

F&E-Perspektiven der Wasserstoff-Technologien

Wasserstoff-Technologien

Die Erzeugung elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen gewinnt zunehmend an Bedeutung und ihr Anteil an der Stromerzeugung liegt mittlerweile bei mehr als 30% [1]. Um die gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen, muss der Ausbau der erneuerbaren Energien weiter fortschreiten, was zur Folge hat, dass große Energiemengen auch dann zur Verfügung stehen, wenn dem kein unmittelbarer Verbrauch gegenüber steht.

Wasserstoff als gut handhabbarer, gasförmiger Energieträger bzw. Rohstoff kann im zukünftigen Energiesystem eine vielversprechende Möglichkeit bieten, erneuerbare Energie zeitlich unabhängig von ihrer Erzeugung unterschiedlichen Verbrauchern zugänglich zu machen. Dabei eignet sich Wasserstoff sowohl als Energieträger im Verkehrssektor, in der Industrie und in Haushalten. Aber auch die stoffliche Nutzung in der chemischen Industrie ist denkbar.

Im Verkehrssektor ist der Anteil erneuerbarer Energien mit rund 5% noch niedrig. Mit Zunahme der batterieelektrischen Mobilität wird dieser Anteil weiter steigen. Neben der Batterietechnologie, die in der ersten Aufbauphase auf die bereits existierende elektrische Infrastruktur zurückgreifen kann, wird Wasserstoff zukünftig in Brennstoffzellfahrzeugen genutzt werden können und damit eine Schlüsselrolle bei der klimagasneutralen Mobilität spielen. Dazu ist die Entwicklung einer entsprechenden Infrastruktur notwendig [2], deren Aufbau gegenüber dem Ausbau der elektrischen Infrastruktur günstiger sein kann [3].

In diesem Artikel werden unterschiedliche Erzeugungsmöglichkeiten für regenerativen Wasserstoff vorgestellt und ihre Potenziale diskutiert. Unterschieden wird zwischen der direkten Wasserstoffherzeugung aus Sonnenenergie und der Erzeugung mit elektrischer Energie in einem Elektrolyseur. Außerdem wird ebenfalls auf die Entwicklung von Nutzungs- bzw. Betankungstechnologien eingegangen.

Solare Wasserstoffproduktion

Die solare Wasserstoffproduktion lässt sich in die bioartifizielle Photosynthese und die photoelektrische Erzeugung unterteilen:

Beim UFZ wird die bioartifizielle Photosynthese entwickelt, der Entwicklungsfokus liegt auf der Untersuchung des Wasserstoff produzierenden Enzyms, der Hydrogenase. Es handelt sich um grundlegende Untersuchungen und die praktischen Einsatzmöglichkeiten, die Effizienz und die Lebensdauer solcher Systeme sind derzeit noch nicht geklärt. Die zu überwindenden Schwierigkeiten liegen insbesondere in der Kopplung der Hydrogenase an den aus der Photosynthese hervorgerufenen Elektronentransport, der O₂-Sensitivität der Hydrogenase und der Entkopplung von Photosynthese und Kohlenstoffstoffwechsel [4]. Ein großes Potenzial dieses biologischen Ansatzes liegt in der Fähigkeit der biologischen Systeme zur Selbstassemblierung und zur Reparatur; möglicherweise lässt sich diese Fähigkeit auch bei anderen elektrochemischen Systemen zur Steigerung der Haltbarkeit nutzen.

Eine weitere Möglichkeit der direkten Erzeugung aus Sonnenlicht liegt in der photoelektrischen Wasserstoffherzeugung, bei der die in einer Photovoltaik-Zelle erzeugte elektrische Energie für die elektrochemische Wasserspaltung in einer angebauten Elektrolyse-Zelle genutzt wird. Solche Zellen werden mit Wasser gespeist und bei Sonneneinstrahlung werden Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt. Das Forschungszentrum Jülich und das Helmholtz Zentrum Berlin arbeiten an diesem Thema und es wurden erste Module für Testzwecke aufgebaut. Diese Systeme bestehen aus einer Dünnschicht Photovoltaik und einem alkalischen Elektrolysesystem. Die Effizienz erster modularer Demonstratoren liegt derzeit bei knapp 4%, für kleinere Zellen sind Wirkungsgrade von 7–9% erreicht worden. Es sind aber höhere Wirkungsgrade bei Anpassung des Elektrolysesystems und der Photovoltaik möglich.

Einen großen Einfluss auf die Effizienz hat die eingesetzte Photovoltaiktechnologie: Bei Verwendung von Perovskit-basierten Zellen oder Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) sind Effizienzen von rund 15% möglich [5]. Die Herausforderung besteht nun darin, die Demonstratoren weiter zu skalieren und für den technischen Maßstab relevante Flächen zu erreichen, außerdem muss noch der Nachweis des langzeitstabilen



Jülich

Dr. Martin Müller
mar.mueller@fz-juelich.de

DLR

Prof. Dr. K. Andreas Friedrich
andreas.friedrich@dlr.de

HZB

Prof. Dr. Roel van de Krol
roel.vandekrol@
helmholtz-berlin.de

Fraunhofer ISE

Dr. Christopher Hebling
christopher.hebling@
ise.fraunhofer.de

IZES

Dr. Bodo Groß
gross@izes.de

UFZ

Prof. Dr. Andreas Schmid
andreas.schmid@ufz.de

ZSW

Andreas Brinner
andreas.brinner@zsw-bw.de

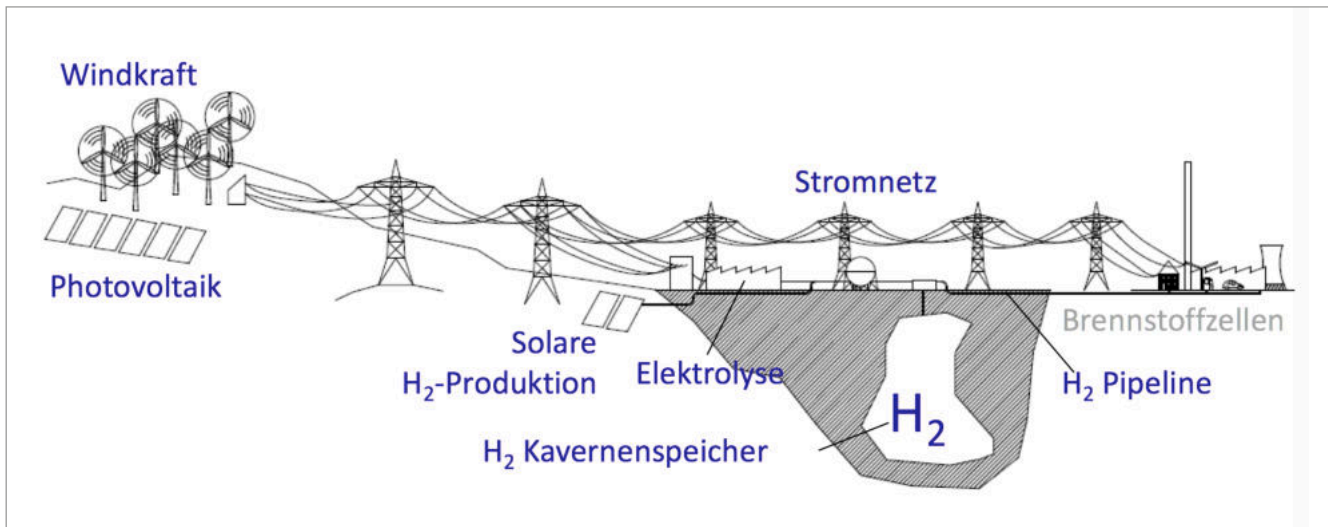


Abbildung 1

Wasserstoff-technologien

und ihre Einbettung in ein von erneuerbaren Energien dominiertes System

(Quelle: FZ Jülich)

Betriebes erbracht werden. Unter betriebswirtschaftlicher Betrachtung können integrierte photovoltaisch getriebene katalytische Bauelemente in sonnenreichen Regionen wettbewerbsfähig sein, bei entsprechender Haltbarkeit der Zellen lassen sich Wasserstoffkosten von 2–3 €/kg erreichen [6].

Am Fraunhofer ISE wurde gerade ein erster „Hydrogen Concentrator“ [7] Demonstrator zur solaren Wasserstofferzeugung hergestellt und auf dem Dach unter realen Bedingungen vermessen. Dieser verwendet acht III-V Zweifachsolarzellen die mit acht PEM-Elektrolyse-Zellen gekoppelt sind. Hier wurden Modulwirkungsgrade von über 19% erreicht [8].

Elektrochemisch Wasserspaltung – Elektrolyse

Die klassischen Elektrolysetechnologien sind:

- SOE (oxidkeramische Hochtemperatur Elektrolyse)
- PEM (saure Polymer Membran Elektrolyse)
- AE (alkalische Elektrolyse)

Ihre Entwicklung steht unter dem Fokus der Senkung der Investitions- und Betriebskosten. Derzeit liegen die Kosten für ein installiertes Kilowatt Elektrolyseur bei der SOE bei rund 2500 €, für die PEM Elektrolyse bei rund 1500 € und für die alkalischen Elektrolyse bei ca. 1000 €. Aus dem Kostensenkungsziel lassen sich technische Anforderungen ableiten, die eine weiterentwickelte Elektrolyse erbringen muss. Diese sind:

- Steigerung der Effizienz
- Skalierung der Leistung
- Reduzierung des Einsatzes von hochpreisigen Materialien
- Verbesserung der Haltbarkeit

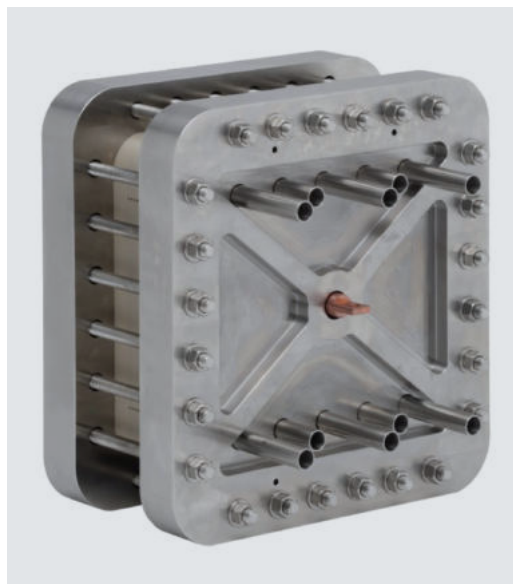
Alkalische Elektrolyse

Am ZSW werden fortschrittliche alkalische Druckelektrolyseure entwickelt. Hier wird ein Aufbau mit einer aktiven Fläche von 2750 cm² als Entwicklungsplattform genutzt, der dank optimierter federnder Stromübertrager Nennstromdichten bis 1 A/cm² erlaubt. Der Elektrolyseur kann bei einem Druck von 16 bar betrieben werden, was gegenüber dem drucklosen Betrieb zu einer effizienteren Wasserstoffverdichtung führt. Derzeit erfolgt die Inbetriebnahme einer solchen Anlage im Maßstab von rund 300 kW und eine weitere Skalierung in den MW-Maßstab ist aus technischer Sicht möglich. Das ZSW verfügt über fundierte Erfahrungen im Bereich der Stack- und Systementwicklung, der praktischen Umsetzung solcher Konzepte, in Zulassungsfragen und beim Betrieb.

Abbildung 2

PEM-Elektrolyse-Stack

(Quelle: FZ Jülich)



PEM Elektrolyse

Die PEM Elektrolyse stellt einen weiteren Entwicklungsschwerpunkt dar. An diesem Thema arbeiten das DLR, das Forschungszentrum Jülich, das Fraunhofer ISE und das IZES. Dabei werden unterschiedliche Entwicklungsthemen adressiert. Am DLR und Fraunhofer ISE werden zum Beispiel neue Korrosionsschutz-Beschichtungen entwickelt, die es ermöglichen, den Einsatz teurer Bleche aus Titan zu reduzieren und damit die Investitionskosten zu senken. Am DLR können mit Hilfe des thermischen Spritzens Flächen bis zu 2 m² beschichtet werden und dadurch ist es möglich, den gegenüber Titan kostengünstigeren Edelstahl als Basismaterial für Bipolar-Platten zu nutzen. Darüber hinaus ist es möglich, kostengünstige Kontaktierungselemente mit variierender Porosität zu erzeugen [9, 10, 11]. Beide Institute untersuchen außerdem die Degradationsmechanismen von Polymer Membran Elektrolyseuren im Langzeitbetrieb als Funktion der Stromdichte und anderer Betriebsparameter [12].

Am Forschungszentrum Jülich werden die elektrochemisch aktiven Elemente hinsichtlich ihrer Funktion verbessert. So konnte trotz einer deutlichen Reduzierung des Edelmetallanteils auf rund 0,5 mg/cm² die Leistungsfähigkeit der Elektroden deutlich gesteigert werden. Mit solchen MEAs sind Stromdichten von 4 A/cm² bei Spannungen von rund 1,8 V möglich. Außerdem liegt ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt auf der kontinuierlichen und reproduzierbaren maschinellen Herstellung dieser Elektroden. Neben der Entwicklung leistungsstarker Zellstapel gilt ein besonderes Augenmerk den Vorgängen in den Zellen und Stacks. Hier stehen die porösen Stromkollektoren im Fokus und von wissenschaftlicher Seite wird der mehrphasige Stofftransport in diesen porösen Materialien und den Kanälen der Zellen im Betrieb untersucht [13, 14].

Am Fraunhofer ISE fokussieren sich die Arbeiten auf die porösen Transportschichten und Beschichtungsstrategien für Bipolarplatten. Durch Kombination diverser in- und ex-situ Messmethoden werden Effekte wie die Massentransportlimitierung untersucht und Designvorgaben abgeleitet. Ferner werden Schnellalterungstests für MEAs und Bipolarplatten entwickelt. Die Ergebnisse fließen direkt in die Komponentenoptimierung bei den Herstellern ein. Das Fraunhofer ISE verfügt zudem über eine großskalige Testeinrichtung auf der Elektrolyseure mit Leistungen im Megawattbereich untersucht werden können. Diese Testplattform kann von Herstellern von Elektrolyseuren für Testzwecke genutzt werden und liefert wichtige Informationen über die Auswirkung der Skalierung der Leistung auf die einzuhaltenden Betriebsfenster.



Abbildung 3
**24-zelliger
Elektrolyseblock**
(Quelle: ZSW)

Hochtemperatur Elektrolyse

Die genutzten Systeme der Hochtemperatur-Elektrolyse liegen in einem Leistungsbereich von einigen kW und im nächsten Schritt soll diese Leistung weiter in den 100 kW Maßstab skaliert werden. Die SOE bietet die Möglichkeit einer sehr effizienten Wasserstoffherzeugung, die erreichbaren Wirkungsgrade liegen sehr hoch und es ist möglich diese noch weiter durch die Integration von Abwärme zu steigern. Eine besondere Eigenschaft der SOE liegt in der Möglichkeit des reversiblen Betriebes, das heißt, dass sie auch als Brennstoffzelle genutzt werden kann. Damit ist es möglich ein und dasselbe Gerät zur Erzeugung von Wasserstoff und zur Erzeugung elektrischer Energie aus Wasserstoff zu nutzen, also ideal als Energiespeicher.

SOEs werden bei Temperaturen zwischen 700 und 800 °C betrieben. Es werden keramische Werkstoffe für den Aufbau eingesetzt. Diese Materialien sind spröde und ein Entwicklungsschwerpunkt richtet sich auf die Verbesserung der Zellmechanik durch Anpassung der Konstruktion und der Werkstoffe. Bereits jetzt werden umfangreiche Untersuchungen zur Langzeitstabilität der Zellen durchgeführt [15]. Am Forschungszentrum Jülich befindet sich eine Zelle im reversiblen Betrieb seit mehr als 15.000 Stunden im Einsatz. In diesem Test liegt die Alterungsrate aktuell bei ~0.65%/1000 h und die Degradation lässt sich in erster Linie auf eine Erhöhung der ohmschen Verluste zurückführen.

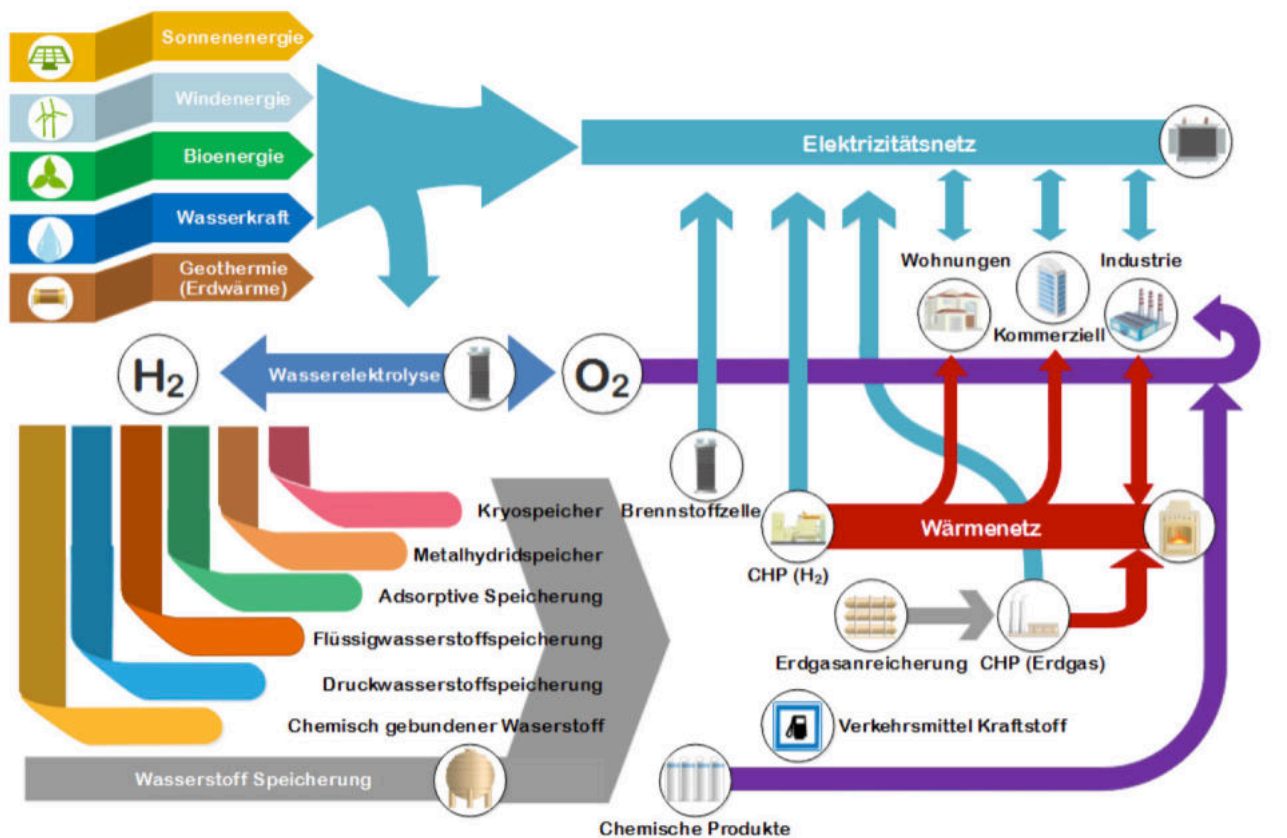


Abbildung 4
Wertschöpfungskette für erneuerbaren Wasserstoff
 (Quelle: IZES)

H2 Wertschöpfung/Nutzung

Eine Analyse von Wertschöpfungsketten für erneuerbaren Wasserstoff wurde unter anderem vom IZES durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Speichertechnologien und auch Nutzungspfade betrachtet und mögliche Potenziale aufgezeigt.

Eine praktische Untersuchung der Wasserstoffnutzung erfolgt am Fraunhofer ISE in Freiburg. Hier liegt der Fokus auf der Bereitstellung von erneuerbar erzeugtem Wasserstoff als Kraftstoff. Dazu verfügt das ISE über eine Wasserstofftankstelle, die von einer Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 16 kW gespeist wird. Daran angeschlossen ist ein Membran-Elektrolyseur (PEM-Elektrolyse) mit einer Leistungsfähigkeit von 0,5 kg Wasserstoff pro Stunde. Der so erzeugte Wasserstoff wird verdichtet und kann dann in einem Mitteldruckspeicher mit einem maximalen Speicherinhalt von 60 kg Wasserstoff bei ca. 450 bar gespeichert werden. Ein so genannter Hochdruckspeicher verfügt über einen Inhalt von 17 kg bei ca. 950 bar. Mit dieser Konfiguration ist es möglich eine 700 bar Schnellbetankung nach SAE J2601 sowie 350 bar Slow Fill durchzuführen. Eine B-Klasse lässt sich damit innerhalb von fünf Minuten voll betanken. Die aufgebaute Tankstelle ist öffentlich zugänglich und kann nach einer Einweisung und Ausgabe einer Tankkarte genutzt werden.

Perspektiven

Die ambitionierten Klimaschutzziele können nur durch eine weitreichende Nutzung erneuerbarer Energien erreicht werden. Die hier vorgestellten Wasserstofftechnologien ermöglichen es, neben der erneuerbar erzeugten elektrischen Energie in Zukunft mit Wasserstoff einen Rohstoff bzw. Energieträger mit vielfältigen Möglichkeiten zur Verfügung zu haben. Zum jetzigen Zeitpunkt lässt sich nicht festlegen, welche der vorgestellten Technologien das größte technische Potenzial hat.

Insbesondere im Bereich des Transportes und der Mobilität kann mit der Wasserstofftechnologie ein wichtiger Beitrag zu emissionsfreien Fahrzeugen mit großen Reichweiten geleistet werden. Hier wird die breite Markteinführung über Nischenmärkte erfolgen und Brennstoffzellen werden sich wahrscheinlich über Flurförderfahrzeuge, die Versorgung netzferner Standorte und durch Einbindung in das öffentliche Transportsysteme verbreiten.

Der wirtschaftliche Erfolg der Wasserstofftechnologien wird entscheidend von den erreichbaren Kosten abhängen. Eine Kostendegression wird durch die weitere Skalierung der Anlagengröße und den Einsatz kostengünstiger Materialien erreicht. Auch

die Steigerung der Haltbarkeit, die sich durch eine Anpassung der Betriebsstrategien und der in den Komponenten eingesetzten Materialien ergibt, wird langfristig zu einer Kostensenkung führen.

Wichtig für die anwendungsbezogene Entwicklung ist der weitere Ausbau eines Regelwerks zum sicheren Betrieb der Anlagen. Dadurch kann der Aufbau und die Inbetriebnahme von Wasserstoff erzeugenden und verbrauchenden Anlagen beschleunigt werden. Für eine breite Marktdurchdringung ist es neben den dargestellten technischen Innovationen jedoch zwingend, verlässliche Randbedingungen für Investitionen zu schaffen.

Literatur

- [1] Anteile erneuerbarer Energien an der Endenergiebereitstellung in Deutschland: Strom, Wärme, Verkehr Quelle: AGEE-Stat. <http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#textpart-1>
- [2] Robinius, M., Strom- und Gasmarktdesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff, in RWTH Aachen University. 2015: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag. p. 255.
- [3] Robinius et al., Infrastructure Analysis of a dedicated hydrogen pipeline grid, Presentation December 2016, Herten, Conference: Beiratssitzung h2-netzwerk-ruhr e.V.
- [4] Ogata et al. (2015) Nature 520, 571–574
- [5] Turan et al. (2016) Nat. Commun. 7:12681
- [6] Kirner et al. (2016) International Journal of Hydrogen Energy 41, 20823
- [7] Dimroth et al (2006) 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion
- [8] Fallisch et al. (2017) to be published
- [9] Lettenmeier, P. et al. (2016) J. Electrochem. Soc. 163 F1-F6
- [10] Lettenmeier, P. et al. (2016) J. Power Sources 311 (2016) 153–158
- [11] Gago, A.S. et al. (2016) J. Power Sources 307 (2016) 815–825
- [12] Lettenmeier, P. (2016) Electrochim. Acta 210 (2016) 502–511
- [13] Spies, A. et al. (2015), "Visualization of the two-phase-flow inside a running polymer electrolyte membrane water electrolysis cell using neutron radiography." Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Dresden
- [14] Höh, M. et al. (2015) ECS Transactions 69, 1135–1140
- [15] Nguyen, V. et al. (2013) International Journal of Hydrogen Energy 38,4281–4290