

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, ISE

Charakterisierung und techno-ökonomische Analyse von Verwertungspfaden für Sauerstoff als Nebenprodukt der Wasserelektrolyse

Exposé zur Masterarbeit

Paul Schlegel

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE
in Freiburg im Breisgau

Datum: 24.10.2022

Kurzgutachten zur Darstellung der Exzellenz der Abschlussarbeit

Grüner Wasserstoff und dessen Syntheseprodukte, im Folgenden vereinfacht unter Wasserstoff zusammengefasst, werden in wissenschaftlichen Studien mit Zielsetzung der Klimaneutralität als ein zentrales Element des Energiesystems, der energieintensiven Industrie und des Fernverkehrs gehandelt¹. Dies unterstreichen auch aktuelle politische Beschlüsse wie „Fit for 55“². Obwohl Elektrolyseure an Standorten außerhalb Deutschlands, die eine höhere Verfügbarkeit erneuerbarer Energien aufweisen, höhere Volllaststunden erreichen, ist die Sinnhaftigkeit der Integration dieser Anlagen in das deutsche Energiesystem wissenschaftlicher Konsens. Gründe hierfür sind die variable Anwendung der gewonnenen Energieträger in Prozessen, in denen eine direkte Stromnutzung schwer umsetzbar ist (Schifffahrt, Flugverkehr), das hohe Flexibilisierungspotential zur verstärkten Integration erneuerbarer Energien in das Energiesystem sowie die großskalige, nahezu verlustfreie Speicherung stofflicher Energie über einen Zeitraum von mehreren Tagen oder Monaten.

Um die Etablierung einer Wasserstoffwirtschaft zu unterstützen, entwickelt das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Simulationsmodelle zur Untersuchung der Einbindung und des Zusammenspiels von Wasserstofferzeugungsanlagen, Infrastruktur und Versorgungsketten. Die Modelle reichen dabei von der Konzeption einer Wasserstofferzeugungsanlage bis zur techno-ökonomischen Analyse und Optimierung internationaler Export-/Importketten.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit soll in der Erweiterung und Anwendung der bestehenden Simulationsmodelle hinsichtlich der Gewinnung und Aufbereitung sowie mehrerer Verwendungsmöglichkeiten des Sauerstoffs aus der Elektrolyse bestehen. Ziel der Abschlussarbeit ist es zu erarbeiten, in welchen präzisen Anwendungsfällen und unter welchen Rahmenbedingungen eine Nutzung des Elektrolyse-Nebenprodukts Sauerstoff sinnvoll und wettbewerbsfähig zu Konkurrenzanlagen ist. Hierfür sollen technische Anforderungen und Grenzen der Sauerstoffnutzung in verschiedenen Anwendungsgebieten bestimmt und somit konkrete Verwertungspfade für die Nutzung des Sauerstoffs lokalisiert werden. Diese Verwertungspfade sollen dann unter vorher definierten techno-ökonomischen Kriterien kategorisiert und mit Konkurrenzanlagen verglichen und bewertet werden. Eine Optimierung der Verwertungspfade hinsichtlich minimaler Wasserstoffgestehungskosten soll unter Berücksichtigung der räumlichen Struktur der Anwendung bzw. Abnehmer und den resultierenden Transportoptionen sowie -kosten erfolgen. Des Weiteren sollen die Kosten- und Erlösstruktur, der CO₂-Fußabdruck der Verwertungspfade und der Effekt der Sauerstoffnutzung auf den Wirkungsgrad der Anlage ermittelt werden.

Relevanz und angestrebte Forschungslücke

In der Literatur finden sich bereits einige wenige ökonomische Analysen bezüglich der Nutzung von Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse. Diese Analysen zielen hauptsächlich auf die Abschätzung der potenziellen Nachfrage von Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse in ausgewählten Anwendungsbereichen und der relativen Kosten der Wasserstoffproduktion ab, beispielsweise in medizinischen Anwendungen in Krankenhäusern bei Kato et al.³. In bisherigen Studien werden dabei lediglich punktuell ökonomische Analysen eines konkreten Verwertungspfades des Sauerstoffs im Sinne eines Fallbeispiels durchgeführt, wobei der Elektrolyseur meist direkt am Verwertungsort platziert ist oder die Transport- und Beschaffungskosten der Edukte und Produkte außer Acht gelassen werden. Die veröffentlichten Studien leisten also bereits einen Anreiz für eine zukünftige, wirtschaftliche Nutzung von Elektrolyseuren unter Nutzung des Nebenprodukts Sauerstoff in vereinzelt

¹ Fraunhofer ISE, *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Update Klimaneutralität 2045*, 2021

² <https://cor.europa.eu/en/news/Pages/FIT-FOR-55-PACKAGE.aspx>

³ Kato, T.; Kubota, M.; Kobayashi, N.; Suzuoki, Y., *Effective utilization of by-product oxygen from electrolysis hydrogen production*, 2005, *Energy*, Volume 30, Issue 14

Anwendungen. Allerdings lassen sie auf Grund der fehlenden räumlichen und zeitlichen Auflösung der Analysen keine systemische Betrachtung zu und können so den Aufbau einer großflächigen Wasserstoffwirtschaft nur bedingt unterstützen. Diese Forschungslücke soll durch die geplante Abschlussarbeit geschlossen werden. Das in der Abschlussarbeit zu entwickelnde Modell zur techno-ökonomischen Analyse ermöglicht die systemische Betrachtung der Beziehungen zwischen potentiellen Wasserstoff- bzw. Sauerstoff-Erzeugern und -Abnehmern sowie deren Kostenstrukturen in verschiedenen, konkreten Verwertungspfaden. Durch die objektive Berücksichtigung räumlicher Gegebenheiten ganzer Regionen wird eine wirtschaftliche Optimierung der Sauerstoff-Verwertungspfade unter Minimierung der Wasserstoffgestehungskosten vorgenommen. Weiterhin berücksichtigt das Modell technische Anforderungen und Grenzen der Sauerstofferzeugung und des -transports in konkreten Verwertungspfaden und geht so über die rein ökonomische Betrachtung eines einzelnen Anwendungsfalls hinaus.

Wissenschaftlicher Ansatz und Vorgehen

Das zu entwickelnde Modell zur Analyse von Verwertungspfaden für Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse erweitert die bereits bestehende Modellbibliothek zur Simulation von Wasserstoffsystemen unter Verwendung von Matlab/Simulink um techno-ökonomische Modelle zur Sauerstoffnutzung. Mithilfe des bestehenden Modell-Frameworks wird dabei das zeitlich aufgelöste Verhalten von Anlagen, basierend auf Stoff- und Energiebilanzen, Kennfeldern, thermodynamischen Zusammenhängen und physikalischen Randbedingungen, simuliert. Das Modell-Framework wird bereits heute im Team am Fraunhofer ISE für techno-ökonomische Optimierungen in öffentlichen und privatwirtschaftlichen Forschungsprojekten angewendet. Die Option zur Nutzung von Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse, um die Wasserstofferzeugungsanlagen wettbewerbsfähiger zu betreiben, ist in der Modellbibliothek aktuell jedoch nicht implementiert und soll nun im Rahmen der Abschlussarbeit ergänzt werden.

Zu anfangs werden hierfür eine ausführliche Recherche der Grundlagen zur techno-ökonomischen Bewertung der Sauerstoffnutzung aus der Elektrolyse durchgeführt und konkrete Verwertungspfade lokalisiert. Anschließend werden verschiedene Pfade zur Gewinnung und Anwendung von Sauerstoff aus der Elektrolyse in Matlab/Simulink simuliert, um die Effekte der Sauerstoffnutzung auf den tatsächlichen Elektrolysebetrieb (strom-/wassergeführt) oder die Sauerstoffversorgung von Kunden zu analysieren.

Auch eine räumliche Auflösung der Simulation ist derzeit nicht implementiert und eine Untersuchung der räumlich-örtlichen Zusammenhänge wird nur in Einzelfällen manuell vorgenommen. Hierfür wird am Fraunhofer ISE, simultan zur Abschlussarbeit, eine Schnittstelle zwischen dem bisherigen Modell in Matlab/Simulink und einem Geoinformationssystem (GIS) erstellt. Das in der Abschlussarbeit zu implementierende Modell soll gewonnene Daten für ebendiese Schnittstelle liefern, um das Wasserstoff-Modell des ISE um den Aspekt der Sauerstoffnutzung aus der Elektrolyse zu erweitern. In GIS soll eine Analyse der geographischen und infrastrukturellen Voraussetzungen der Region erfolgen, um potenzielle Wasserstoff- bzw. Sauerstoff-Erzeuger und -Abnehmer zu verbinden und Transportwege und -kosten analysieren zu können. Es sollen so strategisch günstige Punkte zur Verwertung und zum Transport des Nebenprodukts Sauerstoff unter Berücksichtigung bereits bestehender Infrastruktur wie Strom- und Gasleitungen, Transportoptionen wie Schiene und Straße sowie Randbedingungen zur Wasserstofferzeugung wie Wasserstoffbedarf und Wasserverfügbarkeit herausgearbeitet werden. Die simulierten Verwertungspfade werden dann anhand techno-ökonomischer Kriterien bewertet und mit Referenzszenarien der konventionellen Wasserstofferzeugung ohne Nutzung des Sauerstoffs verglichen. Mithilfe dieser Ergebnisse sollen zuletzt Schlussfolgerungen gezogen werden können, unter welchen konkreten Randbedingungen und in welchen Anwendungen die Nutzung des Nebenprodukts Sauerstoff ökonomisch vorteilhaft und technisch machbar

ist. Ergänzend werden wissenschaftliche Projekte zur Entwicklung von Wasserstoffmodellregionen in Deutschland, in denen die Verwendung von Sauerstoff einen wichtigen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der Elektrolyse leisten kann, unterstützt.

Risikoanalyse für kritische Bausteine

Die Lokalisierung und Simulation konkreter Verwertungspfade für Sauerstoff als Nebenprodukt der Elektrolyse sind essenzielle Bestandteile dieser Abschlussarbeit. Von zentraler Bedeutung für das Forschungsergebnis ist es daher, möglichst umfassende und präzise Informationen über aktuelle und potenzielle Sauerstoff-Abnehmer, entsprechende Bedarfsmengen, Kosten aktueller Sauerstofferzeugung, technische Anforderungen an den Sauerstoff und dessen Erzeugung aus der Elektrolyse, in Frage kommenden Transportwege, etc. zu aggregieren. Datenverfügbarkeit, insbesondere für die Flächenanalyse in GIS, ist daher ein kritischer Baustein dieser Arbeit. Sorgfältige Literaturrecherche sowie ein intensiver Austausch mit Experten innerhalb des ISE und innerhalb verwandter Forschungsprojekte sollen dieses Risiko minimieren. Für die fehlerfreie Modellierung in Matlab/Simulink sollte außerdem ausreichend Zeit eingeplant werden, um mehrere Iterationen sowie die Einarbeitung von Korrekturen zu gewährleisten. Das zu entwickelnde Modell wird anschließend verifiziert und validiert, um den Qualitätsansprüchen zu entsprechen. Da insbesondere die Validierung eines Modells zeitaufwendig und komplex sein kann, wird zu Beginn eine klare Zielsetzung bezüglich der Modellentwicklung formuliert, die im gesamten Entwicklungsprozess fortführend modifiziert wird.