

SIMULATIONSBASIERTE INTEGRATION GROßSKALIGER ELEKTROLYSEURE UND DER EINFLUSS AUF DAS STROMÜBERTRAGUNGSNETZ

Julian Bartels

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Institut für Vernetzte
Energiesysteme, Carl-von-Ossietzky-Str. 15, 26129 Oldenburg (Deutschland),
+49 441 99906-138 | julian.bartels@dlr.de, www.dlr.de/ve

Kurzfassung: Im Zuge ihrer Wasserstoffstrategie [1] forciert die Europäische Kommission den systematischen Aufbau großskaliger Kapazitäten für Erzeugung, Speicherung und Transport von Wasserstoff. Aus den Ausbauzielen der Europäischen Kommission für die Erzeugung von grünem Wasserstoff kann daher ein Bedarf an Elektrolyseuren abgeleitet werden, deren Betrieb die Bereitstellung erheblicher Mengen elektrischer Energie erfordert. Diese Arbeit stellt die simulationsbasierte Integration eines solchen elektrischen Großverbrauchers anhand eines Anwendungsfalls im deutschen Bundesland Schleswig-Holstein vor. Der Einfluss der Anlagenintegration auf die umgebende Infrastruktur des Stromübertragungsnetzes wird anschließend analysiert. Das Ziel ist die frühzeitige Identifikation von möglichen Versorgungsschwierigkeiten durch den geplanten Zubau von Produktionskapazitäten für Wasserstoff.

Keywords: Elektrolyse, Wasserstoff, Optimierung, Energiesystem, Stromsystem, Stromnetz

1 Motivation

Auf dem Weg in ein kohlenstoffneutrales Energiesystem in 2050 hat die Europäische Kommission einen massiven Ausbaubedarf von Elektrolyseuren zur Erzeugung regenerativen Wasserstoffs identifiziert [1]. Im Jahr 2030 sollen mindestens 40 Gigawatt Elektrolyseurkapazitäten installiert sein, weshalb bereits im Zeitraum 2020 bis 2024 der Aufbau großskaliger Elektrolyseure bis zur Größenordnung von 100 MW Anlagenkapazität gefördert wird. Solche großskaligen Elektrolyseure könnten in den Regionen verbrauchsintensiver Industrien wie Raffinerien oder Anlagen der Stahl- oder chemischen Verarbeitung aufgebaut werden. Für den Betrieb solcher großskaligen Elektrolyseure sind enorme Strommengen notwendig, dessen Transmission mitunter zu Engpässen im Stromnetz und somit zu Versorgungsschwierigkeiten führen können. Energiesystemmodelle ermöglichen es hierbei die Integration der Elektrolyseure zu simulieren und deren Auswirkungen auf das Stromübertragungsnetz zu analysieren. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Netzabbildung, deren Auflösung einen direkten Einfluss auf die Erfassung von Engpässen besitzt [2].

Eine in diesem Kontext interessante Modellregion liegt im norddeutschen Bundesland Schleswig-Holstein, die sich sowohl durch ein hohes Potential an Erneuerbaren Energien als auch durch einen hohen Anteil an Abregelungsmaßnahmen [3] auszeichnet. Zudem verfügt Schleswig-Holstein über verbrauchsintensive Industrien wie die Raffinerie Heide, die bereits an kohlenstoffarmen Industrieanlageprozessen forscht¹.

¹ Forschungsprojekt KEROSyN100, <https://www.kerosyn100.de/>

2 Methodik

Für einen Anwendungsfall im norddeutschen Schleswig-Holstein wird ein großskaliger Elektrolyseur als einzelner Stromverbraucher im konstanten Betrieb abstrahiert. Anschließend werden der Elektrolyseur in ein Stromsystemmodell integriert und lineare Lastflussoptimierungen in einer Ganzjahressimulation mit stündlicher Auflösung für die Modellregion des Anwendungsfalles mit dem Softwaretool PyPSA [4] durchgeführt. Die Optimierung minimiert dabei die Gesamtsystemkosten und setzt die unterschiedlichen Energieerzeugungstypen gemäß einer merit-order ein. Somit kann eine primäre Nutzung von erneuerbaren Energieerzeugungstypen wie Wind und Solar sichergestellt werden. Zusätzlich werden Netzrestriktionen berücksichtigt, was die gewünschte Identifizierung von Engpässen im Netzmodell ermöglicht.

Die erforderliche Stromübertragungsnetzinfrastruktur inklusive der 110kV-Netzebene steht durch das Projekt open_eGo [5] zur Verfügung und ist die Grundlage zur Bewertung des Netzeinflusses. In diesem Projekt wurde unter anderem ein frei verfügbares Stromnetzmodell auf Basis von OpenStreetMap²-Daten entwickelt, welches für alle Spannungsebenen ab 110 kV georeferenziert ist. Bisher wurde das Netzmodell Deutschlands extrahiert und aufgebaut, allerdings ist eine Übertragbarkeit auf andere Länder insbesondere durch die Entwicklung nach Open-Source-Prinzipien möglich. Open_eGo stellt zudem eine große Datengrundlage zu installierten Kapazitäten von unterschiedlichen Energieerzeugungstypen, deren Zeitreihen für ein ganzes Jahr und Investitions- sowie Betriebskosten bereit. Diese sind ebenfalls frei verfügbar und werden auf der OpenEnergy Platform³ veröffentlicht.

Zur Bewertung der Elektrolyseurintegration werden die Änderungen der Leitungsauslastungen im Vergleich zu einem Referenzsimulationssystem ohne Elektrolyseur betrachtet. Die Transmissionen von Wirkleistungen über die verschiedenen Leitungen sind ein Teil der Optimierungsergebnisse und können im Verhältnis zur maximal übertragbaren Wirkleistung als Auslastung angegeben werden. Die Differenz aus Wirkleistungsauslastungen je Stromleitung im Simulationssystem mit Elektrolyseurverbrauch und dem Simulationssystem ohne Elektrolyseur in Relation zur Wirkleistungsauslastung im Simulationssystem ohne Elektrolyseur entspricht der ausgewerteten prozentualen Leitungsauslastungsänderung. Die Wirkleistungsauslastungen werden jeweils als Jahresdurchschnitt angegeben.

Als Bewertungsindikator inwieweit eine Leitungsauslastungsänderung signifikant ist, wurde ein Schwellenwert von 5% als Abweichung zum Referenzsystem gewählt. Um ferner den Einfluss der Elektrolyseurgröße zu ermitteln, wurden diverse Simulationen mit variierendem elektrischem Stromverbrauch des Elektrolyseurs in Prozenten des Gesamtjahresverbrauchs von Schleswig-Holstein durchgeführt und analysiert.

² www.openstreetmap.org/

³ <https://openenergy-platform.org/>

3 Ergebnisse

Größe des Elektrolyseurs

Die Elektrolyseurgröße im Sinne des elektrischen Verbrauchs wurde zwischen 1% und 50% des Gesamtjahresstromverbrauchs Schleswig-Holsteins von 13,964 TWh variiert. Es wird dabei angenommen, dass mit steigender Elektrolyseurkapazität und somit steigendem Strombedarf auch der Einfluss in der Netzstruktur zunimmt. Abbildung 1 zeigt drei auserwählte Simulationsergebnisse für den Verbrauch gemäß 1%, 15% und 40% sowie einen nationalen Überblick für das letztgenannte System.

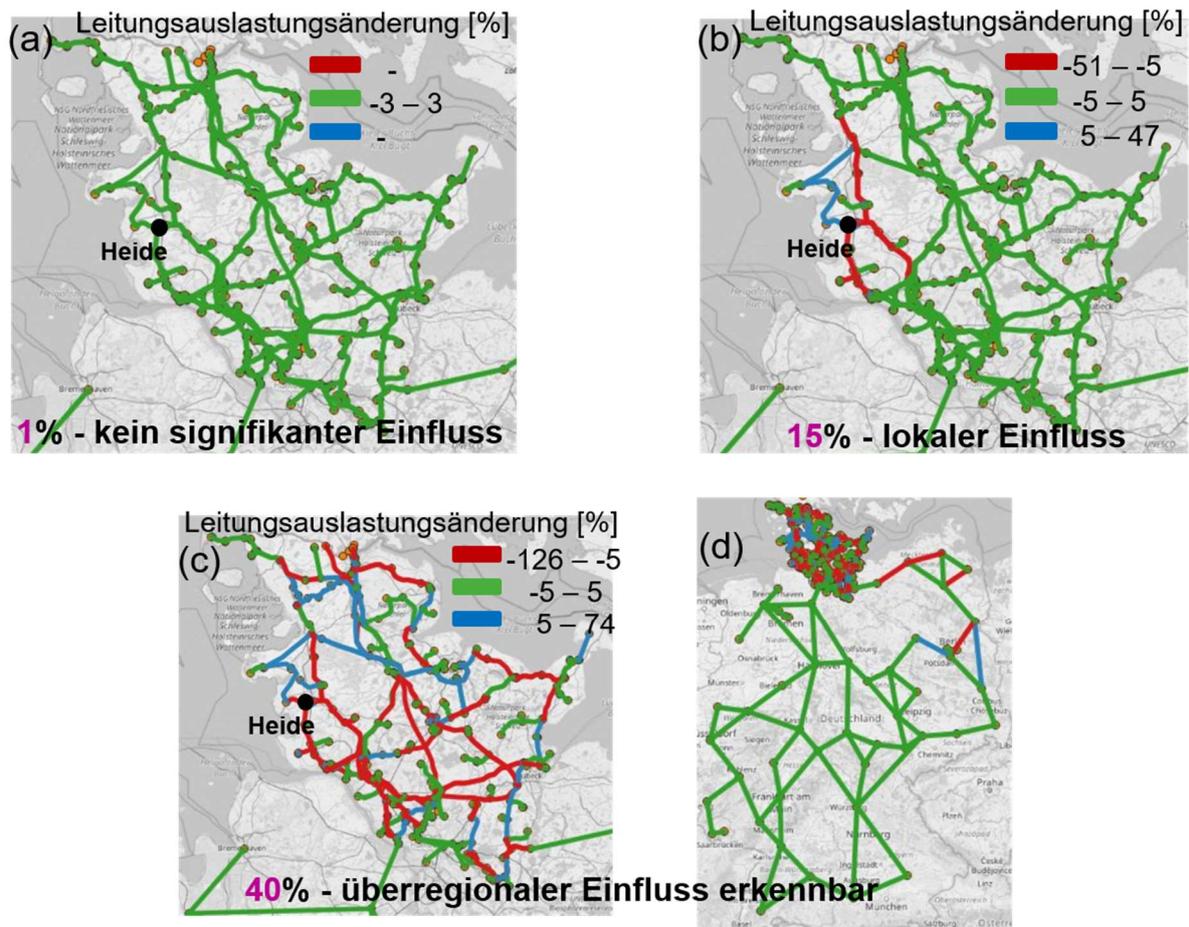


Abbildung 1: Visualisierung der prozentualen Leitungsauslastungsänderungen für Elektrolyseurgrößen, die (a) 1%, (b) 15% und (c) 40% des Gesamtjahresstromverbrauchs Schleswig-Holsteins entsprechen. Die Leitungsauslastungsänderungen wurden im Vergleich zu einer Referenzsimulation ohne Elektrolyseur ermittelt, wobei rote Leitungen eine negative Differenz, blaue Leitungen eine positive Differenz und grüne Leitungen einen Toleranzbereich von $\pm 5\%$ darstellen. Zusätzlich zeigt (d) den nationalen Überblick für das Simulationssystem in (c).

Für eine Elektrolyseurgröße, die 1% des Gesamtjahresstromverbrauchs von Schleswig-Holstein entspricht, variieren die Leitungsauslastungsänderungen im Jahresdurchschnitt zwischen $\pm 3\%$ (s. Abbildung 1 (a)). Die Änderung der Leitungsauslastung wird hierbei mithilfe einer weiteren Referenzsimulation des Systems ohne Elektrolyseur ermittelt. Die resultierenden Änderungen für eine solche Elektrolyseurkapazität werden als unkritisch eingestuft und die Versorgung eines Elektrolyseurs in dieser Größenordnung ist ohne

Einschränkungen im Netzbetrieb möglich. In Abbildung 1 (b) wurde die Elektrolyseurgröße auf 15% des Jahresverbrauchs erhöht, was zu einer signifikanten, aber lokal begrenzten Änderung der Leitungsauslastung führt. Als Toleranzwert für eine signifikante Änderung wurde 5% festgelegt. Rot gefärbte Leitungen zeigen eine negative Differenz aus der Subtraktion der Leitungsauslastung für das System mit Elektrolyseur und dem System ohne Elektrolyseur. Blaue Leitungen identifizieren entsprechend positive Differenzen. Zu erkennen ist der Einfluss der Elektrolyseurintegration auf die unmittelbar umliegenden Stromleitungen während die weiteren Leitungsänderungen des Systems innerhalb der Toleranz bleiben. Bei den beeinflussten Leitungen gibt es zudem einen leicht höheren Extremwert bei den negativen Differenzen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Netzbelastung im Vergleich zum Referenzsystem abgenommen hat und die Elektrolyseurintegration in dieser Größenordnung einen netzdienlichen Einfluss besitzt. Des Weiteren sind mehr Leitungen mit negativer Differenz als Leitungen mit positiver Differenz zu erkennen, was ebenfalls ein Hinweis auf einen netzdienlichen Einfluss sein kann. Als zusätzliche Beobachtung kann festgehalten werden, dass sich die Leitungen mit negativer Differenz eher im Landesinneren und die Leitungen mit positiver Differenz tendenziell eher an der Landesgrenze befinden.

Bei einer weiteren Erhöhung der Elektrolyseurkapazität gemäß 40% des Jahresverbrauchs in Abbildung 1 (c) sind hingegen nahezu sämtliche Leitungen stark betroffen und es sind in Abbildung 1 (d) zudem überregionale Einflüsse auf die Leitungen in weiteren Bundesländern zu erkennen. Bei diesem System ist der Stromverbrauch des Elektrolyseurs so hoch, dass nahezu alle Leitungen im Jahresdurchschnitt einen deutlichen Unterschied zum Referenzsystem aufzeigen. Ähnlich wie im vorherigen System hat sich die Beobachtung eines erhöhten Extremwerts bei den negativen Differenzen im Vergleich zu den positiven Differenzen noch einmal verstärkt. Da der Extremwert die Marke von 100% überschritten hat, kann zumindest für diese Leitung bzw. die Leitungen festgehalten werden, dass der Auslastungswert aus dem Referenzsystem im System mit Elektrolyseur vollständig umgekehrt und sogar teilweise übertroffen wird. Hierzu muss festgehalten werden, dass das Vorzeichen der Wirkleistungstransmission über die Leitungen der Richtung der Transmission entspricht und durch den methodischen Ansatz für Netzerstellung willkürlich ist. Nichtsdestotrotz übertrugen bei Abweichungen von über 100% die Leitungen im Referenzsystem zunächst in eine Richtung Wirkleistung und transmittieren im System mit dem integrierten Elektrolyseur nun in die entgegengesetzte Richtung. Ein beispielsweise ehemaliger Exporteur von Energie wird nun durch die Elektrolyseurintegration zum Importeur von Energie. Die Verteilung von negativen (roten) und positiven (blauen) Differenzen zeigt die Tendenz eines Nord-Süd-Gefälles, allerdings liefert dies aufgrund der willkürlichen Richtungsfestlegung keine weiteren Erkenntnisse. Mit Blick auf Abbildung 1 (d) werden auch weitere Leitungsauslastungen im nationalen System beeinflusst, allerdings eher vereinzelt. Sowohl die Netzabbildung über Schleswig-Holstein hinaus als auch die Zuordnung von elektrischen Parametern in diesen Regionen unterliegen eher groben Annahmen, weshalb den resultierenden Beobachtungen wie einem Einfluss in östlichen Bundesländern und dem Verhältnis von negativen und positiven Differenzen nicht allzu viel Gewicht beigelegt wird um eine Überinterpretation zu vermeiden. Für valide Untersuchungen des Einflusses über Schleswig-Holstein hinaus, sollte die Detailtiefe der umliegenden Bundesländer noch einmal erhöht werden. Die Abbildung 1 (d) dient eher der Komplettierung und Einordnung des Optimierungsergebnis.

4 Kritische Diskussion

Es gibt einige diskussionswürdige Annahmen und Analyseaspekte, die zur Einordnung der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Bereits die Abstraktion des wesentlich komplexeren Prozesses der Wasserelektrolyse in Form einer simplen Verbrauchszeitreihe stellt eine starke Vereinfachung dar. Als wesentlich gravierender wird allerdings die Abbildung des Elektrolyseurs durch einen konstanten Betrieb eingeschätzt, da somit jegliche Flexibilität des Elektrolyseurs genommen wird und dieser somit nicht in Zeiten von kritischen Netzsituationen reagieren kann. Die reale Elektrolyseurintegration wird daher voraussichtlich eher zu pessimistisch in den vorliegenden Ergebnissen bewertet.

Darüber hinaus stellt die Datengrundlage ein gewisses Risiko der Fehlinterpretation dar. Durch die Detailtiefe der vorgestellten Netzabbildung und entsprechend hohe Komplexität der Optimierung sowie resultierenden hohen Rechenzeiten konnten die Optimierungen nicht für mehrere Verteilungen von Stromerzeugung und -verbrauch, Kostenwerten, Netzparametern, Wetterjahren et cetera variiert werden. Dadurch ist die Sensitivität der Ergebnisse aufgrund der Datengrundlage weitestgehend unbekannt.

In der Analyse der Optimierungsergebnisse gibt es weitere Annahmen wie beispielsweise die willkürliche Wahl einer Toleranzgrenze von 5% um zwischen signifikanten und vernachlässigbaren Änderungen der Leitungsauslastungen zu unterscheiden. Des Weiteren offenbarte die gewählte Farbdarstellung bei der Analyse die Möglichkeit zur Missinterpretation. Da die Richtungen der Leitungstransmission durch den methodischen Ansatz in open_eGo willkürlich festgelegt wurden, kann eine Leitung bereits im Referenzsystem beispielsweise eine negative Leistungstransmission aufweisen. Wenn in der Analyse nun eine negative Differenz zwischen System mit Elektrolyseurintegration und dem Referenzsystem festgestellt wurde, würde das für eine solche Leitung keinen netzdienlichen Einfluss bedeuten (durch die Reduktion der transmittierten Leistung über die Leitung). Stattdessen besäße die bereits negative Leistungstransmission aus dem Referenzsystem nun im System mit Elektrolyseurintegration eine Leitungstransmission, die noch weiter in den negativen Bereich verschoben ist und entsprechend eine Verschärfung der Leitungssituation bedeutet. Daher bietet die gewählte Darstellung zwar einerseits einen intuitiven Zugriff auf die Optimierungsergebnisse, aber andererseits auch eine Tendenz zur Missinterpretation (auch in Bezug auf Import und Export von Leistung in ausgewählten Netzknoten).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Europäische Kommission zielt zur Erreichung der selbstgesetzten Klimaziele im Rahmen seiner Wasserstoffstrategie auf einen gezielten Auf- und Ausbau von Elektrolyseuren. Um die Wirkung solcher großskaligen Anlagen auf das Stromnetz zu bewerten, wurde ein detailliertes Stromnetzmodell genutzt und auf eine Modellregion im norddeutschen Schleswig-Holstein angepasst. Mithilfe von linearen Lastflussoptimierungsrechnungen können die Leitungstransmissionen detailliert betrachtet und analysiert werden.

Durch eine Variation der installierten Kapazität des Elektrolyseurs und einen Abgleich zu einem Referenzsystem ohne Elektrolyseurintegration ermöglicht dieses Modell eine Identifikation ab welcher Elektrolysekapazität signifikante Änderungen in der Leitungsauslastung zu erwarten sind. Darüber hinaus geben die Optimierungsergebnisse eine

Tendenz ab welcher Kapazität sich signifikante Einflüsse in der regionalen oder auch überregionalen Netzauslastung einstellen. Die vorgestellten Analysen zeigen dabei die Notwendigkeit einer individuellen Betrachtung der lokalen Stromversorgung bei der Integration von Elektrolyseuren und schätzt deren Einfluss auf den Netzbetrieb in Abhängigkeit des jeweiligen Stromverbrauchs ab.

Zukünftige Arbeiten können an verschiedenen Aspekten der vorgestellten Optimierungs- und Analysemethodik anschließen. Der Betrieb des Elektrolyseurs wurde in dieser Arbeit als konstant angenommen, wobei durch einen flexiblen Betrieb auf kritische Netzsituationen reagiert werden kann. Daher wird durch die Betrachtung eines flexiblen, netzdienlichen Elektrolyseurbetriebs davon ausgegangen, dass auch höhere Elektrolyseurkapazität zu einem lokal beschränkten Netzeinfluss führen. Ein weiterer Aspekt ist die Detailtiefe des überregionalen Netzmodells. Für sehr hohe Elektrolyseurkapazitäten zeigen sich überregionale Einflüsse, deren systematische Bewertung nur mit einem gleichbleibend detailreichen Netzmodell gelingen kann.

Des Weiteren sind die Aspekte des Strommarkts und der gültigen europäischen oder nationalen Regulatorik noch nicht umfassend berücksichtigt. Von beiden Aspekten werden Rückwirkungen auf den Elektrolyseurbetrieb und auf die Klassifizierung des Wasserstoffs als erneuerbarer Wasserstoff erwartet. Letzteres ist in den vorgestellten Ergebnissen bisher nicht gegeben, da die Versorgung des Elektrolyseurs aus dem Stromnetz gewährleistet wird. Dies führt zu einer Klassifizierung des so produzierten Wasserstoffs als grauen Wasserstoff. Eine tiefgreifendere Analyse kann noch den Anteil von Erneuerbaren Energieerzeugungstypen am notwendigen Strom für den Elektrolysebetrieb ermitteln, müsste jedoch für valide Aussagen ebenfalls die aktuell geltende und umgesetzte oder geplante Regulatorik wie die Renewable Energy Directive (RED) 3 [6] abbilden.

Weiterführende Arbeiten können ferner die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Elektrolysestandorte und andere Modellregionen fokussieren.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Kommission, „ec.europa.eu,“ [Online]. Available: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf. [Zugriff am 30.11.2021].
- [2] U. Müller, L. Wienholt und I. Cusmann, „The role of the high voltage power level in future power systems and their modelling,“ *IEEE. Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, 2018.
- [3] Bundesnetzagentur, „Zahlen zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen - Gesamtjahr 2020,“ [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Berichte/2020/Quartalszahlen_Gesamtjahr_2020.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [4] T. Brown, J. Hörsch und D. Schlachtberger, „PyPSA: Python for Power System Analysis,“ *Journal of Open Research Software*, 6 (1) 2018.

- [5] open_eGo Mitwirkende, „Projektwebseite open_eGo,“ [Online]. Available: <https://openegoproject.wordpress.com/>. [Zugriff am 30.11.2021].
- [6] E. Kommission, „Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates,“ [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52021PC0557>.