

Stellungnahme zur rationalen Anwendung von (grünem) Wasserstoff in den Nachfragesektoren

Im Rahmen des Begleitforschungsprojektes EE4InG

Aktueller Stand: 26.09.2021



Autor:innen

PTW, TU Darmstadt:

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Astrid Weyand
Jessica Walther



IKFT, KIT:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Sauer
Philipp Haltenort



IREES GmbH:

Oliver Lösch
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Jochem
Dr. Jan Steinbach
Jana Deurer



ETA-Solutions GmbH:

Dr.-Ing. Philipp Schraml
Martin Beck



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
1. Problemstellung und Zielsetzung	2
2. Kurzzusammenfassung und Fazit	4
3. Nutzung von Wasserstoff in der Prozessindustrie (IREES und IKFT).....	5
3.1. Nutzung von Wasserstoff in der Stahlindustrie (IREES)	7
3.2. Nutzung von Wasserstoff in der chemischen Verfahrenstechnik (IKFT)	9
3.3. Potenzielle Nutzung von Wasserstoff in weiteren Prozessindustrien (IREES).....	10
4. Nutzung von Wasserstoff in der Fertigungstechnik (ETA-Solutions)	11
5. Nutzung von Wasserstoff im Gebäudesektor (IREES)	13
6. Nutzung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich (PTW)	15
Literaturverzeichnis.....	16

1. Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen des BMWi-geförderten Begleitforschungsprojektes EE4InG wurde die vorliegende Stellungnahme zum Thema Wasserstoff verfasst. Diese dient dazu, eine Einschätzung zur sinnvollen Anwendung von Wasserstoff mit Fokus auf Industrie und Gewerbe zu geben.

Die Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff als Sekundärenergieträger hat in den letzten Jahren einen erheblichen Schub in der öffentlichen (Politik, Wirtschaft und Wissenschaft) Aufmerksamkeit erfahren. Im Blickpunkt steht dabei vor allem die Energieträgerstruktur der Zukunft vor dem Hintergrund einer klimaneutralen Gesellschaft. Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, Vorreiter bei der Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff zu sein. Dies schlägt sich beispielsweise in der im Sommer 2020 verabschiedeten Nationalen Wasserstoffstrategie (BMWi, 2020) wieder, die Zielsetzungen und Maßnahmen für die Erzeugung und die potenziell nachfragenden Sektoren benennt. Auch bezüglich der Forschungsförderungspolitik schlägt die Thematik verstärkt durch, mit diversen neuen Förderprogrammen, konkreten F&E-Vorhaben, sowie einem im September 2020 gegründeten Forschungsnetzwerk Wasserstoff, das die bereits bestehenden Forschungsnetzwerke Energie des BMWi ergänzt und derzeit mit ca. 1500 registrierten Mitgliedern auf sehr große Resonanz stößt. Aktuell (September 2021) ist als ein Ergebnis des Netzwerks ein Papier „Expertenempfehlung Forschungsnetzwerk Wasserstoff“ erschienen (PtJ, 2021).

In der öffentlichen Debatte, insbesondere auch im politischen Raum, gibt es derzeit widerstreitende Auffassungen über die Relevanz und die Rolle von klimaneutral produziertem Wasserstoff in einem zukünftigen Energiesystem. Teilweise ist von Wasserstoff als dem „Champagner der Energiewende“ die Rede, andere Akteure sprechen vom „Mineralwasser der Energiewende“. Die vorliegende Stellungnahme verfolgt das Ziel, einen Beitrag zu einer differenzierteren Debatte zu leisten, in dem zentrale Nachfragesektoren (mit Fokus auf den Industriesektor) betrachtet werden und die Sinnhaftigkeit oder das Erfordernis einer potenziellen Wasserstoffnutzung beleuchtet wird. Die Stellungnahme dient auch dazu

- klare prioritäre Anwendungen für Wasserstoff,
- Unsicherheiten bzgl. der zukünftigen Wasserstoffnutzung,
- sowie Bereiche und Anwendungen zu identifizieren, die einen geringen Bedarf für eine Nutzung von Wasserstoff haben, da alternative, günstigere klimaneutrale Optionen vorhanden sind.

Derzeit beträgt der gesamte jährliche Wasserstoffbedarf in Deutschland ca. 1,65 Mio.t (BMW, 2020). In der EU entfallen nach Angaben von Fraile et al. (Fraile et al., 2015) über 90% des Wasserstoffbedarfs auf den Industriesektor, hiervon wiederum entfällt ein Großteil auf einige wenige Anwendungen in der Petro- und Grundstoffchemie, siehe Abbildung 1. Sowohl die Bedarfsmengen als auch deren Struktur wird sich zukünftig deutlich ändern, hin zu höheren Mengen und einer größeren Bandbreite an Branchen. Dabei werden insbesondere die Bedarfe der Stahlindustrie und der Chemieindustrie absehbar erheblich zunehmen.

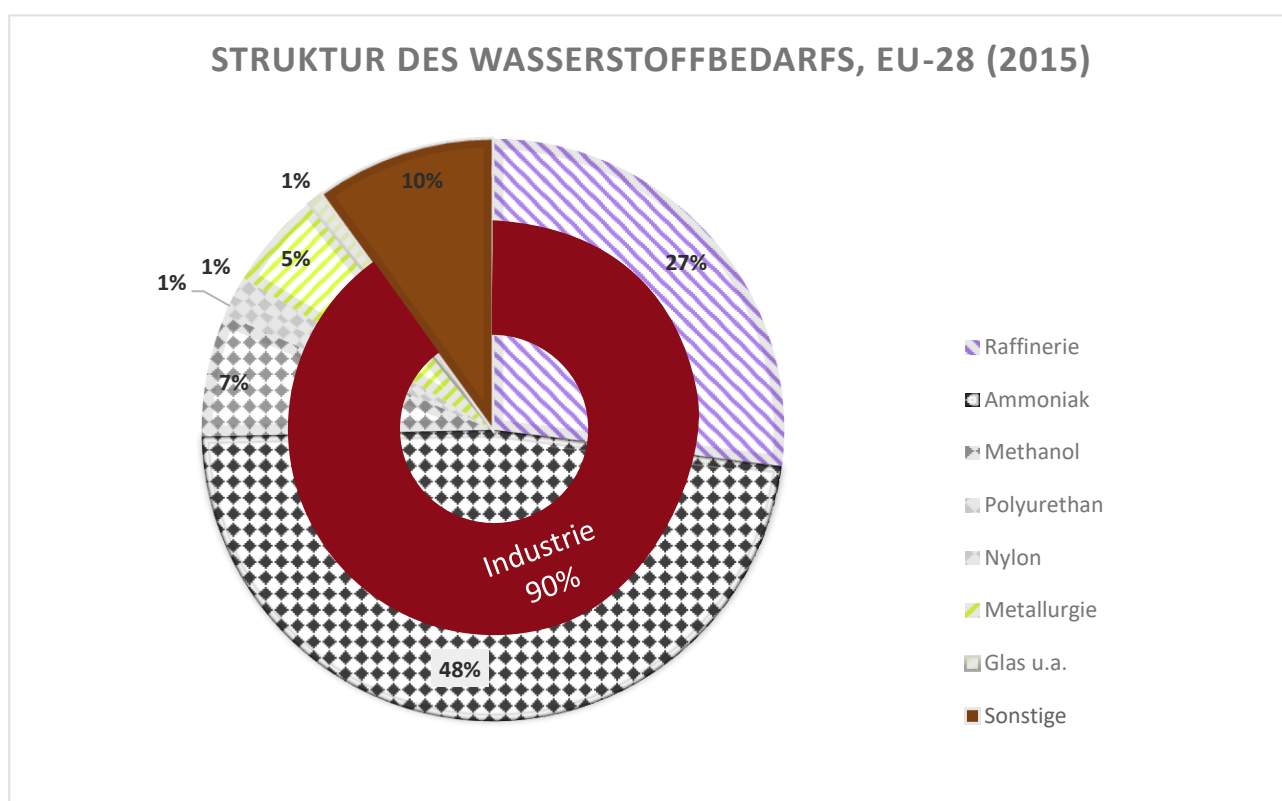


Abbildung 1: Wasserstoffbedarf und Bedarfsstruktur (2015) der EU-28. Daten: (Fraile et al., 2015). Abbildung: IREES.

2. Kurzzusammenfassung und Fazit

Als zentrales Ergebnis der vorliegenden, knappen Untersuchung potenzieller Anwendungsfälle für Wasserstoff in den Nachfragesektoren lässt sich festhalten, dass eine detaillierte und differenzierte Betrachtung von Anwendungsfällen zwingend erforderlich ist, um sinnvolle Entscheidungen hinsichtlich des Wasserstoffeinsatzes sowie entsprechender politischer Maßnahmen (auch bzgl. Forschungsförderung) treffen zu können. Pauschalisierte, verkürzende und vereinfachende Schlussfolgerungen sind vor dem Hintergrund der anstehenden kapitalintensiven Transformation der deutschen Wirtschaft hin zur Klimaneutralität mit Blick auf mögliche Lock-In Effekte durch frühzeitige Fehlentscheidungen wo immer möglich zu vermeiden.

Da die Anwendung von Wasserstoff immer mindestens einen Umwandlungsschritt (von Strom zu Wasserstoff), ggf. auch mehrere (CCU, Plattformchemikalien), erfordert, geht diese grundsätzlich mit einem energetischen Mehraufwand ggü. der direkten Nutzung von elektrischem Strom für die Dekarbonisierung einher. Dort, wo eine direkte Elektrifizierung von bisher auf fossilen Brennstoffen basierenden Energieanwendungen technologisch bzw. verfahrenstechnisch möglich und potenziell wirtschaftlich darstellbar ist, wird diese in der Regel vorzuziehen sein. Eine pauschale Nutzung von Wasserstoff in allen erdenklichen Anwendungsfeldern, die grundsätzlich Wasserstoff nutzen könnten, würde daher zu erheblichen Ineffizienzen und zu einem deutlich höheren gesamtwirtschaftlichen Strombedarf (und/oder Wasserstoffimportbedarf) führen, als eigentlich erforderlich, mit entsprechenden Mehraufwänden insbesondere bei der Netzinfrastruktur.

Insbesondere in dem anwendungs- und technologieorientiert sehr heterogenen Feld der Bereitstellung von industrieller Prozesswärme (Industrieöfen, Brenner und Feuerungsanlagen), vor allem in den energieintensiven Hochtemperaturprozessen der Grundstoffindustrien, bestehen noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Notwendigkeit der Anwendung von Wasserstoff einerseits und der verfahrenstechnisch / technologischen Verfügbarkeit bzw. Umsetzbarkeit direktelektrischer Alternativen für den Ersatz fossiler Brennstoffe (insbesondere Erdgas). Siehe hierzu die Betrachtungen in den Abschnitten 3.1 und 3.3.

Hier sehen die Autoren auch einen wichtigen Ansatzpunkt für eine thematische Weiterentwicklung des Forschungsnetzwerkes Energie in Industrie und Gewerbe bzw. für die Suche nach möglichen neuen Schwerpunkten für die Forschungsförderungspolitik. Denn nicht nur bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Frage direkte Elektrifizierung vs. Nutzung von Wasserstoff, die Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff und absehbar teures Substitut für Erdgas kann auch die Relevanz von Energieeffizienzmaßnahmen, insbesondere bzgl. der Nutzung von Abwärmeströmen, wieder in den Vordergrund rücken. Denn die Reduktion des Brennstoffbedarfs für Prozesswärmeanwendungen durch innovative Abwärmennutzungstechnologien könnte bei einer Nutzung von Wasserstoff als Brennstoff (relativ zu Erdgas) eher rentabel sein.

In manchen spezifischen Produktionsprozessen der Grundstoffindustrien wird die Nutzung von Wasserstoff künftig unumgänglich sein, um die angestrebte Dekarbonisierung des Energiesystems zu erreichen. Dies betrifft insbesondere die Stahlindustrie (Primärstahlherstellung, Wasserstoff als Reduktionsmittel) sowie die Grundstoffchemie (stoffliche Nutzung von Wasserstoff für Plattformchemikalien, Ersatz von grauem Wasserstoff aus der Dampfreformierung, Kreislaufführung von Kohlenstoff). Für die Eisenerzreduktion gibt es keine absehbare verfahrenstechnische Alternative, die ohne ein Reduktionsmittel auskäme. Siehe hierzu auch die Darstellung in Abschnitt 3.1. In der Grundstoffchemie ergibt sich die Notwendigkeit des Einsatzes von Wasserstoffs direkt aus dem stofflichen Bedarf. In der Petrochemie werden bereits heute erhebliche Wasserstoffmengen benötigt. Siehe hierzu auch die Analyse in Abschnitt 3.2

In der industriellen Fertigungstechnik kommt Wasserstoff bereits heute zum Einsatz, insbesondere in der Elektroindustrie ist Wasserstoff relevant. Konkret wird Wasserstoff hier beispielsweise zum Glühen z.B. von Silizium-Wafern, sowie als Reduktions- und Hilfsmittel in materialbezogenen Verfahren (z.B. Epitaxie) eingesetzt werden. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Abschnitt 4.

Für den Gebäudesektor (siehe Abschnitt 5) kann das klare Fazit gezogen werden, dass derzeit keine sinnhafte prioritäre Anwendung von Wasserstoff gesehen wird. Für die vier dargestellten Nutzungspfade gibt es jeweils wirtschaftlichere und energetisch effizientere Optionen, insbesondere Wärmepumpen und verschiedenste Lösungen zur Bereitstellung einer klimaneutralen Fernwärmeversorgung.

Im Mobilitätsbereich (siehe Abschnitt 6) zeigt sich ein differenziertes Bild. Für den Individualverkehr lässt sich recht sicher sagen, dass, aufgrund der bereits angesprochenen Umwandlungsverluste, die direkte Nutzung erneuerbaren Stroms (Elektromobilität) klar effizienter ist als die Nutzung von Wasserstoff. Eine mögliche Rolle könnte Wasserstoff (und kohlenstoffhaltige Derivate) jedoch dort haben, wo eine hohe Reichweite und/oder eine hohe Energiedichte erforderlich ist. Dies sind der Schwerlastverkehr, sowie der Flug- und Schiffsverkehr.

Die Autoren möchten auch betonen, dass zukünftige Wasserstoffanwendungen und Maßnahmen zur Energieeffizienz nicht in Konkurrenz, sondern komplementär zueinander verstanden und betrachtet werden sollten. Eine möglichst effiziente Anwendung von Strom (Direktelektrifizierung) und grünem Wasserstoff (indirekte Elektrifizierung), forciert durch eine vorausschauende Forschungsförderungspolitik, vereinfacht die Transformation, da bei hoher Energieeffizienz der innovativen Energieanwendungen der ohnehin erforderliche enorme Kapazitäts- und Infrastrukturaufbau auf das absolut notwendige Maß beschränkt werden kann, und somit sowohl einzelwirtschaftliche als auch gesamtwirtschaftliche Kostenvorteile erzielt werden können.

3. Nutzung von Wasserstoff in der Prozessindustrie

Bereits bis 2030 müssen die CO₂-Emissionen des Industriesektors entsprechend den Vorgaben des Klimaschutzgesetzes (in seiner Fassung von 2021) von derzeit (2020) 186 Mio. t auf 118 Mio. t gesenkt werden. Ohne erhebliche Beiträge der emissionsintensiven Grundstoffindustrien bereits in dieser Dekade ist dies grundsätzlich nicht erreichbar, weil die CO₂-Emissionen der Grundstoff-Industrie rund 60% der industriellen Emissionen ausmachen. Hier sind daher zwingend grundlegende verfahrenstechnische Innovationen und ein zügiger Markteintritt dieser neuen Verfahren erforderlich.

Der Heizwert von Wasserstoff bezogen auf das Volumen bei Normaldruck ist um einen Faktor 3 bis 3,5 niedriger als bei üblichem Erdgas, bezogen auf das Gewicht ist der Heizwert von Wasserstoff jedoch um

einen Faktor $\sim 3,2$ höher. Weiterhin verfügt Wasserstoff über eine höhere Flammgeschwindigkeit und Entflammbarkeit gegenüber Erdgas. Diese Eigenschaften, kombiniert mit einem negativen Joule-Thomson-Koeffizienten, bedingen eine hohe Relevanz von Sicherheitsaspekten bei der Verwendung von Wasserstoff.

Hinsichtlich seiner Nutzung im Bereich von Industrie und Gewerbe kann Wasserstoff vielfältige Funktionen wahrnehmen (World Energy Council, 2018). Bei Vorliegen einer emissionsarmen Erzeugung ergeben sich hieraus Beiträge zur Senkung der CO₂-Emissionen in der Prozessindustrie:

- Im Rahmen einer stofflichen Verwendung von emissionsarmen Wasserstoff kann „grauer Wasserstoff“ aus Reformier-Prozessen substituiert werden. Hierdurch wird eine Reduzierung von CO₂-Emissionen ermöglicht. Ferner besteht durch die reduzierende Aktivierung von prozessbedingtem CO₂ durch Wasserstoff eine Möglichkeit zur Herstellung von Folgeprodukten wie synthetischen Kraftstoffen, siehe Abschnitt 6, oder Synthesebausteinen der chemischen Industrie. Hierbei sind jedoch die energetischen Verluste der notwendigen Konversionsverfahren zu berücksichtigen (IEA and DECHEMA, 2013) und durch emissionsarme Prozessenergien auszugleichen. Für die effiziente stoffliche Nutzung von Wasserstoff besteht eine Dualität von Material- und Energieeffizienz. Verfahren der Prozessindustrie, welche auf einer primären (Ammoniak, Methanol, Direktreduktion in der Stahlerzeugung, etc.) und sekundären (CO₂-Aktivierung) stofflichen Nutzung von Wasserstoff beruhen, sind daher hinsichtlich eines effizienten Einsatzes zu optimieren.
- Wasserstoff kann in Kesselanlagen und Trocknern oder Öfen für Prozess-Temperaturen bis zu 400 bis 500°C genutzt werden. In diesem Nutzungsbereich werden die Rauchgase häufig über Wärmeübertrager abgekühlt und dann meist umwelttechnisch gereinigt, bevor sie in die Umwelt entlassen werden. Diese Wärmeerzeugung kann auch mit anderen Brennstoffen wie Biomasse, Biogase, brennbare organische Abfallstoffe oder regenerativ erzeugtem Strom erfolgen.
- Die Nutzung in Hochtemperaturbereichen (500 bis 2000 °C) mit direkter Nutzung der Brenn- und Rauchgase zum Schmelzen von Metallen oder Glas bzw. zum Brennen (z.B. von Ziegeln, Klinker, Keramik oder Feuerfeststeinen) ist die eigentliche technische Herausforderung. Denn elektrische Hochtemperatur-Wärmeerzeuger haben verschiedene Nachteile gegenüber den Gasbrennern (vgl. Stahlherstellung oder Schmelzen anderer Metalle und von Glas, Abschn. 3.1 und 3.3.).

Wird emissionsarmer Wasserstoff als Reduktionsmittel oder Grundstoff eingesetzt, so ist auf eine möglichst hohe stoffliche Nutzungseffizienz zu achten. Im Kontext der Bereitstellung z.B. durch Elektrolyse von Wasser ergibt sich hieraus eine Perspektive der Energieeffizienz. Aufgrund des zunächst knappen Angebots sowie hoher Herstellungskosten sollte Wasserstoff prioritär nur dort als Energieträger zur Prozesswärmeerzeugung zum Einsatz kommen, wo sein Einsatz aus verfahrenstechnischen Gründen unumgänglich ist (siehe Abschn. 3.1 und 3.2.).

Dort, wo in Zukunft Wasserstoff unumgänglich zum Einsatz kommt, sollte das gesamte Prozesssystem auf dem besten Stand der Energieeffizienz sein, um unnötige Energiekostenbelastungen des betroffenen Unternehmens zu vermeiden. Dies ist insbesondere auch für Unternehmen im internationalen Wettbewerb von erheblicher Bedeutung.

3.1. Nutzung von Wasserstoff in der Stahlindustrie

Einsatz von Wasserstoff als Reduktionsmittel in der Primärstahlherstellung

Die derzeit hohe Emissionsintensität der Primärstahlherstellung (je nach Abgrenzung des Produktionssystems, auch abhängig von den genutzten Schrottanteilen: ca. 1,4 – 2,0 t CO₂ / t Stahl) ist direkt und insbesondere auf den Einsatz von Kohlenstoff in Form von Koks, Kohle und in geringem Umfang anderen fossilen Energieträgern zur Reduktion von Eisenerz (in der Regel Hämatit) zu Roheisen zurückzuführen. In der Primärstahlherstellung ist eine Reduktion der oxidischen Erze zwingend erforderlich. Ein weiterer Einsatz der etablierten Hochofenroute ist mittelfristig klimapolitisch nicht mehr zu verantworten, da die o.g. spezifischen Emissionen nur noch in geringem Umfang reduziert werden können. (Lösch et al., 2020)

Im Fokus für ein alternatives Produktionsverfahren steht die sogenannte Direktreduktion von Eisenerz. Der zentrale Unterschied zum Hochofen besteht darin, dass das Eisenerz im festen Aggregatzustand reduziert wird, d.h. es liegt zunächst keine Schmelze vor (das Reduktionsprodukt wird nicht als Roheisen, sondern als Eisenschwamm bezeichnet). Die Reduktion des Eisenoxids erfolgt entweder mit Erdgas (bzw. einem aus Erdgas gewonnenem Synthesegas), Wasserstoff, oder einer Mischung aus beidem. Bereits bei einer ausschließlichen Nutzung von Erdgas lassen sich die spezifischen Emissionen der Stahlerzeugung relativ zur Hochofenroute um ca. 50% reduzieren, sofern für die nachfolgende Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen erneuerbarer Strom eingesetzt wird. Bei Nutzung von reinem Wasserstoff für die Reaktion und erneuerbarem Strom, d.h. bei Verzicht auf Erdgas für die Rohstahlerzeugung, ist eine Minderung der spezifischen Emissionen um bis zu 95% möglich. In beiden Fällen wird von der Nutzung klimaneutral produzierten („grünem“) Wasserstoffs ausgegangen. Die absehbar vorherrschende Technologie zur Erzeugung von grünem Wasserstoff wird die Wasserelektrolyse sein, die in mehreren technologischen Ausprägungen verfügbar ist bzw. sein wird. Grundsätzliche technologische Entwicklungsschritte, die einer Markteinführung der Direktreduktion in den 2020er Jahren im Wege stehen, sind nicht mehr zu gehen (dies bedeutet nicht, dass nicht erheblicher F&E Bedarf bezüglich des energietechnisch optimalen Prozessdesigns bestünde). (Lösch et al., 2020)

Das einzige uns bekannte, derzeit in Entwicklung befindliche Verfahren zur Primärstahlherstellung das ohne ein stoffliches Reduktionsmittel wie Wasserstoff auskommen würde, ist die Eisenerzelektrolyse. Hierbei handelt es sich um ein elektrochemisches Verfahren, das direkt elektrischen Strom einsetzt, um aufbereitete Feinsteisenerze zu reduzieren. Als potenzieller Vorteil dieses Verfahrens ist, neben der deutlichen Reduktion des gesamtwirtschaftlichen Wasserstoffbedarfs und der damit einhergehenden Infrastrukturproblematiken, insbesondere eine höhere Energieeffizienz (Energieeinsatz / Produkt) zu nennen, da die Verluste bei der Wasserstoffherstellung entfallen. Allerdings befindet sich dieses Verfahren, im Gegensatz zur Direktreduktion mit Erdgas/Wasserstoff, noch in der Entwicklung im Labormaßstab. Derzeit arbeitet insbesondere ein von ArcelorMittal geführtes europäisches Konsortium (Projekt „Siderwin“, gefördert durch Horizon 2020) an der Weiterentwicklung des Verfahrens. Aktuell (September 2021) soll eine erste Pilotanlage in Frankreich in die Produktion gehen (Serna, 2021). Über die Batchgröße ist nichts bekannt, diese wird aber in der Größenordnung von kg liegen. In der Literatur wird mit einer technologischen Marktreife nicht vor 2040 gerechnet (Fishedick et al., 2014).

Vor dem Hintergrund der klimapolitischen Notwendigkeiten als auch unter Berücksichtigung der technologischen Reife der betrachteten Verfahren erscheint der Ersatz der Hochofenroute durch die Direktreduktion sowie hieraus folgend der Einsatz von grünem Wasserstoff in der Primärstahlherstellung

alternativlos. Dies wurde auch von den europäischen Stahlherstellern so erkannt: eine Vielzahl von Unternehmen arbeitet an Varianten des wasserstoffbasierten Verfahrens, eine erste Pilotanlage in Schweden (Projekt Hybrit) ist seit August 2020 in Betrieb, in Deutschland startet die Salzgitter AG (mit Förderung durch BMU) in 2022 mit dem Produktionsstart einer Demonstrationsanlage mit einer Produktionskapazität von 2,5 Tonnen pro Tag (Salzgitter AG, 2021; SSAB, 2020).

Der minimale Wasserstoffbedarf pro Tonne Rohstahl für die Reduktion des Eisenerzes lässt sich mit Hilfe stöchiometrischer Überlegungen einfach berechnen, er liegt bei 600 Nm³ bzw. 54 kg Wasserstoff pro Tonne Rohstahl (Hölling et al., 2017). Das technisch mögliche Minimum wird darüber liegen, in einer Größenordnung von 60 kg Wasserstoff pro Tonne Rohstahl. Nimmt man an, dass ein erheblicher Anteil der derzeitigen Primärstahlproduktion Deutschlands (25 Mio. t von derzeit ~30 Mio. t Produktion) zukünftig mittels der Direktreduktion hergestellt wird, ergäbe sich ein Wasserstoffbedarf von 1,5 Mio. t pro Jahr. Dies allein entspräche ca. einer Verdopplung des gesamten derzeitigen Wasserstoffbedarfs in Deutschland. Der Strombedarf für die Wasserelektrolyse pro Tonne Rohstahl lässt sich mit ca. 3 MWh abschätzen. Somit ergäbe sich ein zusätzlicher Bedarf für erneuerbaren Strom von 75 TWh bzw. 270 PJ, sofern nicht ein Teil des Wasserstoffs importiert wird. Hinzu kommen weitere Strombedarfe für die Elektrolichtbogenöfen sowie Nebenanlagen (ca. 0,8-1 MWh / t Rohstahl).

Einsatz von Wasserstoff in der Sekundärstahlherstellung und bei weiteren Prozessen der Stahlindustrie

In der Sekundärstahlherstellung aus Stahlschrott kommen bereits heute Elektrolichtbogenöfen (ELO) zum Einsatz, die auch bei der zukünftigen Primärstahlherstellung eine zentrale Rolle spielen werden. Zum Erschmelzen des Stahls wird vor allem Strom eingesetzt, jedoch ist der Einsatz zusätzlicher Erdgasbrenner Standard. Diese Erdgasbrenner verfolgen insbesondere das Ziel, die Gesamtenergieeffizienz des Ofens zu erhöhen und zugleich über geringe tap-to-tap Zeiten (Dauer eines Batchprozesses) die Produktivität zu steigern. Nach Angaben eines europäischen Sekundärstahlherstellers wäre ein Verzicht auf Brenner bei höherem Einsatz von Strom zwar denkbar, dies würde jedoch die Produktivität des ELO massiv verringern. Denn die Brenner sorgen für ein zügiges Schmelzen der Stahlschrotte, da sie innerhalb des Schrottvolumens räumlich gleichmäßig Prozesswärme zur Verfügung stellen. Mit den im ELO genutzten Elektroden kann die Prozesswärme durch den Elektrolichtbogen jedoch nur punktförmig im Volumen zur Verfügung gestellt werden.

Daher bietet sich auch hier Wasserstoff als Option zur Substitution von Erdgas an. Aufgrund eines erheblich anderen Brennverhaltens von Wasserstoff relativ zu Erdgas (höhere Flammentemperatur, höhere NO_x-Emissionen) müssen jedoch spezielle Wasserstoffbrenner zum Einsatz kommen. Diese sind bereits heute bei einigen wenigen Firmen im Industriemaßstab verfügbar (Saacke, 2020).

Auch für weitere Hochtemperatur-Einsatzbereiche bei der Formgebung (Walzen) sowie bei der Wärmebehandlung der geformten Halbzeuge (Glühen, Härten, Anlassen) könnte der Einsatz von Wasserstoff sinnvoll und eventuell auch alternativlos sein. Hier wäre im Detail noch zu prüfen, ob auch direktelektrische Hochtemperaturverfahren, beispielsweise mit Infrarot-Technik oder Plasmabrennern, in Frage käme.

3.2. Nutzung von Wasserstoff in der chemischen Verfahrenstechnik

Der Bereich der chemischen Konversionsverfahren umfasst einen Großteil der heutigen Wasserstoffnutzung. Die Herstellung von Ammoniak, Methanol sowie der Einsatz in Raffinerieprozessen benötigen 70 % des weltweiten Wasserstoffbedarfs (IEA, 2019). Hinsichtlich der aktuellen Entwicklungen im Bereich der Wasserstofftechnologien ist jedoch eine Veränderung der etablierten Wasserstoffnutzung zu erwarten. Dabei wird die stoffliche Nutzung von Wasserstoff als Reaktand weiterhin eine signifikante Rolle für die chemische Industrie einnehmen. Dies wird auch dann zutreffen, wenn bisherige Anwendungen wie das Hydrotreating in Raffinerien im Rahmen einer Mobilitätswende an Bedeutung verlieren würden. Der Bedarf an Wasserstoff in der chemischen Verfahrenstechnik von gegenwärtig 1,6 Mio.t/a (Encon Europe and Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, 2018) wird dabei weiterhin zunehmen und zur Herstellung von Plattformchemikalien (z.B. Methanol) und synthetischen Kraftstoffen benötigt. Letztere ermöglichen eine „end-of-pipe“-Vermeidung von prozessbedingten CO₂-Emissionen. Dabei profitiert die Herstellung der Kraftstoffe von einer effizienten CO₂-Abscheidung an einer CO₂-Punktquelle (Lübbers et al., 2021). Wasserstoff kann auch eine wichtige Rolle als Reduktionsmittel für die Rückgewinnung von Edelmetallen und seltenen Erden zukommen (Cordis, 2019) und damit eine Schlüsselrolle in der Aufarbeitung von Katalysatoren, Elektroden oder anderen komplexen Komposit-Systemen einnehmen. Dabei wird die Effizienz des stofflichen Einsatzes deutlich an Relevanz gewinnen, da günstiger, aber emissionsintensiver Wasserstoff des Steam-Reformings aufgrund steigender Kosten für Emissionsrechte nicht mehr zu Verfügung stehen wird. Der ökonomische Aspekt einer THG-freien Wasserstoffversorgung für die Chemie und Petrochemie kann gegenwärtig nur durch Szenariobetrachtungen abgeschätzt werden. Unabhängig von den tatsächlich eintretenden Wasserstoffpreisen wird sich die initiale Umstellung der Wasserstoffversorgung als ökonomische Herausforderung gestalten. Hierbei wären zunächst (Perspektive 2030 (Bukold, 2020)) 2- bis 2,7-fach höhere Wasserstoffpreise gegenüber dem heutigen Steam-Reforming zu erwarten. Neben einer hocheffizienten Nutzung müssen daher auch strategische Maßnahmen für diesen Umstieg betrachtet werden. So würde die Etablierung umfangreicher Wertschöpfungsketten von den Grundchemikalien bis zur Herstellung von Spezialchemikalien, Pharmaka oder hochwertigen Werkstoffen den produzierenden Unternehmen die Chance geben, den erhöhten Kostendruck durch innovative Folgeprodukte auszugleichen. Dieser Aspekt sollte auch im Rahmen von fördernden Maßnahmen berücksichtigt werden.

Für die energetische Verwendung ist eine Differenzierung hinsichtlich der Nutzenergieform durchzuführen. Eine lokale Verstromung in stationären Brennstoffzellen wäre ausschließlich vorzuziehen, wenn eine elektrische Netzanbindung nicht möglich ist oder eine situationsspezifische KWK-Lösung benötigt wird. Wasserstoff sollte nicht zur Bereitstellung von Niedertemperaturwärme herangezogen werden, da hierfür effizientere technische Lösungen (Wärmepumpen, Solarthermie, Prozessabwärme) zur Verfügung stehen. Im Bereich der Prozesswärmeversorgung bei Temperaturen >540 °C besteht ein relevantes technisches Potenzial für Wasserstoff. Die chemische Industrie bezieht 64 % ihres Wärmebedarfs auf diesem Temperaturniveau (Blesl und Kessler, 2017). Aufgrund des damit verbundenen Bedarfs an emissionsfrei hergestelltem Wasserstoff und dessen Kosten, sollte die energetische Nutzung nur erfolgen, falls keine technischen Alternativen (z.B. Direktelektrifizierung) bestehen. Eine energetische Verwertung sollte dabei in jedem Fall durch anwendungsspezifische ökonomische Betrachtungen untersucht werden.

3.3. Potenzielle Nutzung von Wasserstoff in weiteren Prozessindustrien

Wasserstoff sollte auch in der Prozessindustrie aufgrund des absehbar knappen Angebots sowie hoher Herstellungskosten prioritär nur dort zum Einsatz kommen, wo sein Einsatz aus verfahrenstechnischen Gründen unumgänglich ist (siehe auch Abschnitt 3.1 und 3.2).

Der Einsatz von Wasserstoff ist grundsätzlich für alle Produktionsverfahren in der Prozessindustrie zu untersuchen, die derzeit Erdgas als Brenngas, oder andere fossile Brennstoffe zur Prozesswärmeerzeugung nutzen. Im Folgenden werden -exemplarisch und ohne Anspruch auf Vollständigkeit- einige zentrale Produktionsprozesse der Zement- sowie Ziegel-/Keramik betrachtet.

Kommerziell angebotene Kombi-Gasbrenner in Kesselanlagen erlauben 20%-ige Wasserstoffanteile (Saacke, 2020). Es werden auch Wasserstoff-kompatible Brenner angeboten, die zukünftige Umrüstungen von Kessel- oder Trockneranlagen vermeiden bzw. spontane Brennstoffwechsel ermöglichen. Eine spezielle Rauchgasrezirkulation und Gaseindüsung ermöglichen es, die im Vergleich zum Erdgas höhere Flammentemperatur und bis zu 3-mal höheren NO_x-Emissionen bei der Verbrennung von Wasserstoff auf vergleichbare Niveaus abzusenken. Wer heute auf einen H₂-kompatiblen Brenner setzt, vermeidet Umrüstungen in der Zukunft und sichert den Betrieb seiner Anlagen auch langfristig.

Zementindustrie

Zentraler Hochtemperaturprozess der Zementherstellung ist das Klinkerbrennen, dies geschieht in Drehrohröfen bei einer Temperatur von ca. 1450° C. Als Brennstoffe kommen vor allem alternative biogene und nicht-biogene Ersatzbrennstoffe (Altreifen, Siedlungsabfälle, Tiermehle, etc.) zum Einsatz. Nach Angaben des VDZ könnten Plasmabrenner geeignet sein, um eine direktelektrische Bereitstellung von Prozesswärme auf diesem hohen Temperaturniveau zu ermöglichen. Dies würde allerdings erhebliche Anpassungen am Prozess sowie eine Weiterentwicklung der Plasmabrennertechnik erfordern. Der Strombedarf der deutschen Zementindustrie würde sich von 3,9 TWh/a auf mindestens 21 TWh erhöhen, unter der Annahme vollständiger Diffusion. Allerdings ist, nach Angaben des VDZ, der Wirkungsgrad bei einer Nutzung von Plasmabrennern geringer als bei einer Umstellung auf Elektrolyse-Wasserstoff, weshalb der Einsatz von Wasserstoff vorzuziehen wäre (Schneider et al., 2020). Hier sehen wir jedenfalls einen Ansatzpunkt für weitere F&E-Analysen.

Der Einsatz von Wasserstoff als Brenngas für Drehrohröfen wird grundsätzlich als möglich angesehen. Allerdings ist die Strahlungswärme der Wasserstoffflammen geringer als der bisher eingesetzten Brennstoffe, was zu einer schlechteren Wärmeübertragung auf das Brenngut führt. Hier wird noch F&E Bedarf gesehen. Stand heute erscheint dem VDZ ein Anteil von 10% Wasserstoff am Hauptbrenner ohne negative Auswirkungen auf den Brennbetrieb möglich (Schneider et al., 2020).

Ziegel- und Keramikindustrie

Obwohl die Ziegel- und Keramikindustrie hinsichtlich ihrer Produkte sehr heterogen ist, können die grundlegenden Prozessschritte einheitlich betrachtet werden: Abbau und Aufbereitung/Mischung der Rohmaterialien, Formgebung, Trocknung, Oberflächenveredelung, Brennen und Nachbehandlung. Mit Blick auf den Energieeinsatz ist das Brennen zentral. Brennöfen und Trockner arbeiten in der Regel im Verbund, um die Energieeffizienz zu steigern (Fleiter, 2013). Zukünftig, zur Umsetzung hinreichender Maßnahmen zur Dekarbonisierung, könnte jedoch eine Entkopplung des Ofen-Trockner-Verbundes

erforderlich sein (Geres et al., 2021). Die Prozesstemperatur des Brennens bewegt sich in Abhängigkeit der Produktgruppen in einem breiten Bereich von bis zu 2500° C (Europäische Kommission, 2007).

Der hohe erforderliche Energieeinsatz beim Brennen und das hohe Temperaturniveau ergeben sich aus dem Erfordernis, dass die zu brennenden Güter gesintert werden. In der Regel werden die für das Brennen meistens eingesetzten Tunnelöfen mit Erdgasbrennern befeuert. Erdgas dominiert mit ca. 90 % den Energieeinsatz (im Durchschnitt über alle Produktgruppen) (Fleiter, 2013). Nach Angaben von (Geres et al., 2021) setzt die Ziegelindustrie in Deutschland mittlerweile auf 100% Erdgas. Neben energiebedingten Emissionen kommt es durch den Einsatz von Ton und Kalkstein sowie Porosierungsmitteln auch zu geogenen prozessbedingten Emissionen.

Dementsprechend stellt sich auch für die Keramikindustrie die Frage, ob ein direktelektrisches Brennen verfahrenstechnisch umsetzbar erscheint, oder ob mit Wasserstoffbrennern gearbeitet werden müsste, um das Erdgas zu substituieren. In (Hübner et al., 2019) wird eine mögliche Teilelektrifizierung durch mikrowellenunterstütztes Brennen als Option angesprochen, zugleich wird aber darauf hingewiesen, dass eine elektrisch betriebene Beheizung von kontinuierlich betriebenen Tunnelöfen erst noch entwickelt werden müsse. In (Europäische Kommission, 2007) wird in diesem Zusammenhang auf sicherheitsrelevante Aspekte, die im Zusammenhang mit einer Nutzung von Mikrowellen zu klären wären, hingewiesen. Die Kombination von fossiler Befeuerung mit Mikrowellentechnologie hätte laut (Europäische Kommission, 2007) perspektivisch erhebliche Vorteile für den Brennprozess, insbesondere bzgl. einer homogenen Erwärmung des Materials und damit minimierter thermischer Spannungen. Insgesamt würde sich die Produktivität (und damit mutmaßlich die spezifische Energieeffizienz) deutlich erhöhen. Diese Aspekte sollten weiterverfolgt werden.

Auch in der aktuellen Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie werden sowohl direktelektrisch beheizte als auch mit Wasserstoff beheizte Öfen erwähnt und für die Modellierung von Pfaden genutzt (Geres et al., 2021). Es wird auch dort auf den bestehenden F&E-Bedarf hingewiesen, beispielsweise bzgl. der Auswirkungen des Wasserstoffeinsatzes auf die Produkteigenschaften.

Insgesamt zeigt die exemplarische Betrachtung der Hochtemperaturprozesse der Zement- sowie der Ziegel- und Keramikindustrie, dass derzeit noch erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Nutzbarkeit direktelektrischer Verfahren besteht. Hier besteht weiterer Analyse- sowie absehbar auch F&E-Bedarf bzgl. der in Frage kommenden Technologien, um eine möglicherweise ineffiziente Nutzung von Wasserstoff zu vermeiden. Andererseits ist es auch denkbar, dass eine Umstellung der Ofenbefeuerung auf Wasserstoffbrenner hinsichtlich der Investitionsaufwände (Kapitalkosten) oftmals deutlich günstiger ist, als ein durch völlig neue direktelektrische Verfahren notwendiger vollständiger Ofentausch. Auch dies wäre für die jeweiligen Prozesse/Anwendungen im Einzelnen zu prüfen.

4. Nutzung von Wasserstoff in der Fertigungstechnik

Die Anwendung von Wasserstoff in der Fertigungstechnik kann grundsätzlich in vier Bereiche eingeteilt werden:

Industrieller Rohstoff

Wasserstoff dient in den verschiedensten Prozessen der Fertigungstechnik als Grund- und Hilfsstoff. Die Elektroindustrie ist ein wesentlicher Konsument von Wasserstoff (ca. 6 % des weltweiten Gesamtbedarfs

an Wasserstoff (Wawrzinek and Keller, 2007)). Hier sind im Wesentlichen vier Prozesse von Relevanz (Cigal, 2016):

- **Glühen:** Silizium-Wafer werden auf Temperaturen über 1.000°C erhitzt, um die Kristallstruktur zu reparieren oder zu glühen. Wasserstoff überträgt die Wärme gleichmäßig auf den Wafer, unterstützt den Wiederaufbau der Kristallstruktur in den letzten Oberflächenschichten, und reagiert, um Oxide zu entfernen.
- **Epitaxie:** Wasserstoff wird als Reduktionsmittel in vielen chemischen Reaktionen, besonders bei der Abscheidung neuer kristalliner Schichten, Epitaxie genannt, eingesetzt.
- **Abscheidung:** Wasserstoff kann auch direkt in dünne Schichten eingearbeitet werden, um sie weniger kristallin zu machen. Dies wird oft bei Silizium-Dünnschichten gemacht, um die Schicht elektrisch besser zu isolieren.
- **Stabilisieren:** Die Zugabe von Wasserstoff verlängert auch die Haltbarkeit von wichtigen Elektronikchemikalien wie Diboran und Digerman, die sonst langsam zersetzen.

Prozesswärme

Wasserstoff kann als Brennstoff für industrielle Fertigungsprozesse mit Wärmebedarf (Ofenanlagen, thermische Nachverbrennung, ...) dienen. Insbesondere im Hochtemperaturbereich (Temperaturen bis 3080° C sind möglich) kann Wasserstoff gut eingesetzt werden. Durch die bessere Speicherfähigkeit von Wasserstoff im Vergleich zu Strom kann eine Substitution von strombasierten Prozessen, zur Entlastung der Stromnetze, sinnvoll sein. (Hebling et al., 2019; Töpler and Lehmann, 2017)

Bei Produktionsprozessen mit niedrigeren Temperaturanforderungen ist die Nutzung von Biobrennstoffen wie bspw. Biomethan oder bei Temperaturen von unter 150°C die Nutzung von Wärmepumpen abzuwägen. Aus Sicht der Energieeffizienz bei der Erzeugung sind die beiden letztgenannten Möglichkeiten vorzuziehen.

Transport

Wasserstoff in der Mobilität kann neben dem privaten Sektor und dem Güterverkehr außerhalb der Betriebsgrenzen auch eine Rolle in der Intralogistik (innerhalb der Werksgrenzen) einnehmen. So werden heutzutage bereits Stapler und Flurförderzeuge mit Brennstoffzellenantrieb angeboten.

Raumwärme

Wasserstoff kann neben der Prozesswärme auch für Raumwärmezwecke genutzt werden. Hierbei gibt es verschiedene Möglichkeiten. Neben der direkten Verbrennung in geeigneten Wärmeerzeugern kann Wasserstoff auch bei Kraftwärmekopplungsprozessen (BHKW, Turbine, ...) zum Einsatz kommen (vgl. Kapitel 5).

Dezentrale Wasserstoffherzeugung

Neben der Anwendung von Wasserstoff soll noch kurz ein Fokus auf die Verortung der Erzeugung gelegt werden:

Bei der unternehmensinternen Erzeugung von Wasserstoff kann die hierbei entstehende Abwärme für weitere Prozesse oder Raumwärme genutzt werden, falls entsprechende Wärmesenken vorliegen. Liegen diese Wärmesenken vor, so hat die unternehmensinterne Erzeugung von Wasserstoff den Vorteil, dass die Wärme direkt genutzt werden kann, ohne der Notwendigkeit von flächendeckenden Nah- bzw. Fernwärmenetzen.

5. Nutzung von Wasserstoff im Gebäudesektor

Kontext

Für die Erreichung der gesetzlich festgelegten Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 ist eine Transformation des Gebäudesektors notwendig. Neben einer erhöhten Sanierungsaktivität sowie dabei erzielter Sanierungstiefe ist vor allem die Umstellung der Wärmeversorgungssysteme notwendig. In den vorliegenden Szenarienstudien für den Gebäudebereich bis zum Jahr 2050, welche die Transformation der Wärmeversorgung unter Berücksichtigung der systemischen Kosten untersuchen, spielen Wasserstoff sowie synthetische erneuerbare Gase nur eine sehr geringe Rolle. Stattdessen wird die Transformation zu dezentralen EE-Wärme Technologien, insbesondere Wärmepumpen und sowie der Ausbau der Wärmenetze, als zentrale Versorgungsoptionen gesehen.

In der kürzlich veröffentlichten Studie „Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050“ von IREES und Fraunhofer ISE muss für die Zielerreichung bis zum Jahr 2030 ein Zubau von etwa 6 Millionen Wärmepumpen erfolgen. Bis 2050 erhöht sich diese Zahl auf 19 Millionen Wärmepumpen. Daneben sind Wärmenetze ein zentraler Pfeiler der Dekarbonisierung (Steinbach et al., 2021). In der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ resultiert ebenfalls der schnellere Ausbau von Wärmepumpen und Wärmenetzen als zentrales Element der Dekarbonisierung im Gebäudesektor (Prognos, Öko-Institut, 2021). Von einem breiten dezentralen Einsatz von Wasserstoff in Gebäuden gehen beide Studien dagegen nicht aus. Gründe sind insbesondere eine geringere Wirtschaftlichkeit sowohl aus gesamtwirtschaftlicher, als auch einzelwirtschaftlicher Perspektive gegenüber der alternativen erneuerbaren Wärmeversorgung sowie die absehbar fehlende Verfügbarkeit in ausreichenden Mengen bis zum Jahr 2030. Da durch die Sektorziele des Klimaschutzgesetzes bis zum Jahr 2030 signifikante THG-Minderungen im Gebäudebereich erzielt werden müssen, ist bereits bis 2030 eine Transformation von einer überwiegend erdgasbasierten zu einer erneuerbaren Wärmeversorgung erforderlich. Aus technischer Sicht wird Strom in Wärmepumpen deutlich effizienter genutzt als zur Herstellung von Wasserstoff. Dies ist zum einen durch die Funktionsweise der Wärmepumpen (geringerer Stromeinsatz relativ zur erzielten Wärmeleistung), zum anderen durch Umwandlungs- und Transportverluste für die Wärmebereitstellung in Bestandsgebäuden mit Wasserstoff bedingt. Der Einsatz von Wasserstoff würde ggü. dem Einsatz von Strom für Wärmepumpen bis zu 600 % mehr Energie benötigen (Fraunhofer IEE, 2020).

Mögliche Nutzungspfade für Wasserstoffe im Gebäudebereich

Für Wasserstoff gibt es im Gebäudebereich theoretisch vier Nutzungspfade, die im Folgenden kurz dargestellt werden.

Einspeisung in bestehende Erdgasnetze

Wasserstoff kann in begrenzten Anteilen **direkt in das Erdgasnetz** eingespeist werden. Nach einer Untersuchung des DVGW ist hierbei eine Beimischung von 20 Volumenprozent möglich. Derzeit ist eine Beimischung von 10 Volumenprozent in Gasverteilnetzen erlaubt (DVGW, 2021). Seitens der Nutzung in Gaskesseln ist diese Beimischungsquote jedoch nur in neuen Gaskesseln möglich, die als „H2-ready“ gekennzeichnet sind. Der Bestand von rund 14 Millionen Gaskesseln ist hingegen ohne weitere technische Maßnahmen nicht für diese hohe Beimischungsquote ausgelegt. Mit Bezug auf die energetische Nutzung bedeutet eine Beimischung von 20 Volumenprozent, dass rund 6 Prozent der

Gasversorgung auf Wasserstoff umgestellt wird (geringerer Heizwert des Wasserstoffs ggü. Erdgas bezogen auf das Volumen unter Normaldruck). D.h. selbst wenn bis 2030 ausreichende Mengen Wasserstoff für den Gebäudesektor zur Verfügung stehen und die bestehenden Gaskessel technisch nachgerüstet würden, wäre der Beitrag zur Zielerreichung überaus gering. Eine Umstellung der Gasnetze auf 100 Prozent Wasserstoff würde netzseitig Ertüchtigungen sowie einen hohen Koordinierungsaufwand bei der Umstellung erforderlich machen, da eine simultane Umstellung ganzer Netzstränge erforderlich wäre.

Aufbau einer eigenen Wasserstoffnetzinfrastuktur

Ein breiter Ausbau von Wasserstoffverteilnetzen auf Ortsebene parallel zur bestehenden Erdgasnetzinfrastuktur ist unwahrscheinlich, da somit das Hauptargument für gasförmige EE im Gebäudesektor – die Nutzung bestehender Infrastruktur – nicht mehr tragen würde und hohe Investitionen (und damit Netzkosten) für den Aufbau der Verteilnetzinfrastuktur die Wirtschaftlichkeit gegenüber alternativen Optionen weiter verschlechtern würde. Eine Nutzung über separate Wasserstoffnetze ist jedoch vereinzelt in Gebieten vorstellbar, in denen die Infrastruktur ohnehin aufgebaut wird, beispielsweise wenn Wasserstoffnetze für die Nutzung in Industriegebieten aufgebaut werden.

Nutzung von Wasserstoff zur Erzeugung von synthetischem Methan für die Gasnetzeinspeisung

Durch Methanisierung von Wasserstoff kann das resultierende **synthetische Methan** in bestehende Gasnetze eingespeist werden. Technische Restriktionen, wie sie bei der direkten Wasserstoffeinspeisung bestehen, gibt es dabei netzseitig und seitens der Nutzung in bestehenden Gaskesseln nicht. Damit könnte die bestehende Gasnetzinfrastuktur genutzt werden und Erdgas theoretisch zu 100 Prozent ersetzen werden. Allerdings resultiert durch den weiteren Umwandlungsschritt ein geringerer Wirkungsgrad, darüber hinaus muss CO₂ bereitgestellt werden, wodurch die Kosten im Vergleich zur direkten Wasserstoffnutzung noch weiter steigen. Ein wirtschaftlicher Einsatz ist auch bei einer Annahme signifikanter Lern- und Skaleneffekte auf allen Ebenen der Umwandlungskette derzeit nicht vorstellbar.

Nutzung von Wasserstoff zur Defossilisierung der Fernwärmeerzeugung

Auch hier ist eine Nutzung nur vorstellbar, wenn diese gegenüber alternativen treibhausgasneutralen Erzeugungstechnologien wirtschaftlich darstellbar ist. Für die Transformation der Wärmeversorgung bietet sich zunächst die Nutzung lokaler EE-Wärmepotentiale an wie Tiefengeothermie, Nutzung von Abwärme aus Abwasser, Solarthermie sowie industrielle Abwärme (Ortner et al., 2021). Als weitere Technologien kommen strombasierte Technologien wie Großwärmepumpen und Elektrodenheizkessel in Frage. Insofern ist es immer wirtschaftlicher Strom direkt zur Wärmeerzeugung zu nutzen, als daraus erst Wasserstoff herzustellen. Ein wirtschaftlicher Einsatz von Wasserstoff wäre nur denkbar, wenn die Erzeugung und der Bezug aus anderen Ländern inklusive Verteilkosten und Vertrieb bis zum Erzeuger im Fernwärmenetz in Summe günstiger wären, als der direkte Einsatz von Strom.

Zusammenfassende Bewertung

Insgesamt erscheint die Wasserstoffnutzung aufgrund der vorhanden alternativen Versorgungsoptionen im Gebäudebereich sowohl aus gesamt- als auch aus einzelwirtschaftlicher Sicht der Gebäudeeigentümer in breiter Anwendung nicht sinnvoll. Aus Sicht der Gasnetzbetreiber stellt der Nutzungspfad über

synthetisches Gas die einzige Möglichkeit dar, hohe betriebswirtschaftliche Abschreibungen auf die bestehenden Netze zu vermeiden.

Wird die Transformation des Gebäudebereichs durch Sanierung sowie Umstellung der Wärmeversorgung auf Wärmepumpen und Wärmenetze in den kommenden Jahren jedoch nicht konsequent angegangen, werden die Klimaziele 2030 deutlich verfehlt (Steinbach et al., 2021). Um dann die Klimaneutralität bis 2045 noch zu erreichen, kann ein höherer Einsatz von Wasserstoff oder erneuerbaren Gasen erforderlich sein, zu allerdings insgesamt höheren Kosten für die Wärmeversorgung.

6. Nutzung von Wasserstoff im Mobilitätsbereich

Zu Beginn dieses Abschnittes sei gesagt, dass die Autor:innen über keine Expertise im Bereich der Mobilität in Bezug auf die Nutzung von Wasserstoff verfügen. Aus diesem Grund werden im Folgenden lediglich Studien beziehungsweise entsprechende Kernaussagen daraus zusammengefasst.

In einer Studie vom Fraunhofer IEE, die sich vorrangig mit der Wasserstoffnutzung im Bereich der Gebäudewärme beschäftigt, heißt es auf S. 12, dass Wasserstoff, auch aufgrund fehlender Infrastruktur, ineffizienter ist als Elektromobilität (Gerhardt et al., 2020). Zu dieser Aussage passt das Wasserstoff-Positionspapier der Klima Allianz, in der das schon in der Einleitung genannte Efficiency-First-Prinzip betont wird: *“Die direkte Nutzung von Strom ist wirtschaftlich und ökologisch viel sinnvoller als verlustreiche Umwege über andere Energieträger wie Wasserstoff. Daher gilt, dass wo immer möglich die direkte Elektrifizierung von Transport, Industrie und Gebäuden Vorrang haben muss.“* (Klima Allianz Deutschland, 2021).

Das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Bundeslandes Baden-Württemberg betont in seiner Studie, dass *„die Nutzung von Wasserstoff vor allem solche Anwendungsbereiche dekarbonisieren [sollte], für die ansonsten keine anderen realistischen Technologiealternativen zur Verfügung stehen, beispielsweise im Schwerlastverkehr, in der industriellen Energie- und Rohstoffnutzung sowie in Teilen des Wärmesektors.“* (Roland Berger, 2020) Die Hervorhebung des Nutzens von Wasserstoff im Schwerlastverkehr wird auch in einem Beitrag des Öko-Instituts im Handelsblatt aufgegriffen (Matthes, 2021). Der Begriff des Schwerlastverkehrs umfasst hierbei den Transport von schweren Gütern mittels LKWs (Duden, n.d.). Dafür sind grundsätzlich mehrere Konzepte, nicht nur der Einsatz von Wasserstoff, denkbar (Stroh, 2021), auf die aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird.

Abschließend sei noch auf das DIHK-Faktenpapier zum Thema Wasserstoff aus dem Jahr 2020 verwiesen, welches verschiedene Anwendungsbereiche von Wasserstoff, darunter auch das Thema Mobilität genauer beleuchtet. Darin werden sowohl die Nachteile von Wasserstoff bezogen auf Mobilität, als auch Vorteile wie eine kürzere „Tankdauer“ basierend auf anderen Studien wie beispielsweise von ACATECH oder Agora, quantifiziert. (Bullman et al., 2020)

Neben der direkten Nutzung von Wasserstoff für Mobilitätsanwendungen können synthetische Kraftstoffe als Folgeprodukte eingesetzt werden (siehe Abschnitt 3.2). Gegenwärtig werden Methanol, Dimethylether, Methanol-to-gasoline-Kraftstoffe, Oxymethylenether oder Fischer-Tropsch-Kraftstoffe als vielversprechende Kandidaten angesehen (Sternberg et al., 2021). Die Kraftstoffe verfügen hierbei über individuelle Anwendungsbereiche, Emissionscharakteristika und Herstellprozesse. Gegenüber Wasserstoff zeichnen sie sich jedoch durch eine einfachere Handhabung bei Lagerung, Transport und Anwendung aus. Die Darstellung hoher Energiespeicherdichten kann dabei ohne den Einsatz hoher

Verdichtungen, Kryotechnik oder der Anwendung chemischer Speichersubstanzen (LOHC) erfolgen. Die Umwandlung zu synthetischen Kraftstoffen ist daher eine geeignete Maßnahme, um die energetische Nutzung von Wasserstoff im Verkehrsbereich zu flexibilisieren und eine räumliche Entkopplung von Herstellung und Anwendung zu ermöglichen. Die Herstellung synthetischer Kraftstoffe ist jedoch energieintensiv. Dies beruht auf den Energieverlusten der Konversionsverfahren der Prozessketten. Bei Power-to-fuel-Effizienzen von ca. 60 % (Schemme et al., 2020), wird sich daher die Verfügbarkeit günstiger erneuerbarer Energie als zentraler Standortfaktor für die Herstellung von Wasserstoff und damit auch synthetischen Kraftstoffen entwickeln. (Agora, 2018)

Literaturverzeichnis

- Agora, 2018. Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. Agora Verkehrswende; Agora Energiewende, Berlin.
- Blesl, M., Kessler, A., 2017. Energieeffizienz in der Industrie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55999-4>
- BMWi, 2020. Die Nationale Wasserstoffstrategie. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Bukold, S., 2020. Blauer Wasserstoff. Greenpeace Energy.
- Bullman, T., Gollnick, C., Schorpp, J., Oswald, H., 2020. Wasserstoff -DIHK Faktenpapier. Deutscher Industrie- und Handelskammertag e.V. (DIHK), Berlin.
- Cigal, J.C., 2016. Expanding use of hydrogen in the electronics industry. Specialty Gas Report.
- Cordis, 2019. Sustainable Recovery, Reprocessing and Reuse of Rare-Earth Magnets in a Circular Economy (SUSMAGPRO) [WWW Document]. CORDIS | European Commission. URL <https://cordis.europa.eu/project/id/821114> (accessed 9.24.21).
- Duden, n.d. Schwerlastverkehr [WWW Document]. URL <https://www.duden.de/node/161567/revision/161603> (accessed 9.27.21).
- DVGW, 2021. Klimaschutz und Resilienz. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e. V., Bonn.
- Encon Europe, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, 2018. Potentialatlas für Wasserstoff. Encon Europe GmbH, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH.
- Europäische Kommission, 2007. Reference Document on the Best Available Techniques in the Ceramic Manufacturing Industry. Europäische Kommission.
- Fishedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P., Weigel, M., 2014. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies. Journal of Cleaner Production, Special Volume: The

- sustainability agenda of the minerals and energy supply and demand network: an integrative analysis of ecological, ethical, economic, and technological dimensions 84, 563–580.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.063>
- Fleiter, T. (Ed.), 2013. Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien, ISI-Schriftenreihe “Innovationspotenziale.” Fraunhofer-Verl., Stuttgart.
- Fraile, D., Lanoix, J.C., Maio, P., Rangel, A., Torres, A., 2015. Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas (No. Deliverable No. 1.2.), Projekt “CertifHy.”
- Fraunhofer IEE, 2020. Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem : Energiesystem : Fokus Gebäudewärme.
- Geres, R., Lausen, J., Weigert, S., 2021. Roadmap für eine treibhausgasneutrale Ziegelindustrie in Deutschland. Ein Weg zur Klimaneutralität der Branche. FutureCamp Climate GmbH, Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e. V., Berlin.
- Gerhardt, N., Bard, J., Schmitz, R., Beil, M., Pfennig, M., Kneiske, T., 2020. Studie zum Einsatz von H₂ im zukünftigen Energiesystem unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudewärmeversorgung.
- Hebling, C., Ragwitz, M., Fleiter, T., Groos, U., Härle, D., Held, A., Jahn, M., Müller, N., Pfeifer, T., Plötz, P., 2019. Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland.
- Hölling, M., Weng, M., Gellert, S., 2017. Bewertung der Herstellung von Eisenschwamm unter Verwendung von Wasserstoff.
- Hübner, T., Guminski, A., von Roon, S., 2019. Energiewende in der Industrie , Branchensteckbrief der Keramikindustrie. Navigant Energy Germany GmbH, Berlin.
- IEA, 2019. The Future of Hydrogen. International Energy Agency.
- IEA and DECHEMA, 2013. Technology Roadmap Energy and GHG Reductions in the Chemical Industry via Catalytic Processes. International Energy Agency, International Council of Chemical Associations, DECHEMA.
- Klima Allianz Deutschland, 2021. Wasserstoff - Positionspapier der deutschen Zivilgesellschaft Rahmenbedingungen und Maßnahmen für eine nachhaltige und klimaneutrale Wasserstoffwirtschaft.
- Lösch, O., Prof. Dr. Eberhard Jochem, Natalja Ashley-Belbin, Gregor Zesch, 2020. Bewertung der Direktreduktion von Eisenerz mittels Elektrolyse-Wasserstoff. Karlsruhe.
- Lübbers, S., Hobohm, J., Thormeyer, C., Dambeck, H., 2021. Technische CO₂-Senken. prognos, dena.
- Matthes, F., 2021. Wasserstoff sollte zuerst in der Chemie- und Stahlindustrie eingesetzt werden.
- Ortner, S., Pehnt, M., Blömer, S., Auberger, A., Steinbach, J., Deurer, J., Popovski, E., Lösch, O., Langreder, N., Thamling, N., Sahnoun, M., Rau, D., 2021. Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung. Umweltbundesamt, Dessau.
- Prognos, Öko-Institut, W.-I., 2021. Klimaneutrales Deutschland 2045: Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Agora Energiewende.
- PtJ, 2021. Expertenempfehlung Forschungsnetzwerk Wasserstoff. Jülich.
- Roland Berger, 2020. Potenziale der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Baden-Württemberg.
- Saacke, 2020. Wasserstoff-Brenner für die industrielle Dekarbonisierung (Whitepaper). Saacke GmbH, Bremen.
- Salzgitter AG, 2021. Weiterer Baustein für die CO₂-arme Stahlproduktion. Pressemeldung der Salzgitter AG.
- Schemme, S., Breuer, J.L., Köller, M., Meschede, S., Walman, F., Samsun, R.C., Peters, R., Stolten, D., 2020. H₂-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production. International Journal of Hydrogen Energy, 22nd World Hydrogen Energy Conference 45, 5395–5414. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.028>
- Schneider, M., Mohr, M., Behrouzi, D., Fleiger, K., Hoenig, V., Hoppe, H., et al., 2020. Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf.
- Serna, M., 2021. SIDERWIN Pilot Plant Erection (5).

- SSAB, 2020. HYBRIT: SSAB, LKAB and Vattenfall to start up the world's first pilot plant for fossil-free steel. Pressemeldung SSAB.
- Steinbach, Dr.J., Deurer, J., Senkpiel, C., Brandes, J., Heilig, J., Berneiser, J., Kost, Dr.C., 2021. Wege zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes 2050.
- Sternberg, A., Schaadt, A., Szolak, R., Hebling, C., Rümmele, F., Hadrich, M.J., Ouda, M., Danckert, B., 2021. Hydrogen as an Enabler for Sustainable Mobility, in: Liebl, J. (Ed.), Heavy-Duty-, On- und Off-Highway-Motoren 2020, Proceedings. Springer Fachmedien, Wiesbaden, pp. 1–9.
https://doi.org/10.1007/978-3-658-34362-0_1
- Stroh, I., 2021. Schwerlastverkehr Brennstoffzelle versus Wasserstoffverbrennungsmotor.
- Töpler, J., Lehmann, J. (Eds.), 2017. Wasserstoff und Brennstoffzelle, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. ed. Springer Vieweg, Berlin.
- Wawrzinek, K., Keller, C., 2007. Industrial Hydrogen Production & Technology - FuncHy-Workshop. HDV, Karlsruhe.
- World Energy Council, 2018. Hydrogen - Industry as Catalyst. World Energy Council.