

# Grüner Wasserstoff in der Industrie – kurzfristige Einsatzpotenziale und langfristige Bedarfe in Deutschland



Wuppertal Institut  
Clemens Schneider  
clemens.schneider@wupperinst.org

DLR  
Mareike Taube  
mareike.taube@dlr.de

Dr. Tom Lorenz  
tom.lorenz@dlr.de

Die Forschung der FVEE-Institute zum Einsatz von klimaneutral erzeugtem Wasserstoff in der Industrie deckt sowohl technische Aspekte für einzelne Prozesse ab als auch systemanalytische Betrachtungen, die die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff am einzelnen Standort oder für bestimmte Branchen in Deutschland bzw. Europa untersuchen.

Die Motivation zum Einsatz von Wasserstoff ergibt sich aus drei Gründen:

1. In der stofflichen Verwendung wird Wasserstoff als Molekül benötigt und kann deshalb auch nicht durch andere Energieträger substituiert werden. So wird Wasserstoff bereits heute in großen Mengen in der Ammoniaksynthese (Haber-Bosch-Verfahren) sowie in den Raffinerien benötigt (► *Abbildung 1*). Gerade im Hinblick auf diese beiden Einsatzzwecke ist in Deutschland jedoch eher von sinkenden Produktionsmengen und korrespondierend geringen Wasserstoffeinsatzmengen auszugehen. Im Falle der Raffinerien ist mit einem sinkenden Kraftstoffabsatz zu rechnen und im Falle von Ammoniak könnte eine klimafreundlichere Landwirtschaft mit gerin-

gerem Düngemiteleintrag im Verein mit guten Importmöglichkeiten von grünem Ammoniak dazu führen, dass die europäischen Produktionsmengen zurückgehen.

2. Eine weitere Verwendungsart für Wasserstoff ergibt sich aus seiner Fähigkeit, Sauerstoff aus Eisenerz chemisch zu binden. Beim Einsatz in Direktreduktionsanlagen kann Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt werden, um Eisenerz zu Roheisen zu reduzieren. Wasserstoff kann somit fossilen Koks als Reduktionsmittel ablösen. Im Unterschied zur stofflichen Verwendung ist Wasserstoff in dieser Hinsicht jedoch substituierbar, denn es sind auch andere Verfahren in der Entwicklung, mit denen Roheisen zumindest theoretisch klimaneutral hergestellt werden kann. Diese sind jedoch noch nicht technisch ausentwickelt (Eisenelektrolyse) oder unterliegen strengen Potenzialbeschränkungen (biomassebasierte Verfahren). Insofern ist Wasserstoff zumindest praktisch unvermeidbar, um die Stahlherzeugung in eine klimaneutrale Zukunft zu führen.

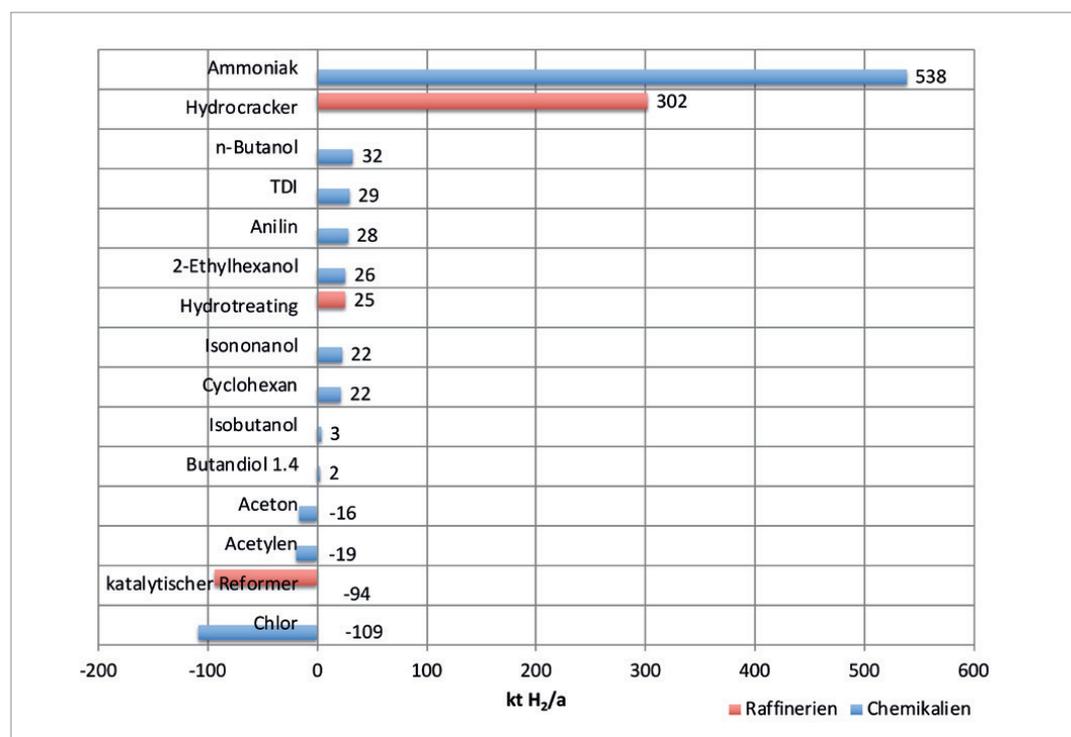


Abbildung 1  
Wasserstoffbilanz der deutschen Industrie im Jahr 2016  
(Modellrechnung Wuppertal Institut)

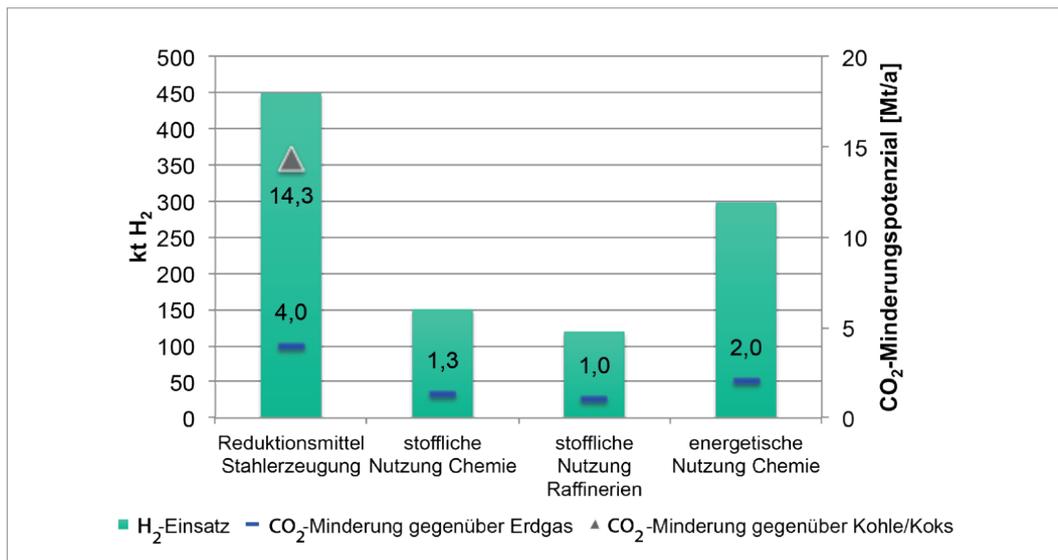


Abbildung 2

### Wasserstoffeinsatz 2030 in der KNDE-Studie und sein THG-Minderungshebel

(Wuppertal Institut, basierend auf [1])

3. Als dritte Option gerät die energetische Verwendung von Wasserstoff in der Industrie zunehmend in den Fokus der energiepolitischen Debatten. Hier steht Wasserstoff in einem klimaneutralen System direkt in Konkurrenz zu anderen Energieträgern wie Strom und Biomasse. Für Wasserstoff spricht hier neben seiner Speicherbarkeit, dass die heute sehr weit verbreiteten Erdgaskessel und Industrieöfen mit neuen Brennern ausgerüstet werden können, ohne dass die Anlagen komplett neu reinvestiert werden müssen, wie es bei einer Umstellung auf Strom der Fall wäre. Während die Umrüstung von Dampfkesseln vergleichsweise wenig aufwändig ist, kann Wasserstoff jedoch Erdgas oder andere chemische Energieträger in manchen Ofenprozessen nicht direkt ersetzen.

### Der Beitrag von Wasserstoff zur Erreichung der 2030-Ziele

Im Rahmen der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ [1] hat das Wuppertal Institut untersucht, welchen Beitrag der industrielle Einsatz von Wasserstoff zur Erreichung des Klimaschutzziels der Bundesregierung von minus 65% gegenüber 1990 und zur Klimaneutralität im Jahr 2045 leisten kann.

► **Abbildung 2** zeigt, dass der größte absolute und auch relative Hebel in der Substitution von Kohle und Koks in der Hochofenroute durch grünen Wasserstoff im Direktreduktionsverfahren besteht. (Hier mit angenommenem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Null). Die Substitution von Erdgas, sei es mittelbar durch den Ersatz von grauem Wasserstoff in der stofflichen Nutzung oder direkt in Verbrennungsprozessen (energetische Verwendung) bedeutet spezifisch, d. h. pro

eingesetzter Einheit Wasserstoff, einen deutlich geringeren Klimaschutzhebel.

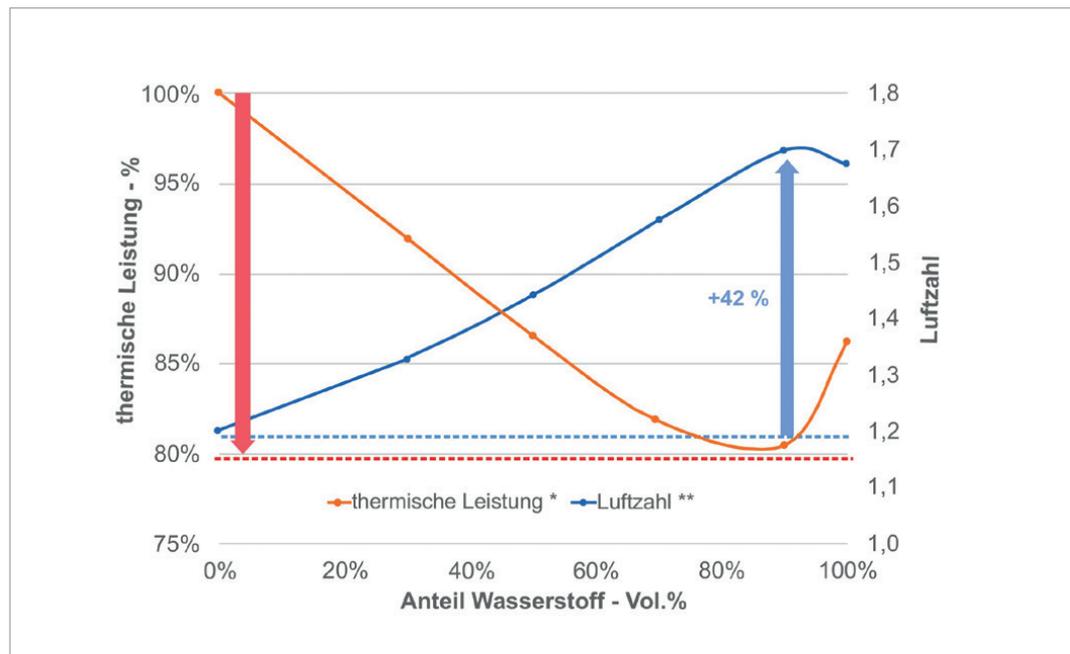
In absoluten Mengen sind die möglichen Beiträge zur Erreichung des Industrie-Sektorziels der Bundesregierung jedoch beträchtlich. Hier ist vor allem hervorzuheben, dass mit einem begrenzten Aufwand zum Aufbau einer Leitungsinfrastruktur sehr viel erreichbar ist, da nur sehr wenige einzelne Standorte an eine im Aufbau befindliche Wasserstoff-„backbone“-Infrastruktur angeschlossen werden müssen. Hinzu kommt, dass die Betreiber von Chemie- und Raffinerie-Standorten bereits über die notwendige technische und genehmigungsrechtliche Kompetenz zum Umgang mit dem Energieträger Wasserstoff verfügen. Insbesondere im Hinblick auf Machbarkeit und Akzeptanz ist ein früher Wasserstoffeinsatz in der energieintensiven Industrie somit deutlich robuster als in anderen Anwendungsfeldern.

### Technologische Herausforderungen und Chancen von Wasserstoff

Investitionen in Wasserstofftechnologien sind für Unternehmen mit hohen Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Verfügbarkeit und der relativen Preise verbunden. Ein flexibler Anlagenbetrieb, der z. B. saisonal oder konjunkturbedingt schwankenden relativen Preisen zwischen Erdgas und Wasserstoff Rechnung trüge, ist jedoch aus mehreren Gründen unwahrscheinlich:

Ein flexibler Wasserstoffeinsatz stellt besondere Anforderungen an die Brennerfeuerung. Dies gilt nicht nur für Industrieanlagen, sondern ebenso für Raumheizungen. Ein Kubikmeter Wasserstoff beinhaltet nur etwa ein Drittel des Brennwertes des gleichen

Abbildung 3  
Auswirkungen der Wasserstoffbeimischung in Brennersystemen [2]



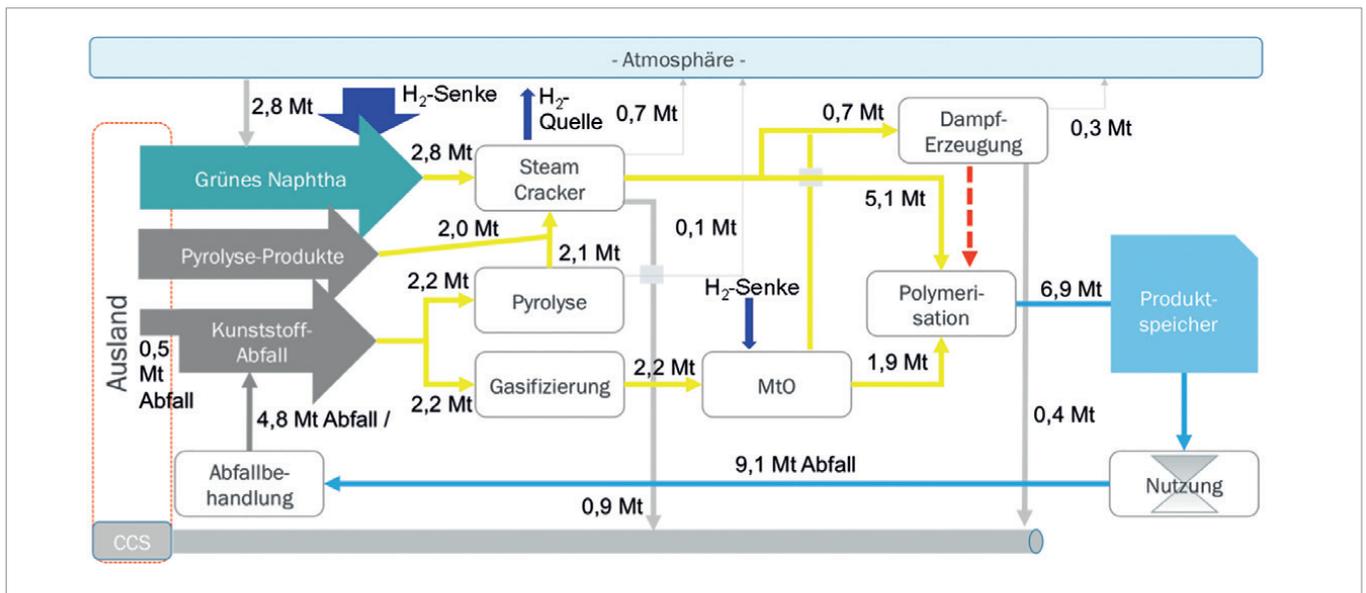
Volumens von Erdgas. Dies erfordert im entsprechenden Anwendungsfeld eine intelligente Brennerregelung (veränderte Wärmeübertragung und Wärme-freisetzung). Mit steigender Wasserstoffbeimischung erfolgt die Verbrennung mit höherem Luftanteil, dies führt zu Leistungs- und Effizienzverlust (► *Abbildung 3*). Darüber hinaus erfolgt die Verbrennung mit höherer Flammentemperatur, sodass die Bildung von Stickoxiden (NOx) begünstigt wird. Dies bedeutet neben der veränderten Abgaszusammensetzung und der höheren Kondensatbildung zusätzlichen Aufwand in Bezug auf die Abgasführung (externe Abgasrückführung).

Erhöhte oder auch saisonal schwankende Wasserstoffanteile im Erdgasnetz sind somit aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich. Das „Privileg“ zwischen Erdgas und Wasserstoff als Energieträger je nach Marktlage wählen zu können, wird wahrscheinlich nur wenigen Unternehmen wie den Stahlerzeugern offenstehen, für die sich ein doppelter Infrastrukturanschluss lohnt oder die gezielt in onsite-Elektrolyseanlagen investieren. Insofern ist eher davon auszugehen, dass Unternehmen Neuanlagen so auslegen, dass sie mit nur wenigen Anpassungen auf den neuen Brennstoff umsteigen können, sobald ihre Versorgung von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt wird.

Besondere technische Herausforderungen sind mit einem Wasserstoffeinsatz in der Mineralindustrie verbunden. Dort werden insbesondere in der Zement-, Kalk- und Glasindustrie hohe Prozesstemperaturen benötigt, die direkt auf das zu verarbeitende Material übertragen werden müssen. In den bestehenden

Öfen findet diese Übertragung direkt über die Brennerflamme statt. Für Produktqualität und Umsetzungsgeschwindigkeit sind deshalb Flammenlänge und Flammtemperatur entscheidende Parameter, weshalb der Wechsel des Energieträgers größere Anpassungen an den Anlagen oder sogar den Bau von Neuanlagen erforderlich macht. So erlauben die im Drehrohrofen zur Klinkererzeugung erforderlichen Prozesstemperaturen von 1400–1500°C aktuell noch keine vollständige Umrüstung auf neue Feuerungstechniken, eine Feuerung des Hauptbrenners mit ca. 10% H<sub>2</sub>-Beimischung ist jedoch auch in bestehenden Anlagen möglich [3].

Da die Mineralindustrie aufgrund ihrer prozessbedingten Emissionen (Entsäuerung des Kalksteins in der Zement- bzw. Aufschmelzen der Carbonate in der Glasindustrie) ohnehin künftig eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Infrastruktur benötigen wird, könnten auch zukünftig kohlenstoffhaltige Brennstoffe auf Basis von Abfall oder Biomasse dort eingesetzt werden. Trotz seiner prinzipiellen Eignung als Energieträger könnte die Rolle von Wasserstoff in diesem Anwendungsfeld deshalb begrenzt sein. Hybridkonzepte werden jedoch in Betracht gezogen und sind mittlerweile in Modellschmelzen erprobt [4]. Demonstratoren im realen industriellen Betrieb fehlen jedoch bisher. Neben Wasserstoff werden in der Mineralindustrie auch Verfahren der Direktelektrofizierung erprobt, im Hybridbetrieb z. B. für Glaswannen [5].



### Herausforderungen für Standorte

Die Einführung von grünem Wasserstoff bringt je nach Standort unterschiedliche Herausforderung mit sich. Geografisch bzw. infrastrukturell weniger begünstigte Standorte sind auf eine onsite-Stromerzeugung mit Wasserelektrolyse angewiesen. Das DLR erkundet derzeit im Projekt DIO zur Dekarbonisierung der Industrie in Ost-Brandenburg die Möglichkeiten zum Einsatz von Wasserstoff an entsprechenden Standorten.

Technische Voraussetzungen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff sind Potenziale zur Nutzung von erneuerbaren Energien, vorhandene Flächen für den Aufbau von Elektrolyseuren sowie die Wasserverfügbarkeit (Wasserreservoir, Anbindung an die lokale Wasserversorgung).

Weitere begünstigende Faktoren für Standorte sind geeignete geologische Formationen zur Speicherung des Wasserstoffs sowie Verwendungsmöglichkeiten für Sauerstoff und Abwärme als zentrale Kuppelprodukte der Elektrolyse im Rahmen einer industriellen Symbiose. Die Herausbildung von unternehmensübergreifenden regionalen Wasserstoff-Clustern verspricht deshalb große Synergien.

Für die industrielle Nutzung von Wasserstoff sind jedoch auch rechtliche Hürden zu überwinden. Hierzu zählen neben baurechtlichen Bestimmungen, die Einhaltung von Umweltschutzauflagen aber auch die Genehmigungsfähigkeit der Wasserstoffspeicherung in geologischen Formationen. Entsprechendes Know-How muss in den Unternehmen noch aufgebaut werden, der Einbezug von Forschungseinrichtungen mit entsprechenden Schwerpunkten ist deshalb wichtig.

### Defossilisierung der chemischen Industrie

Während die Defossilisierung der Energieversorgung bereits mittelfristig geboten ist und mit klaren politischen Zielen hinterlegt ist, ist die Defossilisierung der stofflichen Versorgung mit Kohlenwasserstoffen in der politischen Diskussion, in Forschung und Szenarienliteratur noch häufig unterbelichtet.

Besondere Relevanz hat dieses Thema für die Kunststoffindustrie. Während die petrochemische Industrie auf die Möglichkeit verweist, auch Kohlenstoff fossiler Herkunft (wie Erdöl oder Ethan aus der Schiefergasförderung) im Rahmen von chemischem Recycling oder einer CO<sub>2</sub>-Nutzung im Kreis zu führen, wird hierbei übersehen, dass jede Substitution eines fossilen Kohlenstoffträgers durch einen erneuerbaren eine zusätzliche Senke für CO<sub>2</sub> darstellt. Der hieraus resultierende Minderungsbeitrag ist daher von der Kreisführung des eingesetzten Kohlenstoffs entkoppelt und steht somit für sich. Eine Kombination von Kreislaufführung und die Verwendung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre ermöglichen somit sogar negative Emissionen, da eine zusätzliche dauerhafte CO<sub>2</sub>-Senke entsteht.

Der mögliche Beitrag einer Defossilisierung der chemischen Industrie im Hinblick auf Klimaneutralität im Jahr 2050 wurde durch das Wuppertal Institut im Rahmen der Studie „Klimaneutrales Deutschland“ untersucht. ► **Abbildung 4** zeigt ein solches Szenario: Die aus der Atmosphäre entnommenen CO<sub>2</sub>-Mengen (ausgedrückt in einer äquivalenten Menge Kohlenstoff) sind insgesamt größer als die Emissionen. Grüner Wasserstoff wird sowohl für eine konsequente Kreislaufführung des Kohlenstoffs als auch für die Einbindung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre benötigt.

Abbildung 4  
**Zukünftiger Kohlenstoffkreislauf der „Petrochemie“**  
in der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2050“ [6]  
(Angaben in Mio. Tonnen Kohlenstoff, wo nicht anders angegeben)

Flüssige Kohlenwasserstoffe sind mit den bestehenden Infrastrukturen (Pipelines und Hochseetankschiffe) sehr gut und zu deutlich günstigeren Kosten transportierbar als reiner Wasserstoff. Angesichts deutlicher Potenzialbegrenzungen in Bezug auf erneuerbare Energien ist in Deutschland ein Import dieser Kohlenwasserstoffprodukte auch in Zukunft wahrscheinlich. Selbst in einer defossilierten chemischen Industrie läge der inländische Wasserstoffbedarf Deutschlands nach den Modellrechnungen des Wuppertal Instituts bei nur 20 TWh im Jahr 2045.

Im Projekt GreenFeed wird ein Konsortium aus den drei FVEE-Instituten Wuppertal Institut, Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ) und KIT (Institut für Technische Chemie) die Kohlenstoff- und Wasserstoffkreisläufe einer defossilierten chemischen Industrie gemeinsam mit Industriepartnern genauer untersuchen. Neben einer systemischen Beurteilung verschiedener Verfahren werden dabei Roadmaps für einzelne Chemiecluster erarbeitet.

## Literatur

- [1] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Studie im Auftrag von Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende.
- [2] Huber A. (2021) Auswirkungen von Wasserstoff und Erdgas-Wasserstoffgemischen auf Gasgebläsebrenner nach EN676 in der Industrie- und Prozesstechnik, In: Leicher, J., Giese, A., Petermann, H. [Hrsg.] Gasqualitäten im veränderten Energiemarkt, 2. Auflage, Vulkan Verlag.
- [3] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2020) Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Eine CO<sub>2</sub>-Roadmap für die deutsche Zementindustrie, Düsseldorf.
- [4] idw – Informationsdienst Wissenschaft (2021, 30. März) Glasherstellung mit Grünem Wasserstoff erstmals erfolgreich getestet. Kopernikus-Projekte für die Energiewende [Pressemitteilung]. <https://idw-online.de/de/news765880>
- [5] GlassOnline (2020, 14. April) The furnace of the future: a vision for climate neutral packaging [Pressemitteilung]. <https://www.glassonline.com/the-furnace-of-the-future-a-vision-for-climate-neutral-packaging/>
- [6] Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2020): Klimaneutrales Deutschland 2050.