

Wasserstoffmobilität im Kontext der Energiewende

Zum Stand der Technik und ihren Umweltauswirkungen

Jörg Burkhardt, Andreas Patyk, Philippe Tanguy und Carsten Retzke

Wasserstoff, Mobilität, Elektrolyse, Lebenszyklusanalyse, Energiewende, Windenergie

Zur Senkung von Klimagasemissionen und zur Ressourcenschonung wird der Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätssektor heute als eine der aussichtsreichsten Alternativen zu fossilen Kraftstoffen gesehen. Im Rahmen der Energiewende kommt der Produktion von Wasserstoff auf Basis erneuerbarer Energien eine Schlüsselrolle zu, da z. B. temporär überschüssiger Strom aus Windenergie- und Solaranlagen in Wasser-Elektrolyseuren genutzt werden kann um Wasserstoff zu produzieren.

In diesem Szenario richtet sich der Elektrolysebetrieb nach der Verfügbarkeit von Überschussstrom. Dies kann zu einer geringen Elektrolyseauslastung führen, in deren Folge neben der Wirtschaftlichkeit auch die Umweltauswirkungen beeinflusst werden können. Denn durch geringe Auslastungen schlagen sich die aus dem Bau der Anlagen resultierenden Energie- und Materialaufwendungen stärker in z. B. spezifischen Treibhausgasemissionen nieder.

Die techno-ökonomische und ökologische Untersuchung einer auf regenerativen Energien basierenden Wasserstoffmobilität war Gegenstand eines zweijährigen Begleitforschungsprojektes zu den Wasserstoffaktivitäten der Total Deutschland GmbH. Anhand des Beispiels einer in Berlin errichteten und betriebenen Wasserstofftankstelle mit integriertem Elektrolyseur beleuchtet der Artikel wesentliche Ergebnisse dieses Projektes.

Hydrogen Mobility in the context of Germany's Energiewende

The use of hydrogen is seen as a promising option as a substitute to fossil fuels in the mobility sector. In the context of Germany energy transition with an objective of more than 80% renewable electricity generation in 2050, hydrogen is foreseen to be produced from water electrolysis powered by excess-electricity; e.g. in times when the actual electricity production exceeds the demand.

In this scenario, the electrolyser operation depends therefore on the availability of excess electricity. This may lead to a limited load factor that can influence the economic performance as well as the environmental impact. Indeed, with a low load factor, the energy and material expenses for the plants construction have a stronger impact on e.g. the specific greenhouse gas emissions.

The techno economic and ecologic assessment of a hydrogen mobility based on renewable energies was subject of a research project related to the hydrogen activities of Total Deutschland GmbH. This article highlights the main results of the study.

1. Einleitung

Da Wasserstoff durch Wasser-Elektrolyse mit regenerativem Strom erzeugt werden kann, birgt er – verglichen mit konventionellen Kraftstoffen – die Möglichkeit zur starken Treibhausgas(THG)-Emissionsminderung im Mobilitätssektor. Im Kontext der Energiewende wird dabei vornehmlich die Wasserstoffherzeugung zu Zeiten eines

Überangebots an Strom aus erneuerbaren Energien diskutiert. Bereits heute werden vornehmlich Windenergieanlagen abgeregelt um die Kapazität des elektrischen Netzes nicht zu überschreiten. Die dadurch nicht genutzte Strommenge belief sich im Jahr 2014 auf 1581 GWh_{el} [1], was in etwa der Jahresstromproduktion von 320 modernen Windenergieanlagen (WEA) entspricht. Durch

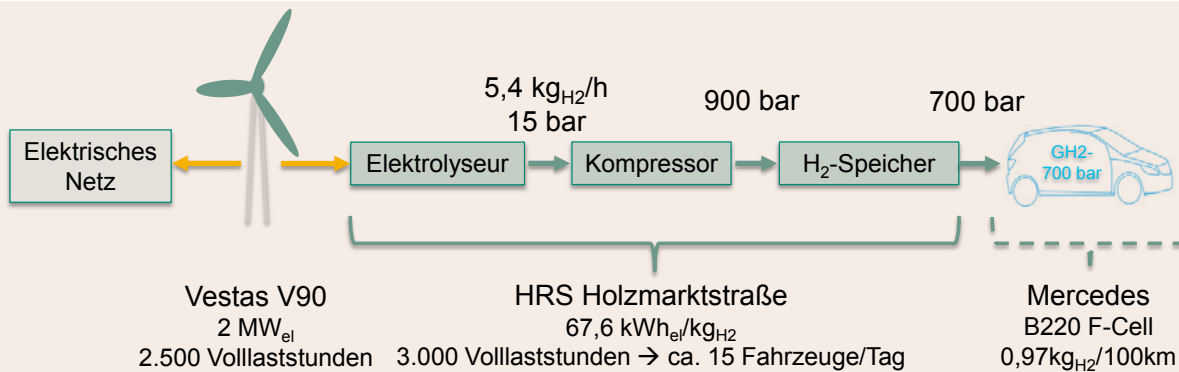


Bild 1: Analysiertes System

den weiteren Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in Deutschland (angestrebter Anteil an der gesamten Stromerzeugung bis 2050: >80%) wird allgemein davon ausgegangen, dass die – den Betreibern trotzdem vergütete – Ausfallarbeit weiter zunehmen wird.

Mehrere Studien prognostizieren die zeitliche Häufung dieses Strom-Überangebots, wobei die Ergebnisse stark vom betrachteten Zeitraum und den postulierten Randbedingungen abhängen. Für den Zeitraum zwischen 2030 und 2050 wird von überschüssigen Strommengen an 2000 h – 4000 h im Jahr ausgegangen [2], [3], [4]. Die zu diesen Zeiten anfallenden Strommengen könnten für die Wasserstoffherzeugung in der Wasser-Elektrolyse genutzt werden.

Der so erzeugte Wasserstoff wiederum kann für die Mobilität genutzt werden und fossile Kraftstoffe substituieren. Als Energieträger kann Wasserstoff an dafür vorgesehenen Tankstellen abgefüllt werden und ermöglicht daher ein vergleichbares Mobilitätsverhalten wie es von konventionellen Kraftstoffen bekannt ist: Kurze Betankungsdauern (ca. drei Minuten) bei hoher Fahrzeug-Reichweite (ca. 300–500 km). Dafür muss der gasförmige Wasserstoff bis auf ca. 850 bar verdichtet werden um in den Tanks der bereits heute in Kleinserie gefertigten Brennstoffzellenfahrzeugen (Toyota und Hyundai) einen Zieldruck von 700 bar zu erreichen. Da sich der Wasserstoff während des Betankungsvorgangs erhitzt, muss er vor Eintritt in den Tank auf bis zu -40°C gekühlt werden.

Die Untersuchung und Erprobung auf regenerativen Energien beruhender Wasserstoffmobilität ist Gegenstand mehrerer Pilot- und Demonstrationsprojekte in ganz Deutschland. Mit dem Hybridkraftwerk in Prenzlau wird beispielsweise Wasserstoff auf Basis von Windenergie produziert, ein Teil des Wasserstoffs wurde zu Berliner Total-Tankstellen transportiert und dort an Fahrzeuge getankt. Ein ähnliches Projekt wurde an der Berliner Flughafenbaustelle BER realisiert und läuft derzeit im Probetrieb. Die Alltagstauglichkeit von Wasserstoff-

tankstellen (HRS) wird von der Clean Energy Partnership (CEP) – einer Initiative aus 20 Industriepartnern unter Schirmherrschaft des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) – demonstriert. Im Rahmen dieser Initiative soll bis Sommer 2016 ein Netz aus 50 Wasserstofftankstellen in Deutschland errichtet werden. Dieses Netz soll im Rahmen der Industrieinitiative H₂-Mobility bis 2023 auf 400 Wasserstofftankstellen ausgebaut werden.

2. Untersuchtetes System und Zielsetzung

Um den Stand der Technik der Wasserstoffmobilität zu beleuchten, die Wirtschaftlichkeit und die Umweltauswirkungen zu untersuchen, wurden die Wasserstoffaktivitäten der Total Deutschland GmbH in einem zweijährigen Forschungsprojekt wissenschaftlich vom KIT begleitet. Neben den erwähnten Anlagen in Prenzlau und am BER wurde auch die Wasserstofftankstelle an der Holzmarktstraße in Berlin untersucht, die von 2010 bis 2012 betrieben wurde. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen beziehen sich auf diese Tankstelle und befassen sich mit deren Umweltauswirkungen.

Ein vereinfachtes Schema der Tankstelle und ihrer wichtigsten Komponenten ist in **Bild 1** dargestellt. Mit einer Produktionskapazität von 5,4 kg_{H2}/h und einem Ausgangsdruck von 15 bar wurde Wasserstoff in einem alkalischen on-site Elektrolyseur direkt vor Ort produziert. Simultan zur Erzeugung wurde der produzierte Wasserstoff in einem zweistufigen Kolbenkompressor auf 450 bar komprimiert und in Carbon-Verbundflaschen unterirdisch gelagert. Für 700 bar Betankungen erfolgte eine weitere Verdichtung auf 900 bar in einer dritten Kompressionsstufe sowie eine anschließende unterirdische Speicherung. Beim Betankungsvorgang strömte der gespeicherte Wasserstoff über die Druckdifferenz in den Fahrzeugtank, bis er dort einen Zieldruck von 700 bar erreichte. Um die Fahrzeugtanks nicht übermäßig zu er-



Bild 2: Rückbau von Elektrolyseur, Kompressor und H₂-Speicher

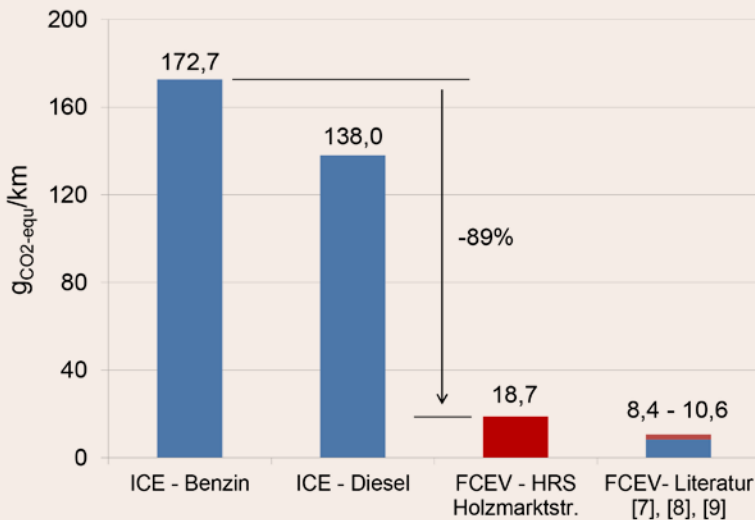


Bild 3: Spezifische Treibhausgasemissionen, Vergleich

hitzen und deren Beschädigung zu vermeiden, wurde er zuvor gekühlt.

Im Rahmen des genannten Begleitforschungsprojekts wurde auch der Rückbau der Tankstelle im Jahr 2013 begleitet (siehe Bild 2). Dabei wurde eine Materialbilanz erstellt, die die Basis einer nachfolgend durchgeführten ökologischen Lebenszyklusanalyse darstellt. Das Gesamtgewicht von Elektrolyseur und Tankstelle wurde zu 163 t bestimmt, wobei der verbaute Beton für die Fundamente (64%) und die eisenhaltigen Werkstoffe (27%) die größten Massenanteile darstellen.

In der Lebenszyklusanalyse wurden alle Material- und Energieaufwendungen, die während der Herstellung von Tankstelle und Elektrolyseur, einer postulierten 20-jährigen

Nutzung und der Entsorgung der Anlage anfallen, mit den Aufwendungen ihrer Bereitstellung verknüpft. Mit der Datenbank ecoinvent, in der Aufwendungen für z. B. die Bereitstellung von Materialien und Energieträgern zur Herstellung von Komponenten, Betriebsstoffen usw. definiert sind, können unter anderem die Primärenergieaufwendungen und Treibhausgasemissionen des Systems über die gesamte Lebensdauer bestimmt werden.

Für die Untersuchungen wurde angenommen, dass der Elektrolyseur und die Tankstelle ausschließlich mit Strom aus Windenergie versorgt werden. Dafür ist auch eine Lebenszyklusanalyse einer modernen 2 MW_{el} Windenergieanlage erstellt worden, die Materialbilanz hierfür stammt vom Hersteller Vestas [5], die Auslastung wurde mit 2500 Volllaststunden pro Jahr angenommen. Da die elektrische Nennleistung der WEA mehr als fünfmal höher ist als die von Elektrolyseur und Tankstelle (zusammen 365 kW_{el}), wird die nicht benötigte Strommenge in das elektrische Netz geleitet, welches in den Untersuchungen nicht weiter betrachtet wird.

Der spezifische Energieverbrauch von Elektrolyseur und Tankstelle wurde zu 67,6 kWh_{el}/kg_{H₂} bestimmt, was – gemessen am oberen Heizwert von Wasserstoff – einem Gesamtwirkungsgrad von 58,2% entspricht. Mit einem Wirkungsgrad von knapp 74% hat die Wasserstoffherzeugung bzw. der Elektrolyseur den größten Energiebedarf entlang der Bereitstellungskette. Entsprechend den Ausführungen in der Einleitung wird der Elektrolyseur mit 3000 Volllaststunden/Jahr betrieben, wodurch pro Tag 44 kg_{H₂} erzeugt werden; dies entspricht knapp 15 Betankungen à 3 kg_{H₂}/Fahrzeug.

3. Ergebnisse und Ergebnisvergleich

Nachfolgend werden Ergebnisse des postulierten Szenarios als spezifische Treibhausgasemissionen dargestellt, das Treibhausgaspotential von Klimagasen wie CH₄ und N₂O ist in CO₂-Äquivalente umgerechnet worden und somit ebenfalls erfasst.

In Bild 3 werden die spezifischen Klimagasemissionen eines, aus beschriebenen System mit Wasserstoff betankten, Brennstoffzellenfahrzeugs (FCEV) mit denen von Benzin- und Dieselmotoren (ICE) verglichen. Für alle Antriebsstränge wurden die Verbräuche des gleichen Fahrzeugtyps, einer aktuellen Mercedes B-Klasse, angenommen. Emissionen die aus der Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge entstehen wurden nicht berücksichtigt. Für die Emissionen der Bereitstellung und Verbrennung der fossilen Kraftstoffe sind Daten aus [6] übernommen worden.

Gegenüber der mit fossilen Kraftstoffen betriebenen B-Klasse reduziert die Brennstoffzellenversion die Klimagas-Emissionen um 89% (Benzin) bzw. 86% (Diesel). Die

Spezifische Treibhausgasemissionen: 18,7 g_{CO₂-equ}/km

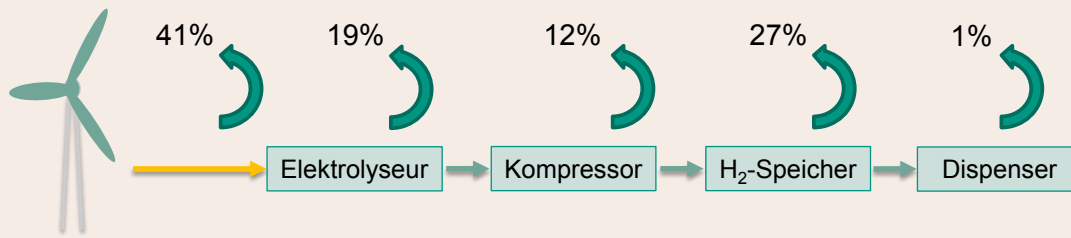


Bild 4: Spezifische Treibhausgasemissionen, Beitrag der Systemkomponenten

spezifischen Emissionen von 18,7 g_{CO₂-equ}/km resultieren dabei aus dem Verbrauch fossiler Energie des Systems. Bezogen auf die produzierte Wasserstoffmenge beträgt dieser fossile Energiegehalt 28,2 MJ/kg_{H₂}, was in etwa dem Energieinhalt von 0,6 kg Erdgas entspricht. Insgesamt sind 74 % des Primärenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen des Systems auf dessen Herstellung zurück zu führen. Die Entsorgung ist mit einem Beitrag von 2 % praktisch vernachlässigbar.

In **Bild 4** sind die prozentualen Anteile der einzelnen Systemkomponenten an den THG-Emissionen dargestellt. Die Strombereitstellung durch die WEA hat den größten Anteil, auf sie entfallen 41 % der Emissionen. Die in Summe verbleibenden 59 % entstehen durch Herstellung, Nutzung und Entsorgung von Elektrolyseur und Tankstelle. Aufgrund der großen Kapazität des Wasserstoffspeichers (ca. 360 kg_{H₂}) und dem damit verbundenen Materialaufwand trägt alleine der Speicher zu 27 % bei.

Im Vergleich zu veröffentlichten Studien ähnlicher Systeme zeigt sich, dass die bestimmten Klimagasemissionen um ca. den Faktor zwei höher liegen (siehe **Bild 3**). Gegenüber Untersuchungen in [7], in denen ein älteres System mit 200 bar Zieldruck betrachtet wird, ist dies vermutlich auf höhere Aufwendungen für die Herstellung von Elektrolyseur und Tankstelle zurückzuführen. In [7] tragen Elektrolyseur und Tankstelle zu nur 22 % der THG-Emissionen bei, in den vorliegenden Untersuchungen sind es 59 %, siehe **Bild 4**. In den Mobilitätsstudien [8] und [9] hingegen werden die aus der Anlagenherstellung resultierenden THG-Emissionen vernachlässigt, die in den vorliegenden Untersuchungen 74 % der Gesamtemissionen verursachen.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Die hier dargestellten Untersuchungen zeigen, dass die Wasserstoffmobilität einen starken Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemission leisten kann; in hier betrachtetem Szenario um 86 - 89 % gegenüber den fossilen Kraftstoff-

fen Diesel und Benzin. Es zeigt sich jedoch auch, dass die berechneten Emissionen um ca. den Faktor zwei höher liegen als in anderen Studien vergleichbarer Systeme. Dies wird auf höhere Aufwendungen bzw. einen höheren Einfluss der Anlagenherstellung zurückgeführt. Verstärkt wird dies hier durch die – verglichen mit konventionellen Anlagen – geringe Auslastung des Elektrolyseurs und der Tankstelle.

Bei der hier untersuchten Tankstelle mit on-site Elektrolyseur handelt es sich um ein technisch aufwendiges System, das nach Maßgabe heute angedachter Elektrolyseur-Betriebsweisen gering ausgelastet ist. Dadurch schlagen sich die Aufwendungen zur Herstellung der Systemkomponenten deutlich in den spezifischen Treibhausgasemissionen nieder. Um die Umweltauswirkungen der Wasserstoffmobilität (bzw. auf regenerativen Energiesystemen) sicher bestimmen zu können, sollten umweltbezogene Systemuntersuchungen daher alle Lebensphasen berücksichtigen.

Wird die Auslastung des Elektrolyseurs von 3 000 auf 6 000 Volllaststunden pro Jahr angehoben, so reduzieren sich die spezifischen THG-Emissionen um 30 %. D.h. bei betrachtetem System würden sich mit einer höheren Auslastung nicht nur die Investitionskosten schneller amortisieren, auch die Treibhausgasemissionen würden verringert. Nach heutigem Kenntnisstand könnte dies jedoch in Konflikt mit dem oft angedachten Einsatz von Elektrolyseuren im Kontext der Energiewende stehen.

Literatur

- [1] Bundesnetzagentur (Herausg.): "Monitoringbericht 2015". Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Bundeskartellamt, November 2015.
- [2] Stolzenburg, K. et al.: "Integration von Wind-Wasserstoff-Systemen in das Energiesystem". Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen-technologie (NOW GmbH), März 2014.
- [3] Henning, H.-M. und Palzer, A.: "Energiesystem Deutschland 2050". Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, November 2013.

- [4] *Höflich, B.* et al.: „Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt“. Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Endbericht, August 2012.
- [5] *Garret, P. und Ronde, K.*: „Life Cycle Assessment of Electricity Production from a V90-2.0MW Gridstreamer Wind Plant“. Vestas, Version 1.0, Dezember 2011. Download von www.vestas.com
- [6] *Knörr, W.; Kutzner, F.; Lambrecht, U. und Schacht, A.*: „Fortschreibung und Erweiterung Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030 (TREMODO, Version 5)“. IFEU Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, FKZ 3707 45101, März 2010.
- [7] *Spath, P. und Mann, M.*: „Life Cycle Assessment of renewable Hydrogen Production via Wind/Electrolysis“. National Renewable Energy Laboratory (NREL), NREL/MP-560-35404, Februar 2004.
- [8] *Edwards, R.; Larivé, J.F. und Beziat, J.-C.* et al.: „Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context“. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Energy and Transport, ISSN 1831-9424, Juli 2011.
- [9] *Wietschel, M.; Bünger, U. und Weindorf, W.*: „Vergleich von Strom und Wasserstoff als CO₂-freie Endenergieträger“. Ludwig Bölkow-Systemtechnik GmbH, Final Report, May 2010.

Autoren



Dr.-Ing. Jörg Burkhardt
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
 Institut für Technikfolgenabschätzung und
 Systemanalyse (ITAS) |
 Berlin |
 Tel. +49 30 23459931 |
 E-Mail: joerg.burkhardt@kit.edu



Prof.-Dr. Philippe Tanguy
 Total S.A. |
 Berlin; Paris |



Dr. rer. nat. Andreas Patyk
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
 Institut für Technikfolgenabschätzung und
 Systemanalyse (ITAS) |
 Karlsruhe |
 Tel. +49 721 60824606 |
 E-Mail: Andreas.patyk@kit.edu



Dipl.-Ing. Carsten Retzke
 Total Deutschland GmbH |
 Berlin |

Parallelheft gwf-Wasser | Abwasser

In der Ausgabe 02/2016 lesen Sie u. a. folgende Beiträge:

Schramm u. a.: Verändertes Kooperationsmanagement für neuartige Sanitärsysteme in Umsetzung und Betrieb. Folgerungen aus dem Beispiel Jenfelder Au in Hamburg

Grossmann/Meininger: Aktualisierung der integrierten Wasserbedarfsprognose für Hamburg bis zum Jahr 2045 – Teil 1: Ergebnisse

Liehr u. a.: Aktualisierung der integrierten Wasserbedarfsprognose für Hamburg bis zum Jahr 2045 – Teil 2: Grundlagen und Methodik

Arndt: 11. Münchener Abwassertag – Symposium zur Laboranalytik und Prozessmesstechnik