

Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem – eine systemische Analyse

Im Rahmen des Teilprojektes 4 des DVGW-Forschungsvorhabens Roadmap Gas 2050 ist der verstärkte Einsatz von Wasserstoff in einem **Wasserstoffszenario anhand einer systemanalytischen Bewertung** untersucht worden; Details sind dem Deliverable 4.4 [1] zu entnehmen. Hierfür wurde das deutsche Energiesystem in einem Verbund von Modellen für die Abschätzung der Energienachfragen **in den Sektoren Mobilität, Gebäude und Industrie** und für die Energiebereitstellung (Strom, Wärme, Kraftstoff und Gas) modelliert. Der Bilanzraum der Modellierung ist für die Nachfragemodelle Deutschland und für das Energieangebot EU und MENA mit Schwerpunkt Deutschland. Grundlage der Modellierung ist die Einhaltung der THG-Minderungsziele **für die Sektoren entsprechend dem Klimaschutzgesetz von 2021**. Ziel war es zum einen, die Bedingungen und Auswirkungen eines schnellen Hochlaufs der Nachfrage von Wasserstoff und weiteren EE-Gasen zu analysieren; zum anderen sollte auch die Bereitstellung der Gase beschrieben werden. Ein möglichst wahrscheinliches Szenario im Sinne einer Vorhersage zu entwerfen, war hingegen keine Zielsetzung des Vorhabens. Kriterien wie Handwerkerangel, Akzeptanz und betriebswirtschaftliche Überlegungen oder regulatorische Randbedingungen wurden vor diesem Hintergrund nicht betrachtet, **in der Realität zu einer langsameren Umsetzung** führen kann. Umgekehrt könnte der russische Angriffskrieg auf die Ukraine und die damit verbundene Energiekrise zu administrativen Maßnahmen auf europäischer und nationaler Ebene führen, die zu einer Beschleunigung der Umsetzung führen.

von: Wolfgang Köppel (DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT), Prof. Dr. Martin Wietschel, Dr. Till Gnann, Dr. Tobias Fleiter, Benjamin Lux, Pia Manz, Dr. Matthias Rehfeldt, Daniel Speth (alle: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI), Dr. Jan Steinbach (Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien IREES) & Dr. Benjamin Pfluger (Fraunhofer-Institut für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG)

Das Wasserstoffszenario stellt ein Leitplankenszenario dar. Hierbei liegt der Fokus nicht auf einem austarierten Energiesystem, sondern darauf aufzuzeigen, welche Möglichkeiten der Energieträger innerhalb der Zielvorstellungen bzw. Vorgaben des

Klimaschutzgesetzes aus dem Jahr 2021 bietet kann. Daher wird in dem Wasserstoffszenario ein Rahmen gesetzt, in dem Wasserstoff bevorzugt behandelt wird. Hierfür wurden für die H₂-Herstellung, -Infrastruktur und -Anwendungen günstige Rahmenbedingungen

u. a. zur Geschwindigkeit des Aufbaus und der Wirtschaftlichkeit unterstellt. Für konkurrierende Optionen hingegen werden eher pessimistische Annahmen getroffen. In **Tabelle 1** sind die wesentlichen Ausrichtungen dargestellt.

Ergebnisse

Tabelle 1: Rahmenbedingungen des Wasserstoffszenarios im Überblick

Bereich	Rahmenbedingungen
Klimaziele	sektorspezifische Einhaltung der Klimaziele 2021
Defossilierungsstrategie	hohen Einsatz von Wasserstoff und Biomethan
Wasserstoff	20 Vol.-% Beimischung bis 2030 Verstärkter Einsatz von Wasserstoff in Industrie und Mobilität
Sanierungsrate Gebäudesektor	1,4 Prozent pro Jahr
Heizungen	erhöhter Anteil EWP
Preise Energieträger	Stand und Prognosen aus 2022 – Berücksichtigung aktueller Preissteigerungen

Für das Jahr 2030 ergibt sich im Wasserstoffszenario eine Wasserstoffnachfrage von 99 Terawattstunden (TWh), die bis 2045 deutlich auf 664 TWh ansteigt. Die anderen Gase (Erdgas, Biogas und synthetisches Methan) werden im Jahr 2030 mit insgesamt 519 TWh nachgefragt und 2045 noch mit 76 TWh. Die sektorale Aufteilung wird in der **Abbildung 1** dargestellt.

Der zur Deckung dieses Verbrauchs benötigte Wasserstoff wird 2045 innerhalb Deutschlands (ca. 272 TWh) und der ►

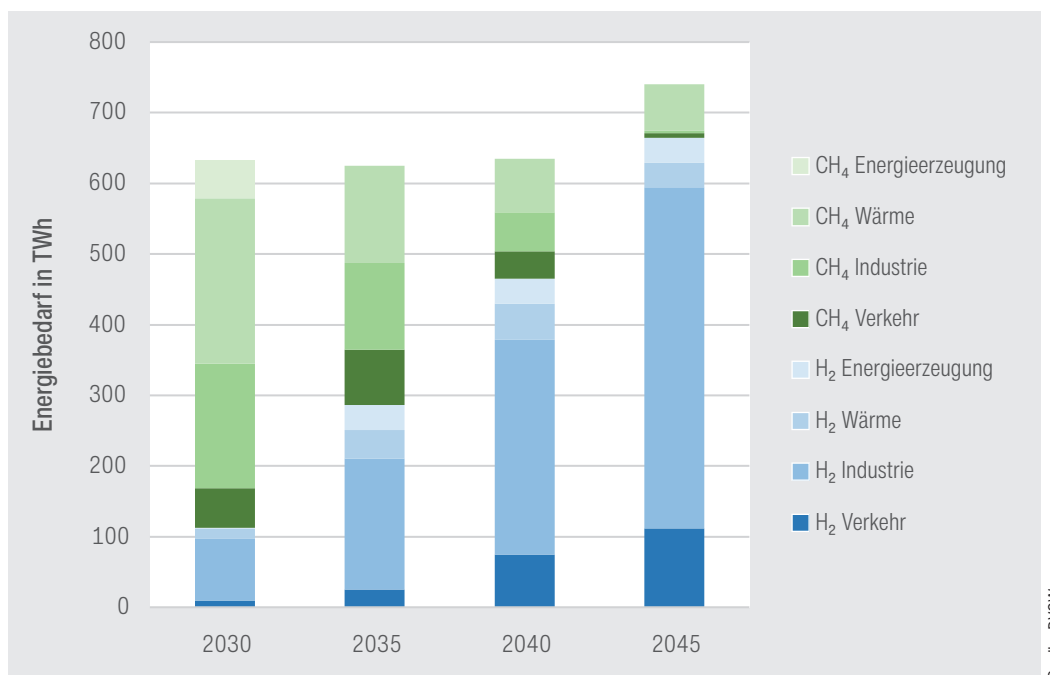


Abb. 1: Gasnachfrageentwicklung im Wasserstoffszenario

Quelle: DVGW

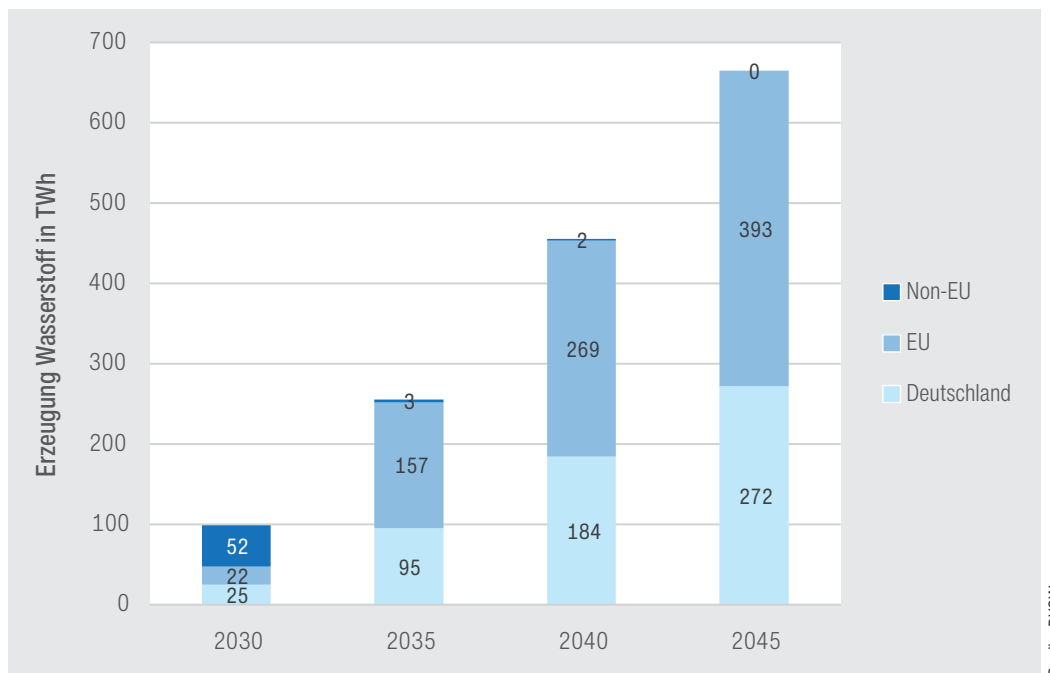


Abb. 2: Herkunft des Wasserstoffs für Deutschland

Quelle: DVGW

EU (ca. 393 TWh) erzeugt (Abb. 2), ein Import wäre dann nicht mehr nötig. 2030 dagegen werden noch ca. 52 TWh nach Deutschland aus Nicht-EU-Ländern importiert. Für die Versorgung der Inlandsnachfrage bilden sich innerhalb Deutschlands zwei zentrale Wasserstoff-Flussrichtungen von Norden nach Westen und von Norden nach Süden aus. Hierbei werden jeweils die windreichen Küstengebiete mit hoher Wasserstoffherzeugung mit den entsprechenden Nachfragezentren verbunden. Das Ergebnis des europäischen Wasserstoffhandels zeigt, dass Wasserstoff in den Modellergebnissen von den Rändern Europas Richtung Zentraleuropa fließt. Beson-

ders stark ausgeprägt sind dabei insbesondere H₂-Exporte von den britischen Inseln und von Frankreich nach Deutschland.

Unter den getroffenen Szenarioannahmen wird Wasserstoff besonders in der Industrie eine substantielle Rolle spielen. Neben den Verbrauchern – Direktreduktion in der Stahlherstellung und weiteren Hochtemperaturanwendungen in Industrieöfen (2045: 123 TWh) sowie der stofflichen Nutzung in der Chemieindustrie (2045: 273 TWh) – werden weitere Anwendungen aufgrund der optimistischen Annahmen bezüglich Wasserstoff konkurrenzfähig zu direktelek-

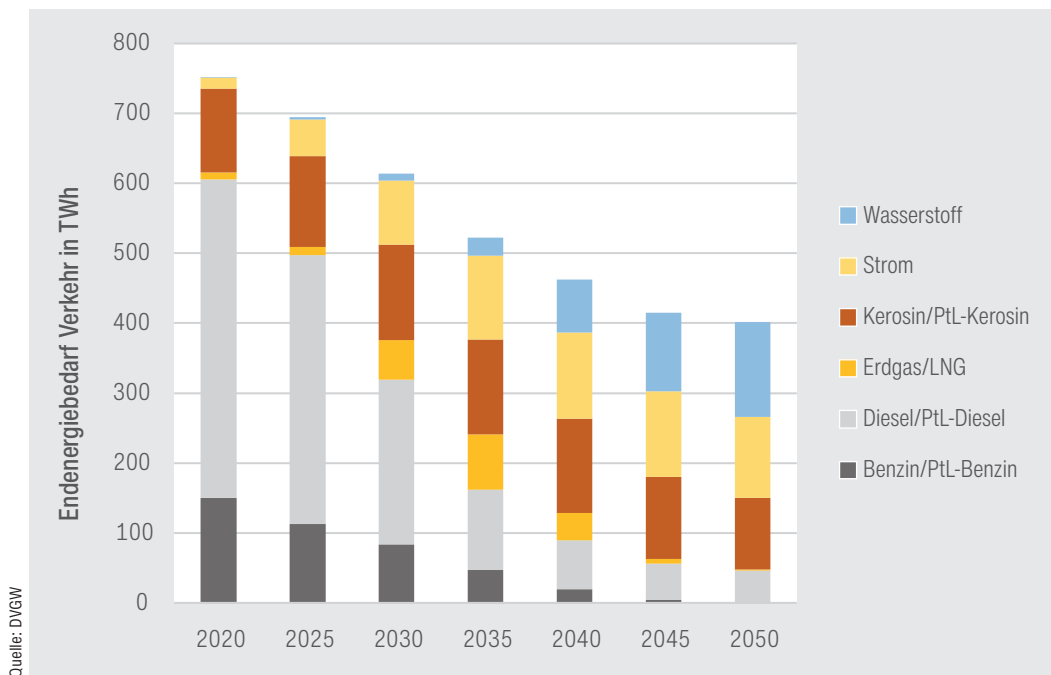


Abb. 3: Energienachfrage im Mobilitätssektor für den Zeitraum zwischen den Jahren 2020 und 2050

trischen Lösungen: In der Dampferzeugung werden im Rahmen der Szenarioannahmen wasserstoffbasierte Dampfkessel wirtschaftlich attraktiv und decken im Jahr 2045 mit 87 TWh einen großen Anteil der Endenergienachfrage. Die Wasserstoffnachfrage der Industrie steigt insbesondere ab 2030 (87 TWh) stark an und erreicht im Jahr 2045 einen Wert von 482 TWh.

Das Wasserstoffszenario setzt für rohstoffliche Verwendung und Prozesswärme eine frühzeitige und im weiteren Verlauf eine Wasserstoffversorgung voraus, die die Industrie auch in der Fläche erreicht. Grüner Wasserstoff muss früh in ausreichenden Mengen und sehr günstig zur Verfügung stehen, um sich über die gesetzten Anwendungen (Stahl, Chemie) hinaus gegen die direkte Elektrifizierung durchzusetzen. Der Um- und Ausbau der Transportinfrastruktur für Wasserstoff muss genauso wie der für Strom großflächig und zügig geschehen, sodass er auch in stark betroffenen Regionen nicht zum Flaschenhals der Industrietransformation wird. Der Aufbau eines Wasserstoff-Transportnetzes sollte zu Beginn große Industrienachfrager (ca. 20 Standorte) zentral berücksichtigen. Die Entwicklungen im Szenario erfordern dann auch zeitnah die Umstellung von Verteilnetzen auf Wasserstoff. Weiterhin müssen neue CO₂-neutrale Herstellungsverfahren beginnend 2025 und in relevantem Umfang 2030 marktfähig und auf den industriellen Maßstab skaliert sein. Hierfür gilt es, für die kommenden Jahre eine klare Perspektive für den wirtschaftlichen, großindustriellen Betrieb CO₂-neutraler Herstellungsver-

fahren zu schaffen, damit Unternehmen die nötigen Investitionen und strategischen Weichenstellungen anstoßen können. Dabei ist die internationale Wettbewerbsfähigkeit vor dem Hintergrund von Carbon-Leakage-Gefahren und der Abwanderung von Teilen der Wertschöpfung zu berücksichtigen, die in diesem Szenario ausgeklammert wurden.

In der Mobilität wird Wasserstoff selbst unter den getroffenen günstigen Rahmenbedingungen erst nach 2030 eine größere Rolle spielen (2030 beträgt die Nachfrage nur 10 TWh). Das 2030-Sektorziel wird insbesondere durch den Einsatz batterieelektrischer Pkw und Nutzfahrzeuge erreicht. Langfristig ist jedoch ein hoher Wasserstoffbedarf mit 112 TWh (Abb. 3) im Jahr 2045 zu sehen, getrieben u. a. durch einen hohen Einsatz bei schweren Lkw. Wasserstoff als Treibstoff für Lkw ist besonders dann interessant, wenn hohe Gewichtsanforderungen für den Gütertransport, hohe Reichweitenanforderungen und der Bedarf nach schnellen Tankvorgängen bestehen. Zu beachten ist hierbei, dass aufgrund der Annahme einer als fehlend angenommenen Ladeinfrastruktur in diesem Szenario batterieelektrische Nutzfahrzeuge nur im regionalen Einsatz in Betracht kommen.

Die Verfügbarkeit der Infrastruktur ist somit ein wesentlicher Faktor für die Weichenstellungen von alternativen Antrieben und Kraftstoffen im Verkehr. Unklar ist an dieser Stelle insbesondere, ob und ab wann der Aufbau ggf. zusätzlich benötigter Infrastruktur von Wasserstofftank- ▶

stellen für Pkw und insbesondere für Lkw ökonomisch sinnvoll ist. Diese Entwicklung sollte weiter untersucht werden, sodass insbesondere Infrastrukturmaßnahmen zielgerichtet gesteuert werden können. Da bei dem Aufbau der Infrastruktur bezüglich der Finanzierung die Politik eine entscheidende Rolle spielt, muss sie hier die entsprechende Schwerpunktsetzung vornehmen.

Nach 2030 können auch Brennstoffzellen-Pkw bei schweren Fahrzeugen mit hohen Reichweitenanforderungen in einem gewissen Maße Marktanteile gewinnen (ca. 15 Prozent des Bestands

2045). Hierzu müssen aber u. a. die Kosten der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks noch deutlich gesenkt werden. Die Kostenreduktion kann insbesondere durch hohe Stückzahlen erreicht werden. Flüssigerdgas (LNG) kommt in gewissem Umfang in den nächsten Jahren insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen im Fernverkehr zum Einsatz, dient aber eher als Brückentechnologie, da nach 2030 vermehrt Wasserstoff-Lkw in diesem Segment eingesetzt werden.

Für Schiffe und Flugzeuge sollten Alternativen zu konventionellen Kraftstoffen weiter erforscht werden. Aufgrund deren langer Lebensdauern

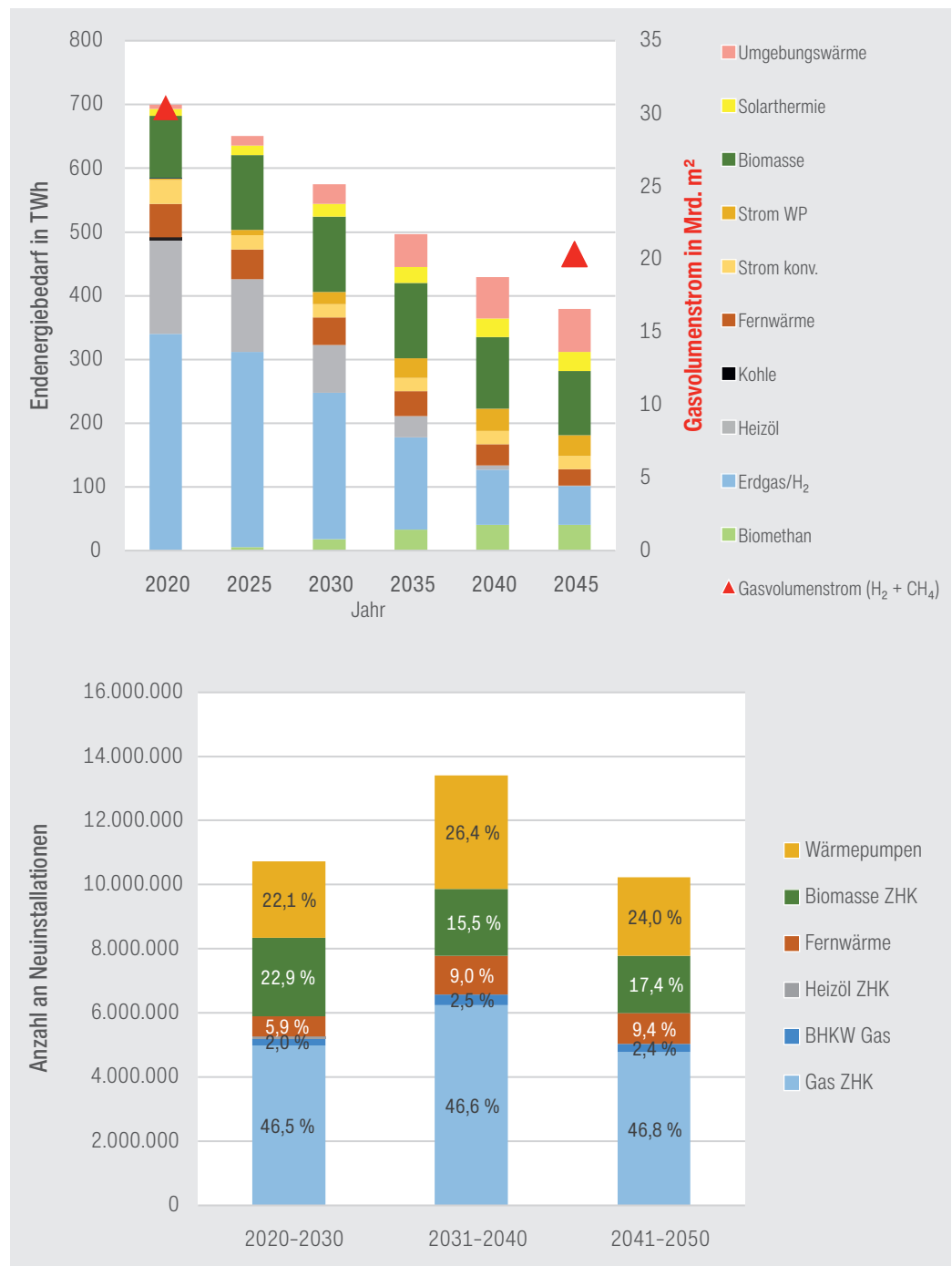


Abb. 4: Entwicklung des Gebäudesektors im Wasserstoffszenario

Quelle: DVGW

erscheint der Einsatz von Biomass-to-Liquid (BtL) bzw. Power-to-Liquid (PtL) zumindest mittelfristig sehr wahrscheinlich. Alternative Antriebe, beispielsweise Batterie- oder Brennstoffzellenflugzeuge werden zwar erforscht, stehen jedoch noch am Beginn ihrer Entwicklung. Ihr potenzieller Beitrag ist daher mit heutigem Wissensstand noch schwierig zu beurteilen.

Im Gebäudesektor reduziert sich der Endenergieverbrauch für Wärme durch energetische Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle und effizientere Heizung sowie Nutzung anderer Energieträger im Simulationszeitraum von 2020 bis 2045 um 46 Prozent, was mit 1,4 Prozent pro Jahr Sanierungsrate und einer Trendfortsetzung beim Heizungstausch als eher moderat angesehen werden kann. Hierfür sind umfangreiche Investitionen in Gebäude sowie in Brennstoffwechsel notwendig, die wegen Renovationszyklen frühzeitig angegangen werden müssen. Hierfür müssen die Rahmenbedingungen entsprechend gesetzt werden.

Durch Effizienzmaßnahmen, die Umstellung auf erneuerbare Wärmesysteme sowie eine Beimischung von Wasserstoff und Biomethan von insgesamt rund 20 TWh im Jahr 2030 werden die Sektorziele des Klimaschutzgesetzes erreicht. 2030 finden dabei noch 248 TWh gasbasierte Energieträger (Erdgas, Wasserstoff, Biomethan) eine Verwendung, bis 2045 geht der Anteil der fossilen Energieträger dann auf null zurück. Dabei werden im Jahr 2045 noch 101 TWh gasbasierte Energieträger genutzt, die dann vollständig durch Wasserstoff oder Biomethan bereitgestellt werden (Abb. 4). Im Simulationszeitraum werden 16,7 Mio. Gas-/Wasserstoff-Zentralheizungen, gefolgt von 8,4 Mio. Wärmepumpen neu installiert. Dies entspricht einer Quote von ca. 46 Prozent, die ca. 20 Prozentpunkte unter der langjährigen gasgeprägten Heizungsaustauschquote liegt. Dennoch überwiegen in diesem Szenario die Gasanschlüsse. Eine Untersuchung der verteilnetzseitigen Auswirkungen der zukünftigen Heizungsstruktur erfolgte zwar nicht. Trotzdem

kann vermutet werden, dass die Gasverteilnetze in diesem Szenario weiterhin einen wichtigen Beitrag zur Energieversorgung leisten.

Im Wasserstoffszenario wurde zudem untersucht, inwieweit eine Erreichung des Sektorziels bis 2030 mit einer erst langfristigen Umstellung der Gasnetze auf Wasserstoff vereinbar ist. Die Ergebnisse zeigen, dass bei ambitionierten Energieeffizienzmaßnahmen 2030 ein Anteil von rund 40 Prozent Gasversorgung in Gebäuden möglich ist, sofern davon rund 10 Prozent bereits über grüne Gase (Wasserstoffbeimischung und Biomethan) bereitgestellt werden. Allerdings ist es für die Zielerreichung ebenfalls erforderlich, dass auch weiterhin kurzfristig ein Wandel in der Wärmeversorgung stattfindet und erneuerbare Wärmeversorgungssysteme (wie z. B. Wärmepumpen und Biogasthermen) eingesetzt werden. Weiterhin müssen die Ambitionen bezüglich der Sanierung der Gebäude gegenüber dem heutigen Niveau deutlich gesteigert werden. Wird davon ausgegangen, dass bis 2045 eine Umstellung der Gasnetze auf Wasserstoffnetze erfolgt, so müssen die neu installierten Gaskessel wasserstofftauglich sein (100 Prozent). Sofern das Wasserstoff-Szenario als Option offengehalten werden soll, müssen entsprechende Instrumente implementiert werden, die passende ordnungsrechtliche Vorgaben für zu installierende neue Gaskessel festlegen. Wenn das Wasserstoff-Szenario als Option für den Gebäudebereich infrage kommt, sollte sichergestellt werden, dass entsprechende Mengen Wasserstoff vor dem Hintergrund der Konkurrenzsituation zu den anderen Sektoren für den Sektor Gebäude zur Verfügung stehen. Hierbei gilt es zu beachten, dass z. B. der Wasserstoffeinsatz in der Industrie zur Erreichung der Treibhausgasneutralität derzeit eher alternativlos ist.

Auf der Seite der Energiebereitstellung zeigt sich, dass das Stromerzeugungssystem in Deutschland durch die politischen Vorgaben für den Leistungsaufbau von erneuerbaren Energien sehr stark determiniert ist. Ein Ausbau von

Fotovoltaik- oder Windkraftanlagen über die politischen Zielsetzungen hinaus wird in der Optimierung nicht als wirtschaftlich sinnvoll bewertet. Insgesamt werden 2045 in Deutschland insgesamt 1.172 TWh im Wasserstoff-szenario erzeugt (Abb. 5). Hiervon werden ca. 87 Prozent durch 631 Gigawatt (GW) Stromerzeugungsleistung der nicht gesicherten Quellen Wind und Fotovoltaik bereitgestellt. Schon 2030 werden ca. 36 TWh Strom zur Wasserstoffherzeugung eingesetzt, was ca. 6 Prozent der volatilen Stromerzeugung darstellt. Bis 2045 wächst dieser Anteil dann auf ca. 38 Prozent (388 TWh) an.

Ferner ist zu erwähnen, dass der starke Ausbau von Fotovoltaik die Verteilnetze deutlich belasten würde (Abb. 6). Hierdurch kann sich eine netzentlastende Fahrweise von Elektrolyseuren auf Verteilnetzebene auf die Zielerreichung positiv auswirken. Insgesamt könnten im Sommer 111 GW Elektrolyseleistung und im Winter 73 GW benötigt werden.

Trotz hochgesteckter politischer Ziele beim Ausbau von erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien in Deutschland ist die europäische Dimension für die deutsche Energieversorgung unverzichtbar. Das europäische Ausland stellt sich in den Modellergebnissen für den Umwandlungssektor als wichtige Bezugsquelle von Strom und Wasserstoff dar. Diese Wasserstoffnachfrage wird insbesondere durch Fotovoltaik und solarthermische Anlagen im Süden der EU sowie Windkraftanlagen im Norden gedeckt. Insgesamt wird in dem Szenario ein Import von 480 TWh im Jahr 2045 nach Deutschland gesehen. Die Einbindung der Bundesrepublik in ein europäisches Strom- bzw. Wasserstofftransportnetz sollte deshalb weiter vorangetrieben werden. Dies setzt eine gemeinsame europäische Strategie zum Thema Wasserstoff voraus, deren Umsetzung auch zur Resilienz der europäischen Energieversorgung beitragen kann. Wasserstoffimporte aus dem nicht-europäischen Ausland sind unter den gewählten Rahmenbedingungen zwar nicht wirt- ▶

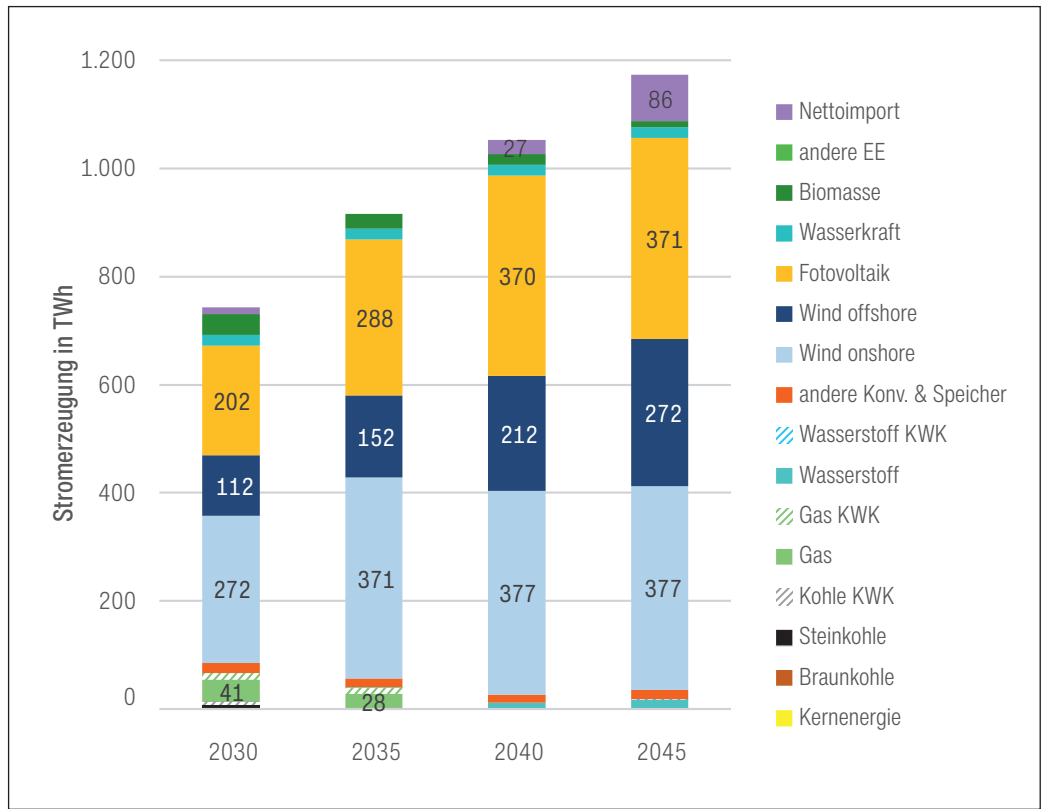


Abb. 5: Gasnachfrageentwicklung im Wasserstoff-szenario (andere Gase = Erdgas, Biogas, Methan)

Quelle: DVGW

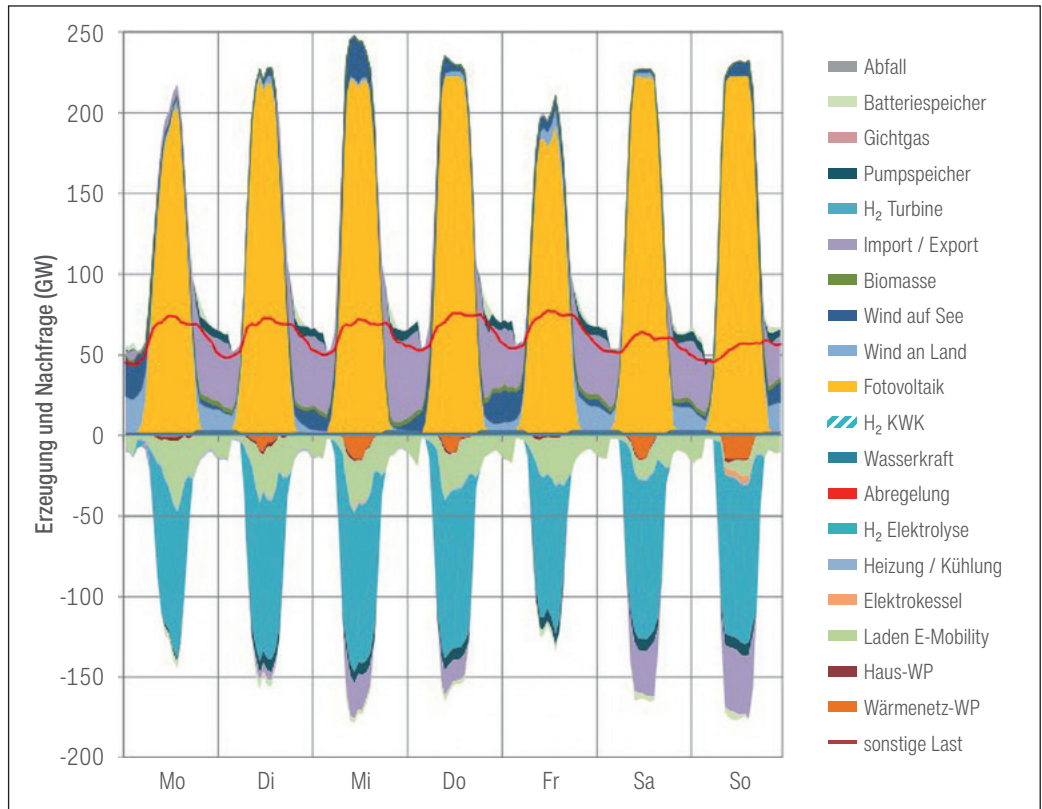


Abb. 6: Kraftwerkseinsatz in Deutschland im Wasserstoff-szenario (2045, Kalenderwoche 24)

Quelle: DVGW

schaftlich, sie könnten aber bei mangelnder Akzeptanz des notwendigen Ausbaus der erneuerbaren Anlagen oder bei einem verzögerten europäischen Ausbau der Wasserstoffherzeugung und des Wasserstofftransportes in der EU an Bedeutung gewinnen.

Der Aufbau von Elektrolyseursleistungen in Deutschland folgt dem günstigen, verfügbaren erneuerbaren Stromerzeugungspotenzial und konzentriert sich auf Norddeutschland. Innerhalb der Bundesrepublik ist deshalb der Ausbau von Wasserstoffpipelines zwischen der wind-

reichen Küste und den Wasserstoffnachfragezentren in West- und Süddeutschland ein robustes Ergebnis.

Die Angebotsoptimierung zeigt, dass Wasserstoff als saisonales Speichermedium kosteneffizient ist. In der Optimierung übersteigt das genutzte Arbeitsgasvolumen von 59 TWh das Fassungsvermögen (bezogen auf das Speichervolumen) aktuell genutzter Erdgas-Salzkavernenspeicher. Durch die Speicherfähigkeit von Wasserstoff können mittels Elektrolyse insbesondere hohe Windeinspeisungen in Frühjahr und Herbst beziehungsweise hohe Fotovoltaik-Spitzen im Sommer in Wasserstoff umgesetzt werden. Wasserstoff ist somit ein wichtiger Bestandteil für die Integration von erneuerbaren Stromerzeugern in das Energiesystem. Für den Umwandlungssektor ist der Energieträger dabei aber auch ein teurer Brennstoff und wird nur in geringem Maß verwendet; er hilft hauptsächlich im Winter bei der Deckung von Spitzenresiduallasten.

Fazit

Das Wasserstoffscenario als Leitplankenszenario hat gezeigt, dass die sektoralen Klimaziele mit Fokus auf Wasserstoff mit einem Wasserstoffbedarf im Jahr 2045 von ca. 670 TWh erreicht werden können. Ein Großteil des Wasserstoffbedarfs mit ca. 480 TWh fällt in der Industrie an. Für die Zielerreichung in den anderen Sektoren werden neben dem Einsatz von grünem Wasserstoff und Biomethan verstärkt Effizienzmaßnahmen und Direktstromnutzung zum Einsatz kommen. Auch kann aus der Studie abgeleitet werden, dass der notwendige sehr schnelle Ausbau der Erzeugungskapazitäten zur Zielerreichung ein schnelles Nachführen der Energietransport- und -verteilinfrastruktur sowie der Anwendungstechnologien nach sich zieht. Dies bedeutet, dass die Anpassungen der Infrastruktur sofort angegangen werden müssen, damit keine Versorgungsengpässe mit regenerativen Energien entstehen. ■

Literatur

[1] Wietschel, M. et al.: Energiesystemmodellierung zur quantitativen Bewertung der Rolle von Gas im zukünftigen Energiesystem – Ergebnisse der Leitplankenszenarien; Roadmap Gas 2050 Deliverable 4.4; 2022.

Die Autoren

Wolfgang Köppel ist Gruppenleiter „Systeme und Netze“ an der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT.

Prof. Dr. Martin Wietschel ist Leiter des Competence Centers Energietechnologien und Energiesysteme am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Dr. Till Gnann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter für techno-ökonomische Bewertung von alternativen Antrieben am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Dr. Tobias Fleiter ist Leiter des Geschäftsfelds Nachfrageanalysen und -projektionen am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Benjamin Lux und **Pia Manz** sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Bereich Modellierung von Energiesystemen am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Dr. Matthias Rehfeldt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Modellierung von industrieller Energienachfrage und Brennstoffwechsel am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Daniel Speth ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Elektrifizierungsoptionen schwerer Nutzfahrzeuge am Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

Dr. Jan Steinbach ist Geschäftsführer der IREES GmbH.

Dr. Benjamin Pfluger leitet den Bereich Integrierte Energieinfrastrukturen am Fraunhofer-Institut für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG.

Kontakt:

Wolfgang Köppel
DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT
Engler-Bunte-Ring 1-9
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-41223
E-Mail: koeppel@dvwg-ebi.de
Internet: www.dvwg-ebi.de

Besuchen Sie uns online: shop.wvgw.de