

# Einfluss des Strom- und Wasserstoff-Produktionsmixes auf die Well-to-Wheels-Bilanz elektrisch angetriebener Fahrzeuge

Anika Regett, Christoph Heller, Thomas Mayer und Jörg Wind

*Wasserstoff wird in Verbindung mit der Brennstoffzellentechnologie als einer der möglichen Energieträger für die Elektromobilität gehandelt. Die Vorteile liegen auf der Hand: Neben der (im Vergleich zu elektrischer Energie) einfacheren Speicherbarkeit des Wasserstoffes zeichnen sich Brennstoffzellenfahrzeuge gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen v. a. durch die schnelle Betankungszeit (ca. 3 Minuten) aus. Auf welchen Herstellungspfaden dieser Wasserstoff produziert wird, hat allerdings einen deutlichen Einfluss auf die damit verbundenen Umweltwirkungen. Eine aktuelle Untersuchung analysiert diese anhand von vier Szenarien, deren Perspektive bis zum Jahr 2050 reicht.*

Die derzeit sehr dynamischen Entwicklungen in der europäischen Energiewirtschaft haben einen direkten Einfluss auf die Bewertung der Elektromobilität, da für eine ganzheitliche ökologische und energetische Well-to-Wheels (WtW)-Bewertung elektrischer Antriebe insbesondere auch die Herkunft der Primärenergie für die Stromerzeugung beziehungsweise Wasserstoffproduktion zu berücksichtigen ist. Mit dem Ziel, aktuelle und zukünftige Fahrzeugantriebe aus ökologischer und energetischer Sicht zu bewerten und zu vergleichen, wurde durch den europäischen Forschungsverbund JEC eine Well-to-Wheels-Analyse erarbeitet [1].

In dieser Studie wurde für den europäischen Strommix auf Daten aus 2009 zurückgegriffen. Für die Jahre 2020 bis 2050 ist jedoch von einem stark veränderten Kraftwerkspark auszugehen. Darüber hinaus wurden in [1] nur einzelne Herstellungspfade von Wasserstoff ( $H_2$ ) bzw. Strom betrachtet, eine Prognose des Herstellungsmixes wurde jedoch nicht erstellt.

Daher war es Ziel einer Studie der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. (FfE) im Auftrag der Daimler AG, den genauen Einfluss des ökonomisch optimierten  $H_2$ -Produktionsmixes und der Zusammen-

setzung der Stromerzeugung auf die Well-to-Wheels-Bilanz elektrischer Fahrzeuge für Deutschland zu bestimmen. Dazu wurden unterschiedliche Szenarien bis zum Jahr 2050 entwickelt, welche die möglichen Entwicklungen relevanter Einflussgrößen auf den zukünftigen Strom- und  $H_2$ -Produktionsmix berücksichtigen.

Die entwickelten Szenarien wurden im Rahmen einer WtW-Analyse genutzt, um die Umweltwirkungen (Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf) elektrischer Antriebe angesichts der energiewirtschaftlichen Entwicklungen zu bewerten. Neben dem besonderen Fokus auf Brennstoffzellenfahrzeuge (Fuel Cell Electric Vehicle – FCEV) wurden auch batterieelektrische Fahrzeuge (Battery Electric Vehicle – BEV) betrachtet. Das methodische Vorgehen ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

## Methodisches Vorgehen

Basierend auf einer Metastudie wurden die relevanten Einflussgrößen auf den  $H_2$ -Produktionsmix identifiziert. Dafür wurde eine Vielzahl an Studien zu Wasserstoff-szenarien ([2], [3]) ausgewertet. Darauf aufbauend erfolgte die Erstellung der Szenarien zur zukünftigen Zusammensetzung der Wasserstoffproduktion. Dafür wurden die Szenarien zunächst in Hinblick auf die Entwicklungspfade der als relevant klassifizierten Einflussgrößen beschrieben. So wurde bspw. die Entwicklung der Erzeugung aus erneuerbaren Energien bis in das Jahr 2050 fortgeschrieben oder die Wasserstoffnachfrage des Verkehrssektors abgebildet. Anschließend erfolgten die Modellierung

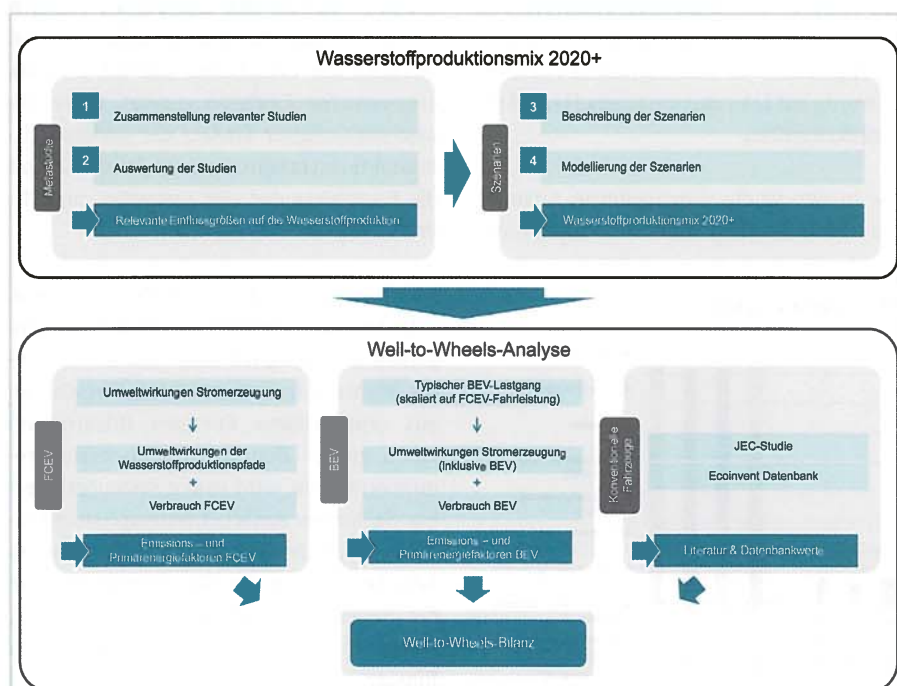


Abb. 1 Darstellung des methodischen Vorgehens

der Szenarien und die Ableitung des H<sub>2</sub>-Produktionsmixes in den Jahren 2020, 2025, 2030 und 2050.

Für die Bestimmung des H<sub>2</sub>-Produktionsmixes wurden die Einflussgrößen als Randbedingungen eines Optimierungsproblems verstanden. Ziel der Optimierung war die Berechnung des H<sub>2</sub>-Produktionsmixes bei Minimierung der H<sub>2</sub>-Gestehungskosten. Da die Stromkosten eine wichtige Einflussgröße auf die H<sub>2</sub>-Gestehungskosten der Elektrolyse darstellen, wurden diese mithilfe stündlich aufgelöster Stromszenarien bestimmt.

Für die Bestimmung des wirtschaftlichen Elektrolysepotenzials wurden die Rückwirkungen der Elektrolyse auf das Gesamtsystem und den Strompreis berücksichtigt. Aufgrund der Schwierigkeit zukünftige Strompreise zu prognostizieren, wurden die Stromkosten über die Grenzkosten der Kraftwerke durch Gegenüberstellung der Residuallast und der Merit Order der konventionellen Kraftwerke bestimmt.

In der Studie wurden unterschiedliche Wasserstoffherstellungspfade und Verteilungsmöglichkeiten berücksichtigt. Zu den Herstellungspfaden gehören die dezentrale und zentrale Elektrolyse, die Herstellung von Wasserstoff aus Biomasse, die dezentrale und zentrale Erdgasreformierung, die Kohlevergasung, die partielle Oxidation von Schweröl und der Überschuss-Wasserstoff, welcher als industrielles Nebenprodukt entsteht. Dabei wurde wie in [4] zwischen einem Überschuss, welcher ungenutzt abgefakelt wird, und einem energetisch genutzten

Überschuss, welcher durch andere Brennstoffe ersetzt werden muss, unterschieden.

Basierend auf den Analysen zum H<sub>2</sub>-Produktionsmix wurden anschließend die Umweltwirkungen der Strom- und Wasserstoffszenarien erarbeitet. Dazu wurden die Emissions- und Primärenergiefaktoren der einzelnen Herstellungspfade bestimmt und nach Zusammensetzung des H<sub>2</sub>-Produktionsmixes anteilig gewichtet. Besonderer Fokus der Analyse lag auf der Bewertung des elektrischen Erzeugungssystems, da dieses neben der Wasserstoffherstellung vor allem auch für BEV eine wichtige Rolle spielt. Wie in [5] bereits beschrieben, ist für zeitlich variable Prozesse (z. B. Elektrolyse, Laden von Elektrofahrzeugen) die zeitliche Auflösung der Bilanzierung von Bedeutung.

Daher wurden in diesem Projekt zur Bilanzierung der strombasierten Prozesse stündlich aufgelöste Emissions- und Primärenergiefaktoren verwendet, welche analog zur Stromkostenprognose über die Residuallast und die Merit Order der Kraftwerke bestimmt wurden. Mithilfe der berechneten spezifischen Emissions- und Primärenergiefaktoren für Strom und Wasserstoff, dem Fahrzeugverbrauch und typischen Ladelastgängen von Elektrofahrzeugen aus [6] wurden die WtW-Analysen von FCEV und BEV für jedes Szenario und Jahr durchgeführt. Für konventionelle Fahrzeuge wurde auf Literaturwerte aus [1] und [7] zurückgegriffen.

Die in der Studie durchgeführte Bilanzierung berücksichtigt auch die Vorkette der

Brennstoff- bzw. Kraftstoffbereitstellung. Die Treibhausgasemissionen beziehungsweise der Primärenergiebedarf wurde den strombasierten Prozessen durchschnittlich zugewiesen, wobei die Lasterhöhung durch die Elektrolyse und der Ladelastgang von Elektrofahrzeugen berücksichtigt wurden.

## Wasserstoffszenarien

Basierend auf den Ergebnissen der Metastudie wurden vier Szenarien abgeleitet:

- Szenario 1 „Basisszenario“: Referenzszenario, das sich an den erwarteten Entwicklungen der Energiereferenzprognose [2] orientiert;
- Szenario 2 „Neues EEG und Umweltbewusstsein“: Höhere CO<sub>2</sub>-Preise, Ausbau der erneuerbaren Energien gemäß EEG-Novelle 2014 (verstärkter Ausbau der Windkraft);
- Szenario 3 „Technikeffizienz“: Erhöhte Effizienzsteigerung der Fahrzeuge, Verfügbarkeit von Carbon Capture and Storage (CCS) ab dem Jahr 2030;
- Szenario 4 „Ressourcenknappheit“: Höhere Rohstoffpreise, stärker eingeschränkte Biomasseverfügbarkeit.

Im Gegensatz zu den anderen drei Szenarien erfolgt für Szenario 2 kein kostenoptimierter Einsatz der Elektrolyse, sondern es werden für die Wasserstoffproduktion zunächst alle bilanziellen Überschüsse aus erneuerbaren Energien genutzt, bevor ein kostenoptimierter Einsatz der anderen H<sub>2</sub>-Produktionsverfahren erfolgt. In Abb. 2 sind die Ergebnisse der vier Szenarien zum H<sub>2</sub>-Produktionsmix dargestellt.

Es wird deutlich, dass sich die Zusammensetzung des H<sub>2</sub>-Produktionsmixes in Abhängigkeit der Szenarien sehr stark unterscheidet. Während in Szenario 2 die Überschüsse aus erneuerbaren Energien (Elektrolyse) einen großen Beitrag zur Wasserstoffproduktion liefern, wird in den kostenoptimierten Szenarien zunächst Nebenproduktwasserstoff aus der Industrie genutzt. Erst im Jahr 2030, wenn die Wasserstoffnachfrage die Nebenproduktverfügbarkeit übersteigt, kommen andere Produktionsverfahren zum Einsatz.

Im Basisszenario ist aufgrund der steigenden CO<sub>2</sub>-Preise und der angenommenen

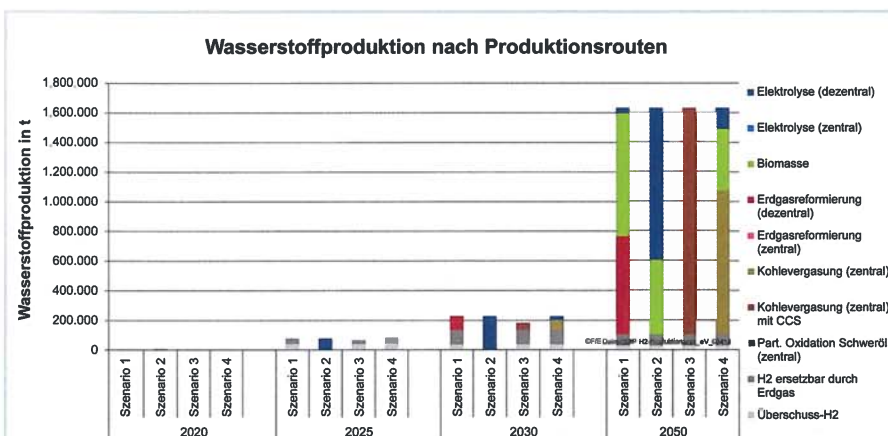


Abb. 2 Wasserstoffproduktionsmix für Deutschland



Brennstoffpreisentwicklungen die Erdgasreformierung die günstigste Technologie. Erneuerbare Technologien, wie Elektrolyse und Biomasse, sind erst im Jahr 2050 auch aus Kostensicht konkurrenzfähig. Das Elektrolysepotenzial ist jedoch aufgrund der Rückkopplung dieses zusätzlichen Verbrauchers mit dem Stromsystem begrenzt. In Szenario 3 spielt ab 2030 die CCS-Technologie eine Rolle, da die steigenden CO<sub>2</sub>-Preise die Kosten für eine CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung übersteigen. In den Ergebnissen des Szenarios 4 zeigt sich im Jahr 2050 die begrenzte Verfügbarkeit der Biomasse. Zudem steigt das Elektrolysepotenzial aufgrund höherer Kosten für konventionelle Rohstoffe. Relativ gesehen steigen die Erdgaspreise schneller als die Preise für Kohle, so dass sich die Kohlevergasung durchsetzt.

In allen Szenarien setzt sich die dezentrale gegenüber der zentralen Elektrolyse durch, da die höheren spezifischen Investitionen für kleine Anlagen durch die vermiedenen Kosten für die Wasserstoffverteilung ausgeglichen werden. Bei Berücksichtigung von Steuern und Abgaben für den Strombezug kann sich dieses Bild jedoch zugunsten zentraler Anlagen verschieben.

## Well-to-Wheels-Analyse

Basierend auf den Strom- und Wasserstoff-szenarien für die einzelnen Szenarien und Jahre wurden für jeden Antriebstyp WtW-Analysen durchgeführt. Die entwickelten Szenarien spannen dabei einen zukünftigen Rahmen für elektrische Fahrzeuge auf, in dem die tatsächliche Entwicklung stattfinden könnte. In Abb. 3 sind die möglichen Entwicklungen für die einzelnen Antriebstypen, Stützjahre und Szenarien dargestellt. Die Punkte für das Basisszenario sind durch eine leichte Verdunklung hervorgehoben.

Zu Beginn des Betrachtungszeitraums im Jahr 2020 liegen die spezifischen Treibhausgasemissionen von FCEV unterhalb derer von BEV. Im Verlauf der Jahre verschieben sich die Wertebereiche von BEV jedoch hin zu niedrigeren spezifischen Emissionen und einem niedrigeren spezifischen Primärenergieverbrauch, da der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien sich positiv auf die Bilanz des Strombezugs auswirkt.

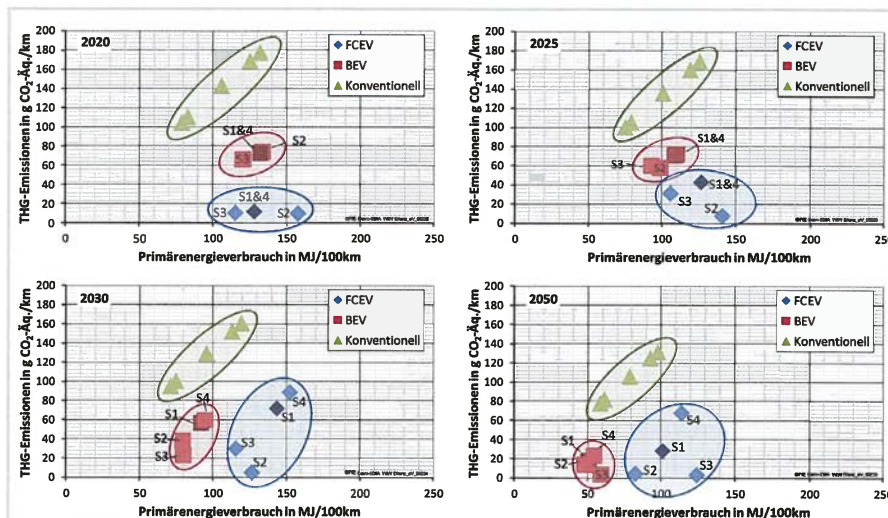


Abb. 3 Entwicklung der spezifischen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) und des spezifischen Primärenergiebedarfs einzelner Antriebstypen für Deutschland (S1, S2, S3 und S4 bezeichnen die vier entwickelten Szenarien)

Für FCEV dagegen ist die Entwicklung wesentlich komplexer, welches an dem Zusammenspiel einer Reihe von Faktoren, wie dem H<sub>2</sub>-Produktionsmix, dem Fahrzeugverbrauch und der Entwicklung des elektrischen Erzeugungssystems, liegt. Die anfänglich niedrigen Emissionswerte, welche vor allem durch die Nutzung von industriellem Überschusswasserstoff zustande kommen, verschlechtern sich zumeist, da die Deckung der steigenden Nachfrage durch H<sub>2</sub>-Herstellung aus fossilen Energiequellen am wirtschaftlichsten ist.

Erst bei einer weiteren Preissteigerung der fossilen Energieträger sowie einer Steigerung der CO<sub>2</sub>-Preise werden die betrachte-

ten erneuerbaren Technologien rentabel, wodurch sich die Emissionswerte im Jahr 2050 wieder verbessern. Dennoch bleibt ein Unterschied zu BEV-Fahrzeugen für den Primärenergiefaktor bestehen. Dieser ist durch den zusätzlichen Umwandschritt von Strom zu Wasserstoff und den damit einhergehenden Verlusten zu erklären.

## Die äußeren Rahmenbedingungen bestimmen die optimale Strategie

Bei einer produktionskostenoptimierten Verwendung von Wasserstoff für Brennstoffzellen-Fahrzeuge zeigt sich, dass vor allem

## EINBANDDECKEN-BESTELLUNG

Sicher wünschen Sie eine Original-Einbanddecke der Zeitschrift

**et** ENERGIEWIRTSCHAFTLICHE für den Jahrgang **2015**  
TAGESFRAGEN

Dafür einfach den Coupon ausfüllen, in einen frankierten Umschlag stecken und absenden oder faxen an:

**Buchbinderei Löber** • Sibyllastr. 12 • 45136 Essen • Fax 0201/26 03 97  
E-Mail: etv-einbanddecken@loeber-essen.de

Bitte liefern Sie \_\_\_ Ex. Einbanddecken für den Jahrgang **2015** zum Preis von 28,- € zzgl. Versandkosten.

Name (Firma) \_\_\_\_\_

Straße \_\_\_\_\_

Ort \_\_\_\_\_

Unterschrift \_\_\_\_\_

Nebenproduktwasserstoff aus der Industrie die Nachfrage bis ca. 2025 decken kann. Danach wird jedoch ein zunehmender Anstieg in der Nachfrage erwartet, sodass auf weitere Herstellungspfade zurückgegriffen werden muss. Die Szenarien zeigen, dass der kostenoptimale Einsatz der Wasserstoff-Produktionsverfahren stark von den äußeren Rahmenbedingungen, wie z. B. Brennstoffpreisen, CO<sub>2</sub>-Preisen oder technologischen Entwicklungen, beeinflusst wird. Je nach Szenario kann sich dabei die Elektrolyse, Erdgasreformierung, Biomasse- oder Kohlevergasung als Herstellungstechnologie durchsetzen.

Die Entwicklung der äußeren Rahmenbedingungen spielt auch auf die Entwicklung der Emissions- und Primärenergiefaktoren der Fahrzeuge eine wichtige Rolle, wenngleich einige allgemeingültige Tendenzen identifiziert werden konnten. Unter den hier betrachteten Gesichtspunkten pendeln sich die spezifischen Emissionen von FCEV und BEV in einer langfristigen Perspektive auf einem ähnlich niedrigen Niveau ein. Bezüglich des Primärenergieeinsatzes weist das BEV gegenüber dem FCEV einen Vorteil auf. Jedoch bietet Wasserstoff aufgrund der hohen

Flexibilität der Produktion und der Speichermöglichkeiten andere Vorteile, wie z. B. die Reichweite sowie Betankungszeit, welche bei der Bewertung unterschiedlicher Antriebstypen zudem Berücksichtigung finden sollten.

## Anmerkungen

- [1] Huss, A.; Maas, H.; Hass, H.: Jec Well-to-Wheels Analysis. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, Ispra/Petten 2013.
- [2] Schlesinger, M.; Lindenberger, D.; Lutz, C.: Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose – Projekt Nr. 57/12 – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Berlin 2014.
- [3] Nitsch, J. et al.: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Leitstudie 2011. Bonn 2012; Beer, M. et al.: Energiezukunft 2050, Teil II – Szenarien. München 2009; Joest, S. et al.: GermanHy – Woher kommt der Wasserstoff in Deutschland bis 2050? Berlin 2009; Europäische Kommission – Amt für amtliche Veröffentlichungen: HyWays – EUR 23123 – the European Hydrogen Roadmap. Brüssel 2008; Schindler, J. et al.: Where will the Energy for Hydrogen Production come from? – Status and Alternatives. Brüssel 2006; McKinsey & Company: A portfolio of power-trains for Europe: a fact-

based analysis – The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. New York City 2010; UK H<sub>2</sub> Mobility Project: UK H<sub>2</sub> Mobility – Phase 1 Results. London 2013.

[4] Maisonnier, G.; Perrin, J.; Steinberger-Wilckens, R.; Trümper, S. C. (Hrsg.): European Hydrogen Infrastructure Atlas – PART II: Industrial surplus hydrogen and markets and production. Brüssel: Roads2HyCom, 2007.

[5] Regett, A.; Heller, C.: Relevanz zeitlich aufgelöster Emissionsfaktoren für die Bewertung tages- und jahreszeitlich schwankender Verbraucher in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 65. Jg. (2015) Heft 70. Essen 2015.

[6] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V.: Zwischenbericht zum laufenden Projekt: Merit Order der funktionalen Energiespeicherung im Jahr 2030 – Teil 3: Ermittlung technoökonomischer Kennwerte funktionaler Energiespeicher. München 2014.

[7] Hinrich, H. et al.: Umweltbilanzen Elektromobilität. Heidelberg 2011; siehe auch: Swiss Centre for Life Cycle Inventories: The ecoinvent database, Version 3.0. Zürich 2014; abrufbar unter <http://www.ecoinvent.org/>

*A. Regett, M. Sc., und Dipl.-Phys. C. Heller, MBA, Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FfE) e.V., München; T. Mayer, M. Sc., und Dr. J. Wind, Daimler AG, Kirchheim/Teck-Nabern  
aregett@ffe.de*

## DVGW stellt Studie zur Wasserstoffeinspeisung ins Erdgasnetz vor

Neben dem Stromnetzausbau erfordert der Zuwachs erneuerbarer Energien neue Optionen zur Speicherung des schwankenden Stromaufkommens aus regenerativen Quellen. Hier kann Power-to-Gas, also die Umwandlung von regenerativ erzeugtem Strom in Wasserstoff und die direkte saisonale Speichermöglichkeit und Verteilung in der bestehenden Erdgas-Infrastruktur einen wichtigen Beitrag zur Umgestaltung des Energiesystems leisten. Aufgrund seiner Kapazität ist das 500 000 km lange Erdgasnetz in Deutschland sehr gut für die Aufnahme und Speicherung von Wasserstoff aus erneuerbarem Strom geeignet. Der Wasserstofftoleranz des deutschen Erdgasnetzes kommt damit eine entscheidende Bedeutung für die Einbindung von Ökostrom ins Gasnetz zu.

Vor diesem Hintergrund kommt eine am 28.10.2015 auf der gat 2015 in Essen vorgestellte Studie zu dem Ergebnis, dass die bestehende Erdgasinfrastruktur für Wasserstoffbeimischungen im einstelligen Prozentbereich von bis zu zehn Volumen-Prozent grundsätzlich geeignet ist. Bislang wurden direkte Netzeinspeisungen mit unveränderter Gerätetechnik nur bis zwei Volumen-Prozent Wasserstoff erforscht.

Das DVGW-Forschungsprojekt „Ermittlung der Wasserstofftoleranz der Erdgasinfrastruktur und assoziierten Anlagen“ überprüfte das Polyethylen-Netz vor und während der Einspeisung ohne feststellbare Auffälligkeiten. Die Einspeisung erfolgte bei deutlich fluktuierender Erdgasabnahme in mehreren Stufen von 4, 6,5 und 9 Volumen-Prozent Wasserstoffbeimischung. Durch begleitende Messungen an zahlreichen Kundenanlagen konnte die Wasserstoffkonzentration und Abgaszusammensetzung am jeweiligen Gasgerät erfasst werden.

Im Ergebnis brachten die umfassenden Feld- und Laboruntersuchungen keine Hinweise für Einschränkungen der zulässigen Grenzen für die Wasserstoffeinspeisung, die in den DVGW-Arbeitsblättern G 260 und G 262 geregelt sind. Vertiefte Untersuchungen und wissenschaftliche Begleitforschungen sind derzeit Gegenstand von Folgeprojekten im Rahmen der DVGW-Forschung, um die noch offenen Fragen zu klären.

Der Studienvorbericht ist unter:

[http://www.energie-wasser-praxis.de/fileadmin/Bilder/ewp/10\\_2015/Nitschke\\_Kowsky\\_ewp\\_1015.pdf](http://www.energie-wasser-praxis.de/fileadmin/Bilder/ewp/10_2015/Nitschke_Kowsky_ewp_1015.pdf) abrufbar.