Das Projekt wird von der Schott AG in Zusammenarbeit mit dem Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI) und der Technischen Universität Bergakademie Freiberg umgesetzt. Die Projektlaufzeit beträgt drei Jahre (01.2021 bis 12.2023). Gefördert wird das Projekt im Rahmen der Fördermaßnahme „KlimPro-Industrie – Vermeidung von klimaschädlichen Prozessemissionen in der Industrie“ der FONA-Strategie durch das BMBF.<sup>41, 42</sup>

## CO<sub>2</sub>-NEUTRALES BRENNEN

von keramischen Erzeugnissen unter Wasserstoffatmosphäre

In seinem Forschungsvorhaben „CO<sub>2</sub>-neutrales Brennen von keramischen Erzeugnissen unter Wasserstoffatmosphäre“ will das Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH (IAB) das Brennen keramischer Erzeugnisse mittels Wasserstoff genauer untersuchen. Insbesondere stehen die Veränderung der Gasatmosphäre bei der Nutzung von Wasserstoff als Prozessgas, die Auswirkungen auf das Produkt und die Entwicklung schädlicher Emissionen im Fokus der Untersuchungen. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse soll dann ein Konzept für die Verfahrenstechnik entwickelt werden. Die Projektlaufzeit beträgt zwei Jahre. Gefördert wird das Projekt im Rahmen des Corona-Sonderförderprogramms „FuE-Schub“ durch das Land Thüringen mit Mitteln aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).<sup>43, 44</sup>

## H<sub>2</sub>-ZIEGEL

Energieeffizienz und Emissionsreduzierung – Einsatz von Wasserstoff in der Ziegelindustrie

Im Forschungsprojekt H<sub>2</sub>-Ziegel wird der Einsatz von Wasserstoff oder dessen Beimischung in den Ofenanlagen der Ziegelindustrie untersucht. Im Rahmen des Projekts werden Untersuchungen und Tests zum Brennersystem durchgeführt, die Auswirkungen des veränderten Brennverhaltens auf das Produkt und die Emissionen untersucht, an einer realen Anlage erste Teile umgesetzt, um daraus abschließend Empfehlungen zum Brennersystem und zum Prozess für die Nutzung von

39 GWI (2021a)

40 AiF (2021)

41 BMBF (2021a)

42 GWI (2021b)

43 Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (2021)

44 IAB (2021)

Wasserstoff ableiten zu können. Beteiligte Forschungseinrichtungen sind VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, KELLER HCW GmbH, Kueppers Solutions GmbH, Klinkerwerk Hagemeister GmbH & Co. KG und das Institut für Ziegelforschung Essen e.V. Die Projektlaufzeit beträgt drei Jahre (07.2021 bis 07.2024). Gefördert wird das Projekt durch das Land Nordrhein-Westfalen beim Projektträger Jülich.<sup>45</sup>

### AURUBIS

#### Kupferanoden mit Wasserstoff

Im Mai 2021 startete der Multimetallhersteller Aurubis in seinem Hamburger Werk eine erste Testreihe zum Einsatz von Wasserstoff im Anodenofen. Der erste Pilotversuch, bei dem das bisher eingesetzte fossile Erdgas durch Wasserstoff und Stickstoff ersetzt wurde, verlief planmäßig. Zunächst wurden die Reaktion der Anlagen und der störungsfreie Verlauf mit dem Einsatz von Wasserstoff getestet. Im Rahmen der Testreihe sollen langfristig die Bedingungen für den Einsatz von Wasserstoff im Anodenofen ermittelt werden und prozess-technische Erfahrungen auch für die weiteren Aktivitäten von Aurubis im Bereich Wasserstoff gesammelt werden. Das Einsparpotenzial schätzt das Unternehmen auf 6.200 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr allein im Hamburger Werk. Gefördert wird das Projekt im Rahmen der Reallabore „Norddeutsches Reallabor; Teilvorhaben: 9.1 Wasserstoffeinsatz in der Kupferproduktion“ durch das BMWK. Das Projekt wird auch durch die Behörde für Wirtschaft und Innovation der Hansestadt Hamburg finanziell unterstützt.<sup>46, 47</sup>

### PALM GMBH

#### Weltweit erster Einsatz einer H<sub>2</sub>-ready Gasturbine in der Papierindustrie

Die Papierfabrik Palm GmbH hat an ihrem Standort in Wörth über 100 Mio. Euro in die Modernisierung des Kraftwerks investiert. Die Besonderheit ist, dass das neue Kraftwerk das weltweit erste Exemplar eines neu entwickelten Gasturbinentyps von Siemens erhält, der zukünftig neben Erdgas auch mit einer Beimischung von bis zu 50 Prozent Wasserstoff betrieben werden kann.<sup>48</sup>

### ESSITY

#### Nutzung von grünem Wasserstoff im industriellen Maßstab in der Papierherstellung

Mit dem Ziel, eine Papiermaschine mit grünem Wasserstoff zu betreiben, hat Essity in ihrem Werk in Mainz-Kostheim ein Pilotprojekt gestartet für das eine Papiermaschine so umgerüstet wurde, dass die Brenner der Trocknungseinheit mit 100 Prozent Wasserstoff betrieben werden können. Ziel ist es, 2022 bei laufender Produktion sukzessive Erdgas durch grünen Wasserstoff zu ersetzen. Der Kooperationspartner Mainzer Stadtwerke AG liefert den dafür benötigten Wasserstoff und das Land Hessen fördert das Projekt zur CO<sub>2</sub>-freien Papierherstellung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung. In der Papierindustrie ist es das erste Projekt zur Nutzung von grünem Wasserstoff in dieser Größenordnung.<sup>49</sup>

45 IZF (2021)

46 PtJ (2021)

47 Aurubis (2021)

48 Palm (2020)

49 Essity (2021)



**REINVENT**

Vernetzungs- und Transferprojekt: Reduzierung von Treibhausgasen durch Prozessinnovationen in der Grundstoffindustrie

Das Forschungsprojekt ReInvent dient zur Vernetzung der in der BMBF-Fördermaßnahme KlimPro-Industrie geförderten Vorhaben und soll Synergien identifizieren und den branchenübergreifenden Austausch fördern. Durch die Vernetzung und den Wissenstransfer zwischen den energie- und emissionsintensiven Grundstoffindustrien, die im Rahmen der Transformation alle vor komplexen Herausforderungen bei der Umstellung von Prozessen stehen, soll ein schnellerer Markteintritt der entwickelten Technologien erreicht werden.<sup>50</sup>

**INNOGUSS**

Transformationspfade zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Gießerei-Industrie

Im Forschungsprojekt InnoGuss sollen die spezifischen technischen, wirtschaftlichen und politischen Randbedingungen für die Transformation von Eisen-, Stahl-, Leichtmetall- und Buntmetallgießereien in Nordrhein-Westfalen identifiziert werden. Anhand von Modellgießereien werden im Rahmen des Projekts innovative Transformationspfade zu emissionsarmen Prozessen entwickelt und mögliche Zwischenschritte identifiziert. Unter anderem wird auch der Einsatz von Erdgas-Wasserstoff-Gemischen untersucht und Anforderungen an eine zukünftige Versorgungsinfrastruktur werden abgeleitet. Das Projekt wird im Rahmen von In4Climate.NRW durch das Land Nordrhein-Westfalen gefördert und hat eine Laufzeit von zwei Jahren (03.2021 bis 03.2023).<sup>51, 52</sup>

**GIESSEREI G.A. RÖDERS**

Wasserstoffbetriebener Tiegelschmelzofen für Aluminium

Gemeinsam mit der Universität Braunschweig, dem Institut für Schweißtechnik, Bohai Trimet Automotive, ChemTrend, Netco Professionals und Neo hydrogen Sensors entwickelt die Soltauer Gießerei Röders den ersten wasserstoffbetriebenen Tiegelschmelzofen für Aluminium. Insgesamt investieren die Partner 3 Millionen Euro in das Projekt, davon werden 1,5 Millionen Euro vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert.<sup>53</sup>

**Weitere Aktivitäten im europäischen Ausland****ORANGE.BAT**

Umstellung der spanischen Keramikindustrie in der Region Valencia auf Wasserstoff<sup>54</sup>

**HYPLA**

Hydrogen plasma for CO<sub>2</sub>-free metal production: Forschung zur Substitution von Kohlenstoff durch Wasserstoff in der Silizium- und Mangan-Produktion in Norwegen<sup>55</sup>

**HYFLEXPOWER**

Weltweit erste integrierte Power-to-X-to-Power-Demonstrationsanlage mit Wasserstoffgasturbine und Einbindung der Papierindustrie in Saillat-sur-Vienne, Frankreich<sup>56</sup>

50 BMBF (2021b)

51 NRW.Energy4Climate (2021b)

52 BDG (2021)

53 Alu-web (2022)

54 VDI (2021)

55 Sintef (2021)

56 Siemens (2020)

## 5 Ergebnisse des Dialogs: Herausforderungen und Handlungsoptionen

*Im Rahmen des Industriedialogs „Effiziente Nutzung von Wasserstoff in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie“ wurden die wichtigsten Herausforderungen identifiziert. In Bezug auf den Einsatz von Wasserstoff sind Transformationsherausforderungen oft sehr branchen- bzw. sogar unternehmensspezifisch. Es gibt aber auch Schnittstellen und branchenübergreifende Forderungen, dazu zählen in erster Linie Versorgungssicherheit und langfristige Rahmenbedingungen.*

Grundsätzlich muss jede Branche ihre eigenen technologischen Lösungen finden, um fossile Brennstoffe, in der Regel Erdgas, zu ersetzen. Dafür ist bei Niedrigtemperaturprozessen meist die Elektrifizierung die geeignetste Lösung, für Hochtemperaturprozesse gibt es teils die Möglichkeit, Strom oder Wasserstoff einzusetzen, mitunter sogar als Hybridlösung, teils kommt nur Wasserstoff infrage.

Technische Herausforderungen für den Wasserstoffeinsatz zur Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme in der Glas-, Keramik- und NE-Metallindustrie entstehen oft durch den direkten Kontakt der Flamme mit dem Produkt, u. a. aufgrund der erhöhten Flammgeschwindigkeit und Temperatur. Auch erhöhte Wasserdampfgehalte im Rauchgas können für die Feuerfest-Materialien in den Öfen eine erhöhte Belastung darstellen.

Insbesondere bei großen Anlagen sind im Kontext der Umrüstung auf Wasserstoff die langen Investitionszyklen von 15 bis 20 Jahren bei großen Schmelzwannen in der Glasindustrie und bis zu 40 Jahren bei großen Tunnelöfen in der Keramikindustrie eine Herausforderung. Sämtliche Investitionsentscheidungen müssten heute schon mit Blick auf das Ziel Klimaneutralität 2045 getroffen werden, die Anlagen sind jedoch aktuell noch in der Entwicklung (typische TRL 4 – 5<sup>57</sup>) und noch

nicht für einen großtechnischen Einsatz skaliert. Darüber hinaus besteht durch neue Anlagen (durch die Anforderungen des Zubaus/Umbaus im laufenden Betrieb) bzw. auch durch die Entkoppelung von Prozessen (wie in der Ziegelindustrie geplant) ein erhöhter Platzbedarf.

Sowohl für die großflächige Elektrifizierung von Prozessen, aber insbesondere auch für den Einsatz von grünem Wasserstoff in den Industriebranchen sind ein gezielter Aufbau von Infrastrukturen zur Energieübertragung sowie die Bereitstellung ausreichender Energiemengen dringend erforderlich.

Neben diesen übergeordneten Transformationsherausforderungen wurden auch einige konkrete Probleme identifiziert, die eine Dekarbonisierung der teilnehmenden Branchen erschweren. Diese Probleme werden mit passenden Handlungsoptionen im Folgenden kurz dargelegt.

### Herausforderung

*Trotz zunehmender Forschungsaktivität sind Technologien für Dekarbonisierung meist noch nicht marktreif. Hohe Anforderungen zur Beantragung von Förderprogrammen, welche nach Aussage der Dialogteilnehmer vor allem für KMU schwer zu realisieren sind, erschweren die Forschungsaktivitäten.*

Zudem wurden in der Glas- und Keramikindustrie nach Branchenaussagen zuletzt viele Förderanträge abgelehnt.

Ein weiteres generelles Hindernis ist die Beschränkung der Forschungsförderung auf einmalige Investitionsanteilszuschüsse. Unternehmen benötigen aber insbesondere marktfähige Betriebskosten, um langfristig konventionelle Technologien durch Dekarbonisierungstechnologien ersetzen zu können. Pilotprojekte werden daher nach der Förderung teilweise wieder eingestellt.

### Handlungsoption

Die Förderung von Forschungs- und Pilotprojekten sollte verbessert werden, indem eine sinnvolle Verknüpfung mit Ansätzen zur Erreichung marktfähiger Betriebskosten (Leitmärkte, Quoten, CCfD und CO<sub>2</sub>-Bepreisung) hergestellt wird. KMU sollten gezielt bei Forschungsvorhaben unterstützt werden, u. a. durch eine Reduzierung der Anforderungen zur Fördermittelbeantragung. Die Förderung sollte grundsätzlich technologieoffen ausgestaltet sein (nicht ausschließlich auf Wasserstoffanwendungen bezogen) mit dem Hauptziel, Treibhausgasemissionen zu reduzieren und langfristig Klimaneutralität zu erreichen. Die konkreten Ansprüche an Nachhaltigkeitskriterien könnten dabei nach Projektstatus differenziert werden: Bei Forschungsprojekten sollten sämtliche Beiträge zum Technologiehochlauf berücksichtigt werden, während dessen Pilotprojekte zur Hochskalierung von Anlagen schon Klimaneutralitäts-kompatibel konzipiert werden sollten, insbesondere, was verwendbare Energieträger betrifft. Für größere Demonstrationsprojekte sollten tatsächliche CO<sub>2</sub>-Einsparung schon im Projekt vorausgesetzt werden.

### Herausforderung

Nötige Investitionen werden aktuell aufgrund unsicherer Rahmenbedingungen und aufwendiger Genehmigungsverfahren nicht getätigt. Insbesondere für KMU kann eine langanhaltende Planungsunsicherheit massive wirtschaftliche Probleme bedeuten.

### Handlungsoption

Um die Transformation hin zur Klimaneutralität zu beschleunigen, sind neben langfristigen eindeutigen Rahmenbedingungen vor allem schnellere Genehmigungsverfahren für Energieeffizienz- und Dekarbonisierungsmaßnahmen zentral. Für KMU sind Transformationsfonds eine Option, Sicherheit während der Transformation zu ermöglichen.

### Herausforderung

Der Wunsch nach Carbon Contracts for Difference (CCfDs) zum Einsatz CO<sub>2</sub>-armer/-freier Technologie kommt auch aus den Branchen der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie. CCfDs werden dort als notwendige Voraussetzung für Investitionen in Wasserstofftechnologien gesehen, da die Betriebskosten beim Einsatz von Wasserstoff noch nicht wirtschaftlich sind. Zudem herrscht der Eindruck, dass die Wasserstoffbedarfe dieser Branchen aktuell in der Wasserstoffstrategie der Bundesregierung nicht ausreichend Berücksichtigung finden.

### Handlungsoption

Generell bedarf es in den Branchen wettbewerbsfähiger Betriebskosten und Geschäftsmodelle. CCfDs könnten auch für die benannten Industriebranchen etabliert werden; alternative oder ergänzende Instrumente sind aber auch steigende CO<sub>2</sub>-Preise, Leitmärkte und Quotenmodelle, in denen auch die öffentliche Hand eine Vorreiterrolle einnehmen kann.

Die Vor- und Nachteile der Einführung von CCfDs in die hier betrachteten Branchen sollen im Folgenden nochmals gegenübergestellt werden:

Carbon Contracts for Difference gewährleisten Investitionssicherheit und ermöglichen damit einen zeitnahen Technologiehochlauf. Da Investitionszyklen in den benannten Branchen oft sehr lang sind, können sie dadurch auch zur Vermeidung von Stranded Assets beitragen.

Gegen eine zeitnahe Einführung von CCfDs für Wasserstofftechnologien in der Glas-, Keramik-, Papier- und NE-Metallindustrie sprechen die mittelfristig begrenzte Verfügbarkeit von H<sub>2</sub> und der größere CO<sub>2</sub>-Einspareffekt in der Stahl- und Chemiebranche. Da perspektivisch H<sub>2</sub> günstiger und CO<sub>2</sub> teurer werden wird, werden Dekarbonisierungsprojekte in Zukunft auch zunehmend wirtschaftlicher und könnten somit von Unternehmen selbst getragen werden. Hinzu kommt, dass in einigen Branchen (s. o.) noch keine marktreifen Wasserstofftechnologien zur Verfügung stehen. Zudem sind die benannten Branchen sehr kleinteilig und haben in sich z.T. sehr differenzierte Wertschöpfungsprozesse. Dies erschwert die Ausgestaltung, Ausschreibung und Durchführung von passenden CCfDs.

### Herausforderung

*Mineralogische Prozesse sollen nach dem aktuellen Entwurf aus der Energiesteuerbefreiung fallen. Dies macht Elektrifizierung unattraktiv, obwohl diese eine der wichtigsten Dekarbonisierungsoptionen ist.*

### Handlungsoption

Das Energie-Marktdesign sollte so gestaltet werden, dass die notwendigen Gestaltungsspielräume für Dekarbonisierungs- und Effizienzmaßnahmen ermöglicht werden.

### Herausforderung

*Für das Auslösen von Investitionen in Unternehmen fehlt es an Planungssicherheit und Klarheit über den Infrastrukturausbau (wo und wann) und die mögliche Preisentwicklung von Wasserstoff.*

### Handlungsoption

Im ersten Schritt ist eine umfassende Standortanalyse erforderlich, um potenzielle Wasserstoffbedarfe in Verbrauchszentren bzw. entlang von Verbrauchskorridoren zu identifizieren. Im zweiten Schritt müssen diese strategisch an ein deutschlandweites Wasserstoffnetz angeschlossen werden. Dabei sind eine enge Abstimmung mit allen beteiligten Stakeholdern und ein konkreter Zeitplan unumgänglich, um Planungssicherheit beim Anstoß von Dekarbonisierungsmaßnahmen zu gewährleisten. Die Notwendigkeit einer abgestimmten und langfristigen Strategie wird besonders in der Frage der Umrüstung bestehender Fern- und Verteilnetzleitungen deutlich, da ein Wechsel des durchgeleiteten Gases eine bereits vollendete Anpassung der Prozessbedingungen aller Endverbraucher voraussetzt.

# Literaturverzeichnis

**AiF (2021) | Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V.:** Wasserstoffzumischung ins Erdgas als Chance zur Minderung der brennstoffbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen und Auswirkung auf den Glasherstellungsprozess. Köln. 2021. Online unter: <https://igf.aif.de/innovationsfoerderung/industrielle-gemeinschaftsforschung/igf-steckbrief.php?id=24915&suchtext=21745%20N>

**Alu-Web (2022) | Alu-Web:** Gießerei entwickelt Wasserstoffbetriebenen Schmelzofen. 2022. Online unter: <https://alu-web.de/giesserei-entwickelt-wasserstoffbetriebenen-schmelzofen/>

**Ariadne (2021) | Kopernikus-Projekt Ariadne (2021):** Ariadne-Report – Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich. Potsdam. 2021. Online unter: <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>

**Aurubis (2021) | Aurubis AG:** Aurubis: Erste Kupferanoden mit Wasserstoff produziert – Pressemitteilung vom 21.05.2021. Hamburg. 2021. Online unter: <https://aurubis.com/medien/pressemitteilungen/pressemitteilungen-2021/Aurubis--Erste-Kupferanoden-mit-Wasserstoff-produziert0>

**BDG (2021) | Bundesverband der Deutschen Gießerei-Industrie e. V. (BDG):** Projekt InnoGuss – Transformationspfade zur CO<sub>2</sub>-Reduktion in der Gießerei-Industrie. Düsseldorf. 2021. Online unter: [https://www.guss.de/impressum?frontend\\_editing\\_enabled=true&cHash=8c7cb060680b6690aa761f6a3239d26b](https://www.guss.de/impressum?frontend_editing_enabled=true&cHash=8c7cb060680b6690aa761f6a3239d26b)

**BDI (2021) | Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (Hrsg.) (BDI):** KLIMAPFADE 2.0 – Ein Wirtschaftsprogramm für Klima und Zukunft. Gesamtstudie: Textversion zur Information vorab. Berlin. 2021. Online unter: <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-2-0-ein-wirtschaftsprogramm-fuer-klima-und-zukunft/>

**BMBF (2021a) | Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Fona Fördermaßnahmen – MiGWa – Innovative Technologien zur Vermeidung von CO<sub>2</sub> in der Glasproduktion. Berlin. 2021. Online unter: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/KlimPro/migwa.php>

**BMBF (2021b) | Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF):** Fona Fördermaßnahmen – ReInvent – Vernetzungs- und Transferprojekt. Berlin. 2021. Online unter: <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/KlimPro/reInvent.php>

**BMWi (2019a) | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.):** Energiewende in der Industrie – Branchensteckbrief der Glasindustrie. Berlin. 2019. Online unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

**BMWi (2019b) | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.):** Energiewende in der Industrie – Branchensteckbrief der Keramikindustrie. Berlin. 2019. Online unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-keramik.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-keramik.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

**BMWi (2019c) | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.):** Energiewende in der Industrie – Branchensteckbrief der Papierindustrie. Berlin. 2019. Online unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-papier.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-papier.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

**BMWi (2019d) | Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (Hrsg.):** Energiewende in der Industrie – Branchensteckbrief der NE-Metallindustrie. Berlin. 2019. Online unter: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-metall.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-metall.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

**Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie (2021) | Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V. (Hrsg.):** Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland. Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche bis 2050. Berlin. 2021. Online unter: [https://www.ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel\\_24\\_110321\\_Web\\_200dpi\\_1.pdf](https://www.ziegel.de/sites/default/files/2021-03/Ziegel_24_110321_Web_200dpi_1.pdf)

**BVGlas (2021a) | Bundesverband Glasindustrie e. V. (bvGlas):** Jahresbericht 2020. Online unter: [https://www.bvglas.de/media/Facts\\_and\\_figures/Jahresberichte/Jahresbericht\\_BVGlas\\_2020.pdf](https://www.bvglas.de/media/Facts_and_figures/Jahresberichte/Jahresbericht_BVGlas_2020.pdf)

**BVGlas (2021b) | Bundesverband Glasindustrie e. V. (bvGlas):** HyGlass – Wasserstoffeinsatz in der Glasindustrie. Düsseldorf. 2021. Online unter: <https://www.bvglas.de/dekarbonisierung/hyglass-wasserstoffeinsatz-in-der-glasindustrie/>

**dena (2021) | Deutsche Energie-Agentur GmbH (Hrsg.) (dena):** dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Berlin. 2021. Online unter: [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht\\_dena-Leitstudie\\_Aufbruch\\_Klimaneutralitaet.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf)

**DIE PAPIERINDUSTRIE (2021) | DIE PAPIERINDUSTRIE:** Leistungsbericht PAPIER 2021. Bonn. 2021. Online unter: <https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik/papier-2021-herunterladen>

**Essity (2021) | Essity GmbH:** CO<sub>2</sub>-frei mit grünem Wasserstoff – Pressemitteilung vom 26.10.2021. Ismaning/Kostheim. 2021. Online unter: <https://www.essity.de/presse/pressemitteilungen/2021/co2-frei-mit-gruenem-wasserstoff/>

**EWI (2021) | Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) (2021):** dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 – Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Datenanhang Ergebnisse. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

**FEVE (2021) | The European Container Glass Federation (FEVE) (2021):** The Furnace for the Future.  
Online unter: <https://feve.org/about-glass/furnace-for-the-future/>

**GWI (2020) | Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI):** Projektsteckbrief – HyGlass. Essen. 2020.  
Online unter: [https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe\\_lfd\\_Projekte/Jahr\\_2020/Projektsteckbrief\\_HyGlass\\_aktuell.pdf](https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd_Projekte/Jahr_2020/Projektsteckbrief_HyGlass_aktuell.pdf)

**GWI (2021a) | Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI):** Projektsteckbrief – H2-Glas. Essen. 2021.  
Online unter: [https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe\\_lfd\\_Projekte/Jahr\\_2021/Projektsteckbrief\\_H2-Glas.pdf](https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd_Projekte/Jahr_2021/Projektsteckbrief_H2-Glas.pdf)

**GWI (2021b) | Gas- und Wärme-Institut Essen e.V. (GWI):** Projektsteckbrief – MiGwa. Essen. 2021.  
Online unter: [https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe\\_lfd\\_Projekte/Jahr\\_2021/Steckbrief\\_MiGwa.pdf](https://www.gwi-essen.de/fileadmin/dateien/pdf/Forschung/Steckbriefe_lfd_Projekte/Jahr_2021/Steckbrief_MiGwa.pdf)

**IAB (2021) | Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH (IAB) (2021):** EFRE-Förderung zum CO<sub>2</sub>-neutralen Brennen von keramischen Erzeugnissen unter: Wasserstoffatmosphäre. Pressemitteilung vom 01.04.2021.  
Online unter: <https://www.iab-weimar.de/efre-foerderung-co2-neutrales-brennen-von-keramischen-erzeugnissen-unter-wasserstoffatmosphaere/>

**IZF (2021) | Institut für Ziegelforschung Essen e.V. (IZF) (2021):** Energieeffizienz und Emissionsreduzierung.  
Online unter: <https://www.izf.de/Kurzbericht%20Homepage%20H2-Ziegel%20IZF.pdf>

**KEI (2021a) | Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH – Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI):** Glasindustrie. Cottbus. 2021.  
Online unter: <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/glasindustrie/>

**KEI (2021b) | Zukunft – Umwelt – Gesellschaft (ZUG) gGmbH – Kompetenzzentrum Klimaschutz in energieintensiven Industrien (KEI):** Keramikindustrie. Cottbus. 2021.  
Online unter: <https://www.klimaschutz-industrie.de/themen/keramikindustrie/>

**NRW.Energy4Climate (2021a) | NRW.Energy4Climate GmbH:** Best Practice – HyGlass. 2021.  
Online unter: <https://www.in4climate.nrw/best-practice/2020/hyglass/>

**NRW.Energy4Climate (2021b) | NRW.Energy4Climate GmbH:** Best Practice – InnoGuss. 2021.  
Online unter: <https://www.in4climate.nrw/best-practice/projekte/2021/innoguss/>

**Palm (2020) | Papierfabrik Palm GmbH & Co KG:** Investitionen für zukunftsweisende Technologien bei der Papierfabrik Palm in Wörth am Rhein – Pressemitteilung vom 21.09.2020. Aalen. 2020.  
Online unter: <https://www.palm.de/aktuelles/nachrichten/artikel/investitionen-fuer-zukunftsweisende-technologien-bei-der-papierfabrik-palm-in-woerth-am-rhein.html>

**PtJ (2021) | Projektträger Jülich (PtJ):** enargus Förderprojekte – Reallabor: NRL Norddeutsches Reallabor; Teilvorhaben: 9.1 Wasserstoffeinsatz in der Kupferproduktion. Jülich. 2021.  
Online unter: <https://www.enargus.de/detail/?id=2667102>

**Siemens (2020) | Siemens AG: HYFLEXPOWER:** Weltweit erste integrierte Power-to-X-to-Power-Demonstrationsanlage mit Wasserstoffgasturbine – Pressemitteilung vom 29.05.2020.  
Online unter: <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/hyflexpower-weltweit-erste-integrierte-demonstrationsanlage-einer-power-x-power>

**Sintef (2021) | Sintef:** HyPla – Hydrogen plasma for CO<sub>2</sub>-free metal production. 2021.  
Online unter: <https://www.sintef.no/en/projects/2020/hypla-hydrogen-plasma-for-co2-free-metal-production/>

**StAU (2021) | Stiftung Arbeit und Umwelt der IG BCE (Hrsg.) (2021):** Branchenausblick 2030+: Die Papier- und Zellstoffindustrie. Berlin.  
Online unter: [https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/Branchenausblick-Papierindustrie\\_StiftungIGBCE.pdf](https://www.arbeit-umwelt.de/wp-content/uploads/Branchenausblick-Papierindustrie_StiftungIGBCE.pdf)

**Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (2021) | Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft (2021):** IAB Weimar erweitert Infrastruktur für neuartige Produktionsverfahren – Pressemitteilung vom 23.03.2021. Erfurt. 2021.  
Online unter: <https://wirtschaft.thueringen.de/ministerium/pressexservice/detailseite-1/iab-weimar-erweitert-infrastruktur-fuer-neuartige-produktionsverfahren>

**VDI (2021) | VDI Fachmedien GmbH & Co. KG Unternehmen für Fachinformationen:** Energiewende in Spanien – Zwei Großprojekte für grünen Wasserstoff. Beitrag in BWK Energie vom 19.02.2021. Düsseldorf.  
Online unter: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/bwk/erneuerbare-energien/zwei-grossprojekte-fuer-gruenen-wasserstoff/>

**WVMetalle (2020a) | Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVMetalle):** Metallstatistik 2019. Berlin. 2020.  
Online unter: <https://www.wvmetalle.de/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=226990&token=6851e821a49c7e63641f455bd901d87f17dc9f83>



