

Elektrische Systemtechnik für die großskalige Wasserstofferzeugung



Fraunhofer IEE
Dr. Norbert Henze
norbert.henze@iee.fraunhofer.de

Jochen Bard
jochen.bard@iee.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE
Sönke Rogalla
soenke.rogalla@ise.fraunhofer.de

Felix Kulenkampff
felix.kulenkampff@ise.fraunhofer.de

Einleitung

Um die ambitionierten politischen Ziele in Deutschland für die Wasserelektrolyse zu erreichen, ist eine hohe Marktdynamik erforderlich. Doch wie haben sich die Power-to-X-Projekte in Deutschland entwickelt und wie muss diese Entwicklung fortgeschrieben werden?

Seit etwa 2013 wurden die ersten größeren PtX-Projekte realisiert und in das Netz integriert. Beispiele hierfür sind die Audi-e-Gas-Anlage in Werlte sowie der Energiepark Mainz mit jeweils 6 MW-Anlagen.

In 2018 waren ungefähr 30 Anlagen in Planung, Bau oder Betrieb mit einer Gesamtleistung von ~25 MW. Davon haben die meisten Anlagen eine Anschlussleistung von 1 MW oder kleiner.

In 2019 gab es den Ideenwettbewerb zu Reallaboren der Energiewende, in dem u. a. auch Wasserstofftechnologien adressiert waren. Hier haben sich 90 Konsortien mit Ideen beworben. Als Gewinner wurden im Juli 2019 schließlich 20 Projekte verkündet. Dabei sollten auch mehr als 200 MW Elektrolyseleistung installiert werden. Hierzu läuft eine Begleitforschung, die die Reallabore wissenschaftlich betreut. Weitere Informationen hierzu findet man im Internet [1].

Seit Mai 2021 laufen auch IPCEI Förderungen (Important Projects of Common European Interest) für transnationale Vorhaben von gemeinsamem europäischen Interesse, die mittels staatlicher Förderung einen wichtigen Beitrag zu Wachstum, Beschäftigung und Wettbewerbsfähigkeit der europäischen Industrie und Wirtschaft leisten. Damit sollen allein in Deutschland Investitionen in Höhe von 33 Mrd. EUR ausgelöst werden. Von über 200 Projektskizzen wurden 62 deutsche Großvorhaben ausgewählt. Darin sind 19 Projekte mit Bezug zur Wasserstofferzeugung zu finden mit einer Gesamtleistung von mehr als 2 GW [2].

Das nationale Ziel, das mit all diesen Maßnahmen angestrebt wird, sind 10 GW Elektrolyse in 2030 [3] und weitere 5 GW bis 2035 [4]. Gemäß der Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa sind die EU-Ziele 6 GW bis 2024 bzw. 40 GW bis 2030 [5].

Internationale PtX-Projekte sind in der McKinsey Studie „Hydrogen Insights“ zu finden [6], [7]. Darin werden 359 Großprojekte identifiziert. Die angekündigte Produktionskapazität für kohlenstoffarmen Wasserstoff beträgt demnach 11 Millionen Tonnen bis 2030. Dies ist ein Anstieg von 64% seit Dezember 2020 und von über 450% seit Dezember 2019. 70% der angekündigten Produktionskapazität stammen aus erneuerbaren Energiequellen, während die anderen 30% kohlenstoffarmer Wasserstoff aus fossilen Brennstoffen in Kombination mit CCS sind. Die Produktion aus erneuerbaren Energiequellen beläuft sich bis 2030 auf rund 65 GW Elektrolysekapazität. Für diese Szenarien wurden drastische Kostenreduktionen angenommen, die einerseits auf einer Reduktion der Kosten für erneuerbare Energien herrühren und andererseits auch von einer Reduktion der Investitionskosten für Elektrolyseanlagen.

Um diese hochgesteckten Ziele zu erreichen, ist eine rasche Steigerung der Produktionskapazität auf > 1 GW/a ist erforderlich! Der Markt muss sich deutlich schneller entwickeln und Produktionskapazitäten müssen gesteigert werden um den geplanten Scale-Up der Elektrolysekapazitäten ermöglichen zu können.

Motivation und Forschungsbedarf

Was ist nun die Motivation für Forschung beim Scale-Up der Elektrolysekapazität? Im Rahmen der elektrischen Wasserstoff-Systemtechnik betrachten wir insbesondere die Leistungselektronik und Netzintegration von Elektrolyseanlagen.

Die Ausgangssituation wurde oben dargestellt: grüner Wasserstoff wird bei der Energiewende und der Erreichung der Klimaziele eine wichtige Rolle spielen. Hierfür sind große Mengen elektrischer Energie erforderlich, die am Standort der Elektrolyseanlagen bereitgestellt werden muss. Bei der Versorgung der Elektrolyseure und deren Einbindung in das elektrische Netz spielen leistungselektronische Stromrichter eine zentrale Rolle. Hier wird sich ein zunehmender Bedarf an kostengünstiger Stromrichtertechnik mit hohem Wirkungsgrad, Langlebigkeit und Netzdienlichkeit entwickeln.



Abbildung 1

IPCEI-Standorte:

Für Deutschland wurden u. a. 19 Großvorhaben mit Bezug zu Wasserstoff ausgewählt.

(Quelle: © BMWK)

Um diesen Bedarf zu decken, ergeben sich bei der Entwicklung der Stromversorgungstechnik technologie- und kostenbezogene Herausforderungen. Bezogen auf die Technologie geht es darum, die Stabilität des Gesamtsystems bei dargebotsabhängiger Stromversorgung aus erneuerbaren Energien sicherzustellen. Dazu müssen dynamische Wechselwirkungen zwischen dem Netz, der Leistungselektronik und dem Elektrolyseur sicher beherrscht werden können. Auf der Kostenseite geht es dann darum, den Anteil der elektrischen Systemtechnik an den Anlagekosten zu senken, indem modulare und standardisierte Gleichrichter aus Großserienfertigung verwendet werden.

Stand der Technik

Wie ist die Situation heute und von welchem Stand der Technik bei den Elektrolyseuren und der Leistungselektronik gehen wir aus?

Elektrolyseure sind noch kein Massenprodukt. Die Fertigung erfolgt bisher in kleinen Stückzahlen und es gibt kaum Standards. Jedes Projekt hat seine individuellen Anforderungen. Zwar ist die Wasser-Elektrolyse keine neue Technologie, der bevorstehende großskalige Aufbau von Elektrolyse-Kapazitäten wird jedoch verschiedene technische Weiterentwicklungen hervorbringen. Aus Sicht der elektrischen Systemtechnik lassen sich folgende Trends erkennen:

- Die Leistung von Elektrolyse-Stacks wird in den Multi-Megawattbereich steigen.
- Die DC-Spannungsniveaus werden steigen.
- Zur Erfüllung neuer Anforderungen hinsichtlich Wirkungsgrad, Regeldynamik und Spannungsqualität werden neue Stromrichtertopologien zum Einsatz kommen.
- Zur Vermeidung von Netzausbau, werden Hybridanlagen in Verbindung mit Photovoltaik, Windenergie und Speichern zur erzeugungsnahen H₂-Produktion entstehen.
- Wasserstoff-Gewinnung auf hoher See wird ein Thema werden, da hier große Mengen an Windstrom bereitgestellt werden können und der Wasserstoff-Transport per Schiff gut zu realisieren ist.

Zur Versorgung der Elektrolyseure werden derzeit zumeist 12-pulsige thyristorbasierte Gleichrichter verwendet. Neuere Gleichrichter beinhalten neben dem Thyristor-Gleichrichter noch einen DC/DC-Wandler, um den Elektrolyseur besser vom Netz zu entkoppeln. Der wesentliche Vorteil ist, dass es sich hier um eine kostengünstige und erprobte Technik handelt. Dem stehen aber auch Nachteile gegenüber: hoher Blindleistungsbedarf, hohe Netzrückwirkungen und somit hoher Filterbedarf. Systemdienstleistungen sind kaum möglich. In der Regel kommen die Stromrichtersysteme aus anderen Anwendungen, sind noch nicht für Elektrolyseure optimiert und haben oft einen geringen Teilwirkungsgrad.

Zukünftige Anforderungen

In Anbetracht der hohen Elektrolyse-Kapazitäten, die in den kommenden 10–20 Jahren aufgebaut werden, müssen auch Fragen der Netzintegration und Netzstabilität betrachtet werden, die mit derzeit verwendeten Technologien (netzgeführte Stromrichter) nicht bedient werden können.

Elektrolyseure werden künftig zu einem relevanten Baustein des Energiesystems. Sie können dabei nicht nur eine mögliche Flexibilitätsoption (Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch) darstellen, sondern auch wichtige Systemdienstleistungen erbringen. Sie können beispielsweise zur Spannungs- und Frequenzhaltung beitragen oder sogar netzbildende Eigenschaften übernehmen, die für die Spannungsqualität und die dynamische Netzregelung wichtig sind.

Es ist damit zu rechnen, dass neue Netzanschlussregeln erarbeitet werden müssen, mit denen großskalige Elektrolyseure in die Pflicht genommen werden, sich an der Sicherstellung eines stabilen Netzbetriebs zu beteiligen. Derartige neue Anforderungen können nicht vollständig durch etablierte Gleichrichtertechnologie erfüllt werden. Es müssen daher moderne Stromrichtertechnologien für Elektrolyseure entwickelt werden und zum Einsatz kommen.

Der netzdienliche Einsatz wird zu veränderten Anforderungen an die Elektrolyseure führen. Elektrolyseure werden zukünftig nicht nur auf hohe Volllaststunden, sondern auch zur Abnahme von Spitzenlasten ausgelegt werden. Neben der Deckung des Wasserstoff-Bedarfs der angeschlossenen verfahrenstechnischen Anlagen müssen auch Leistungsvorgaben von der Netzseite erfüllt werden. Etablierte, robuste (und günstige) Thyristor-Gleichrichter müssen durch hoch-dynamisch regelbare Stromrichterlösungen ersetzt werden.

Auf dem Weg aus der Nische zu einem Markt mit hohen Installationszahlen können folgende Ansätze verfolgt werden:

- „Best Practice“ von PV-/Wind-/Speicher-Stromrichtern in der Multi-Megawatt-Klasse in die Elektrolyse-Branche übertragen.
- Maßgeschneiderte leistungselektronische Komponenten entwickeln. Dies ist bei hohen Stückzahlen möglich.
- Optimierung der Anlagenkonzepte (von der Zelle bis zur Netzeinspeisung). Nicht einzelne Komponenten isoliert betrachten, sondern immer im Systemkontext. D. h. den Stromrichter als Schnittstelle zwischen Netz und Elektrolyseur betrachten und beide Seiten für ein optimales Systemdesign berücksichtigen.

Diese Themen werden u. a. in den Projekten HyLeiT und OffsH2ore bearbeitet. Das Forschungsziel ist eine kostenoptimierte Systemtechnik und Netzintegration von Elektrolyseanlagen.

Lösungsansätze

Das BMBF fördert drei Wasserstoff-Leitprojekte, die einen zentralen Beitrag zur Umsetzung der Nationalen Wasserstoffstrategie darstellen.

Die Wasserstoff-Leitprojekte sollen über vier Jahre Wasserstofftechnologien in drei zentralen Bereichen umfassend weiterentwickeln:

- Das Projekt H2Mare erforscht Möglichkeiten, Wasserstoff und seine Folgeprodukte direkt auf See mithilfe von Windrädern zu produzieren.
- Das Projekt TransHyDE entwickelt, bewertet und demonstriert Technologien zum Wasserstoff-Transport.
- Das Projekt H2Giga widmet sich der serienmäßigen Herstellung von Wasser-Elektrolyseuren.

Bezüglich der elektrischen Systemtechnik ist insbesondere das Leitprojekt H2Giga von Bedeutung. Das Ziel von H2Giga ist der Scale-up der Wasserstoff-Herstellung in den GW-Maßstab durch Technologien für die Industrialisierung der Wasserelektrolyse. Neben etablierten und neuen Verfahren für die Elektrolyse werden in einem Innovationspool verschiedene Querschnittsthemen betrachtet.

Das Projekt HyLeiT

In dem Innovationspool des Leitprojekts H2Giga ist ein weiteres Projekt angesiedelt, das sich mit der elektrischen Systemtechnik von Elektrolyseanlagen beschäftigt. Dieses Projekt vom BMBF geförderte Projekt nennt sich HyLeiT. Das zentrale Forschungsthema ist kostenoptimierte Systemtechnik und Netzintegration von Anlagen für die Erzeugung von grünem Wasserstoff.

Koordinator von HyLeiT ist das Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik IEE in Kassel. Weitere Partner sind die SMA Solar Technology AG, die Infineon Technologies AG, die Technische Universität Dresden und die Hochschule Bonn-Rhein-Sieg.

Das Ziel von HyLeiT ist die Entwicklung einer neuen Generation von Elektrolyse-Stromrichtern und elektrischer Systemtechnik mit folgenden Eigenschaften:

- Eine deutliche Reduzierung der Kosten gegenüber dem heutigen Stand der Technik

- Eine verbesserte DC-Stromqualität für den Elektrolyseur sowie eine erhöhte Zuverlässigkeit und Sicherheit
- Sicherstellung der Netzverträglichkeit und Netzdienlichkeits-Optionen

Dabei sollen auch Szenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien betrachtet werden.

Um diese Ziele zu erreichen, werden verschiedene Pfade bzw. Lösungsansätze verfolgt. Im Mittelpunkt steht der Gleichrichter für die Stromversorgung. Dafür schauen wir uns verschiedene Optionen an:

- Zielgerichtete Anpassung und Nutzbarmachung von bewährter, robuster und netzdienlicher Großserientechnik der PV- & Batteriestromrichter für Elektrolyseanlagen
- Skalierbare Stromversorgungstechnologie für Elektrolysestromrichter auf Basis von Thyristoren. Dabei stehen vor allem hybride Konzepte im Fokus, die eine Kombination aus Thyristorstromrichter und IGBT- bzw. SiC-MOSFET-Stromrichter darstellen.
- Verwendung speziell entwickelter Halbleiterbauelemente in Stromrichterkonzepten für Elektrolyseanlagen. Mit diesem Ansatz sollen Lösungen erarbeitet werden, die zukünftigen Anforderungen an Netzdienlichkeit, Zuverlässigkeit und Funktionalität gerecht werden.

Durch Untersuchung und Vergleich verschiedener Lösungen soll eine technisch und wirtschaftlich optimale Lösung für die Stromversorgung und Netzintegration von Elektrolyseanlagen gefunden werden. Weiterhin werden auch Tools zum Design des Gesamtsystems erstellt, um einerseits die Entwicklung von Stromrichtern zu beschleunigen und andererseits auch um die Komponenten Testen und demonstrieren zu können. Hier kommen vor allem Entwicklungs- und Testumgebungen auf Basis von Model in the Loop und Hardware bzw. Power-Hardware in the Loop Konzepten zum Einsatz.

Ein weiterer Schwerpunkt sind Systemanalysen und Validierungen, wobei es um Themen und Fragestellungen geht wie z. B.

- Kostenreduktion, Netzdienlichkeit und hohe Wirkungsgrade durch optimierte Halbleitertechnik
- Untersuchungen zum Betrieb in EE-Systemen bzw. Netzen mit hohem Anteil EE
- Bereitstellung von Systemdienstleistungen bei volatiler Erzeugung aus erneuerbaren Energien
- Untersuchung von Elektrolyse-Stacks zur Erstellung von echtzeitfähigen Simulationsmodellen und optimalen Auslegung des Stromrichters
- Entwicklung angepasster Stromrichtertechnik, die Degradation der Stacks und unterschiedliche

Betriebszustände der Elektrolyse effizient beherrscht

- Entwicklung von Testszenarien

Das Projekt OffsH2ore

Aufgrund der begrenzten Flächenverfügbarkeit sowie anderer Herausforderungen für den Ausbau erneuerbarer Energien an Land wird über den Import von Energieträgern wie Wasserstoff nachgedacht – etwa aus Australien oder Afrika [8]. Andererseits bietet aber die Offshore-Wasserstoffherzeugung mit hohen Volllaststunden die Chance, die gesamte Wertschöpfungskette auch auf nationaler Ebene abzudecken. Gleichzeitig kann mit diesem Ansatz der weitere Ausbau der Offshore-Windleistung vom Netzausbau entkoppelt werden. Mit der Offshore-Wasserstoffherzeugung sind jedoch weitere anwendungsspezifische Herausforderungen verbunden, die die oben beschrieben und im Projekt HyLeiT bearbeiteten systemtechnischen Fragestellungen ergänzen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts „OffsH2ore“ wird erstmals die Offshore-Produktion von Wasserstoff aus Offshore-Wind im Inselbetrieb umfassend untersucht. Neben den technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen im Hinblick auf die Betriebsbedingungen auf See werden insbesondere Fragen zu Speicherung, Transport und Logistik von Wasserstoff, Betrieb und Wartung der Offshore-Anlagen sowie regulatorische Aspekte behandelt. Insbesondere zielt das Projekt darauf ab, innovative technische Lösungen im Zusammenhang mit der Implementierung einer integrierten maritimen Wasserstoffversorgungskette zu identifizieren. Durch die Fokussierung auf die Speicherung und den Transport von komprimiertem Wasserstoff hebt sich der gewählte technische Ansatz klar und bewusst von bestehenden Projektideen und Konzeptstudien zur Offshore-Wasserstoffproduktion ab. Das Ergebnis des Projekts wird ein technisch und wirtschaftlich optimiertes Design einer integrierten Offshore-Wasserstoffproduktionsanlage und des dazugehörigen maritimen Logistikkonzepts sein. Mit dem Projektkoordinator PNE AG, dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, der SILICA Verfahrenstechnik GmbH, der KONGSTEIN GmbH und der Wystrach GmbH bringt das Projekt „OffsH2ore“ ein erfahrenes und komplementäres Konsortium aus Industriepartnern und Hochschulen aus der gesamten Wertschöpfungskette zusammen. Basis für dieses Pionierprojekt ist ein Offshore-Windpark, der direkt an eine 500-MW-Elektrolyseplattform zur Produktion von bis zu 40.000 Tonnen grünen Wasserstoff pro Jahr angeschlossen ist.

Fazit

Um die Klimaziele zu erreichen und die Energiewende in Deutschland zum Erfolg zu führen, wird grüner Wasserstoff, der nachhaltig aus erneuerbaren Energien hergestellt wird, zu einer tragenden Säule des zukünftigen Energiesystems werden.

Die systemtechnischen Anforderungen werden abhängig von den Einsatzszenarien der Elektrolyseanlagen steigen, was innovative Lösungen erforderlich macht. Insbesondere beim Offshore Einsatz kommen noch verfahrenstechnische und logistische Anforderungen hinzu.

Die Produktion von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien hat großes Potenzial zur Optimierung hinsichtlich Systemintegration und Kostenreduktion.

Dank

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben HyLeiT wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03HY117A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben Off-H2ore wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03EI3031E gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literaturverzeichnis

- [1] „Reallabore der Energiewende,“ [Online]. Available: <https://www.energieforschung.de/spotlights/reallabore>
- [2] „IPCEI Wasserstoff: Gemeinsam einen Europäischen Wasserstoffmarkt schaffen,“ [Online]. Available: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/ipcei-wasserstoff.html>
- [3] „Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis90/Die Grünen und FDP“, 2021.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), „Die nationale Wasserstoffstrategie“, Berlin, 2020.
- [5] Europäische Kommission, „Eine Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa (COM/2020/301 final),“ Brüssel, 2020.
- [6] McKinsey & Company, „Hydrogen Insights – A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness“, Februar 2021.
- [7] McKinsey & Company, „Hydrogen Insights – An updated perspective on hydrogen investment, market development and momentum in China“, July 2021.
- [8] BMBF, „Woher soll der Grüne Wasserstoff kommen?“, [Online]. Available: <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurz-meldungen/de/woher-soll-der-gruene-wasserstoff-kommen.html>