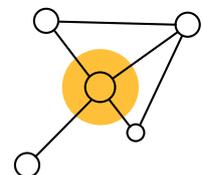
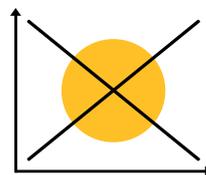
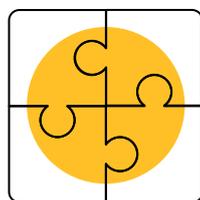
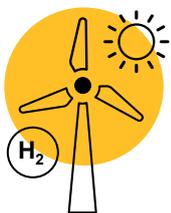


Die Gleichzeitigkeitsregel für erneuerbare Strom- und Wasserstoffproduktion

Eine Untersuchung der Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseuren

Gefördert durch: Förderinitiative Wasserstoff der
Gesellschaft zur Förderung des
Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität
zu Köln e.V.

Februar 2022



**Energiewirtschaftliches Institut
an der Universität zu Köln gGmbH (EWI)**

Alte Wagenfabrik
Vogelsanger Straße 321a
50827 Köln

Tel.: +49 (0)221 277 29-100

Fax: +49 (0)221 277 29-400

<https://www.ewi.uni-koeln.de>

Verfasst von

David Schlund

Philipp Theile

Bitte zitieren als

Schlund, D. & Theile P. (2022). Die Gleichzeitigkeitsregel für erneuerbare Strom- und Wasserstoffproduktion. EWI Policy Brief.

Das Energiewirtschaftliche Institut an der Universität zu Köln (EWI) ist eine gemeinnützige GmbH, die sich der anwendungsnahen Forschung in der Energieökonomik und Energie-Wirtschaftsinformatik widmet und Beratungsprojekte für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft durchführt. Annette Becker und Prof. Dr. Marc Oliver Bettzüge bilden die Institutsleitung und führen ein Team von mehr als 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Das EWI ist eine Forschungseinrichtung der Kölner Universitätsstiftung. Neben den Einnahmen aus Forschungsprojekten, Analysen und Gutachten für öffentliche und private Auftraggeber wird der wissenschaftliche Betrieb finanziert durch eine institutionelle Förderung des Ministeriums für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE). Die Haftung für Folgeschäden, insbesondere für entgangenen Gewinn oder den Ersatz von Schäden Dritter, ist ausgeschlossen

Kernaussagen

- Eine Gleichzeitigkeitsregel zwischen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Wasserstoffproduktion beeinflusst die Investitionen in Elektrolyseure und deren induzierte Emissionen im Stromsektor.
- Die von der europäischen Kommission im Rahmen des delegierten Rechtsakts zur Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED II) zuletzt geplante stündliche Gleichzeitigkeit reduziert durchschnittliche Deckungsbeiträge um bis zu 30% und Volllaststunden um maximal 50%. Indirekte Emissionen im Stromsektor können im Vergleich zum Verzicht auf eine Gleichzeitigkeitsregel um bis zu 85% reduziert werden.
- Die Abwägung im Zielkonflikt aus Investitionen, Wasserstoffproduktion und Emissionsbegrenzung fossiler Kraftwerke besteht daher in einer geeigneten Definition des Bilanzierungszeitraums. Langfristig verliert die Regel an Bedeutung, da der Anteil der erneuerbaren Energien im Stromsektor ansteigt.

Hintergrund

Im Zuge der Transformation des Energiesystems sehen viele Studien den Einsatz von emissionsarm hergestelltem Wasserstoff als zentral für die Dekarbonisierung von Endenergieverbrauchssektoren sowie für die Speicherung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen (EE).¹ Eine Option zur emissionsarmen Erzeugung des Wasserstoffs ist die Wasserelektrolyse unter dem Einsatz von Strom. Jedoch lassen sich mit dem Stromnetz gekoppelte Elektrolyseure im Betrieb, gegenüber EE-Anlagen, nicht als ausschließlich grüne Technologie klassifizieren, da sie neben EE-Strom auch Strom aus fossilen Energieträgern zur Wasserstoffproduktion nutzen können. Dies zwingt politische Entscheidungsträger zum Abwägen zwischen zwei Zielen: Dem Setzen von Anreizen für Investitionen in innovative Technologien und der Reduktion von Emissionen im Stromsektor. So könnten bei Vernachlässigung eines der Ziele entweder die gewünschten Investitionen ausbleiben oder aber Wasserstoff aus Kohle- bzw. Erdgasverstromung produziert werden.

Ein Ansatz zur Trennung beider Ziele ist die Unterscheidung des Wasserstoffs abhängig vom verwendeten Strom. Beispielsweise kann dem erzeugten Wasserstoff je nach Strombezug eine Grüneigenschaft zugesprochen werden, die dann in nachfolgenden Stufen der Wertschöpfungskette als Merkmal herangezogen werden kann (z.B. als Voraussetzung für Fördermaßnahmen, zum Nachweis von EE-Quoten oder für die Zertifizierung grüner Endprodukte). Unter welchen Bedingungen dieser Zuspruch erfolgt, ist Gegenstand intensiver politischer und regulatorischer Diskussionen und zu beobachten, z.B. bei der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) Anfang des Jahres 2021 und bei dem in Ausarbeitung befindlichen delegierten Rechtsakts im Rahmen der überarbeiteten Erneuerbare-Energien-

¹ z.B. EWI (2021), Luderer et al. (2021), Fraunhofer ISI et al. (2021).

Richtlinie (RED II) der europäischen Kommission.² Eine dabei wiederholt erwogene Bedingung für die Übertragung der Grüneigenschaft ist die bilanzielle und zeitliche Kopplung der Stromerzeugung einer EE-Anlage und der Wasserstoffproduktion eines Elektrolyseurs über eine Gleichzeitigkeitsregel.

Die Gleichzeitigkeitsregel betrifft in erster Linie Elektrolyseure, die an das öffentliche Stromnetz angeschlossen werden und darüber Strom beziehen (EWI et al., 2020). Sie soll sicherstellen, dass die durch den Elektrolyseur vom Stromnetz entnommene Strommenge tatsächlich von einer EE-Anlage erzeugt wurde. Die Gleichzeitigkeitsregel legt dafür fest, in welchem Zeitintervall EE-Stromerzeugung und Wasserstoffproduktion liegen müssen, um die Grüneigenschaft zu übertragen.³ Damit wird die Wasserstoffproduktion bilanziell mit der EE-Stromerzeugung und finanziell mit dem Großhandelsstrompreis verknüpft. Die Definition des Bilanzierungszeitraums hat erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit eines Elektrolyseurs.

Eine Untersuchung der Auswirkungen einer Gleichzeitigkeitsregel auf die Wirtschaftlichkeit eines Elektrolyseurs und die Implikationen für die Risikoabwägung eines Investors, sowie die Abschätzung der induzierten CO₂-Emissionen wurde kürzlich in dem EWI Working Paper „Simultaneity of green energy and hydrogen production: Analysing the dispatch of a grid-connected electrolyser“ von Wissenschaftlern des EWI veröffentlicht. Das Papier legt dar, inwieweit Profitabilität des Elektrolyseurs und Emissionsreduktion durch die Gleichzeitigkeitsregel beeinflusst werden. In diesem Policy Brief werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst und in den Kontext der aktuellen Regulierung und Gesetzgebung gesetzt.

Eine strenge Gleichzeitigkeit mindert Produktion und Gewinne

Die Untersuchung erfolgt mithilfe eines technisch-ökonomischen Optimierungsmodells, das die Einsatzentscheidungen eines Elektrolyseurs unter gegebenen Strompreisen und EE-Einspeisung berechnet. Dabei wird ein Elektrolyseur betrachtet, der bilanziell Strom von einer Winderzeugungsanlage bezieht.⁴ Um eine Bandbreite möglicher Wetter- und Preisszenarien abzubilden, wird mithilfe eines stochastischen Ansatzes eine Vielzahl von Realisierungen auf Basis historischer Daten des deutschen Stromsystems der Jahre 2015 - 2019 analysiert. Der Einsatz des Elektrolyseurs wird gegen einen festen Verkaufspreis für grünen Wasserstoffs optimiert,⁵ der sich durch den Elektrolyseur (z.B. seine Effizienz) in einen Break-Even-Preis am Strommarkt übersetzt. Dieser Preis definiert eine implizite Obergrenze für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage und bestimmt bis zu welchen Strompreisen die Produktion grünen Wasserstoffs

² Siehe EEG (2021) und EU (2018).

³ Zudem ist zu beachten, dass der zur Erzeugung von Wasserstoff benötigte Strom zusätzlich anfällt. Um eine Doppelzählung von EE-Strom zu vermeiden, ist daher ein Kriterium der Zusätzlichkeit des EE-Stroms in Diskussion, welches hier nicht näher erläutert wird. Für weitere Informationen dazu siehe z.B. Pototschnig (2021).

⁴ Das Kapazitätsverhältnis zwischen Windturbine und Elektrolyseur wird auf 2:1 fixiert.

⁵ In den Berechnungen wird ein Verkaufspreis für grünen Wasserstoff von 3 €/kg angenommen. Während derzeit kein Marktpreis für grünen Wasserstoff existiert, dient der angenommene Verkaufspreis als Referenzgröße, um relative Änderungen der Profitabilität des Elektrolyseurs durch die Anpassung der Gleichzeitigkeit zu untersuchen. Somit stehen vor allem die strukturellen Ergebnisse im Vordergrund.

wirtschaftlich ist. Wie ertragreich ein Jahr für den Betreiber eines Elektrolyseurs ist, hängt demnach vor allem von den variierenden Strompreisen ab.

Die Ergebnisse eines Referenzfall ohne Gleichzeitigsregel sind in Abbildung 1 dargestellt und weisen durchschnittliche Deckungsbeiträge für den Elektrolyseur von rund 40 €/kW mit erheblicher Schwankungsbreite auf. Diese Streuung ergibt sich aus der Bandbreite möglicher

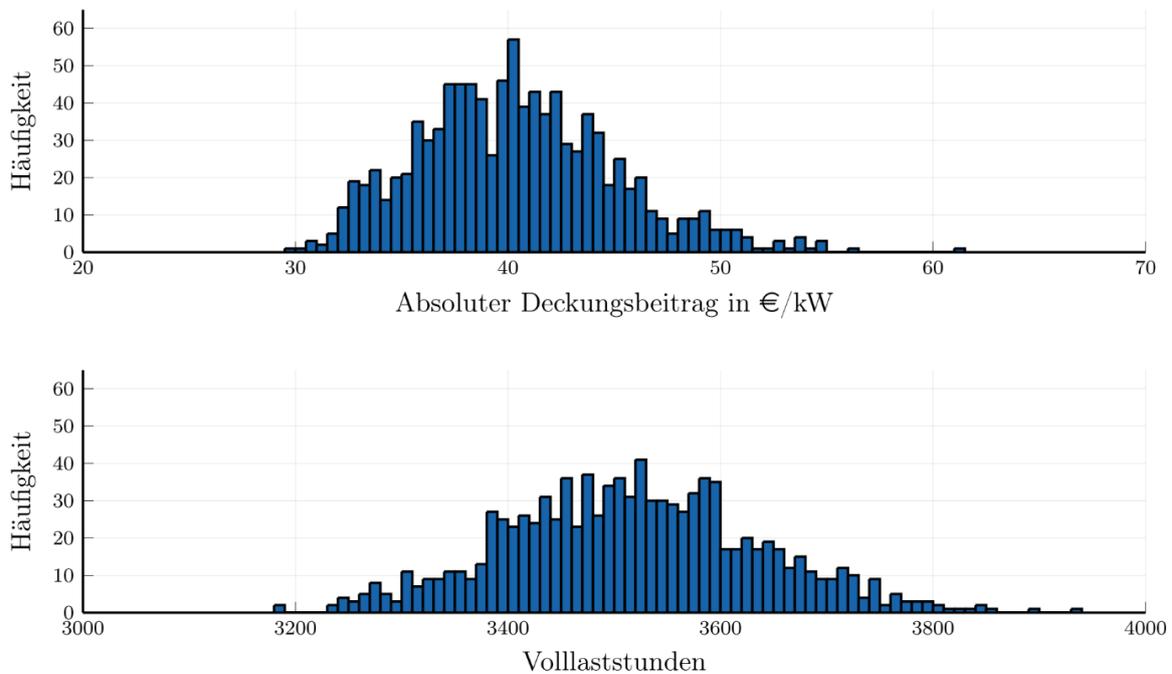


Abbildung 1: Absolute Deckungsbeiträge und Volllaststunden im Referenzfall ohne Gleichzeitigsregel

Quelle: Schlund et al. (2021)

Strompreise an den Kurzfristmärkten für Strom. Ebenso hängen die Volllaststunden von der Anzahl der Stunden mit Preisen unterhalb des Break-Even-Preises in Höhe von etwa 43 €/MWh ab.⁶ In der betrachteten Fallstudie sind dies im Mittel rund 3.500 Volllaststunden. Die Streuung der Ergebnisse spiegelt das finanzielle kurzfristige Risiko des Anlagenbetriebs wider. Für die möglichen Deckungsbeiträge ergibt sich eine Standardabweichung in Höhe von ± 5 €/kW und ± 11 Stunden bezüglich der Volllaststunden des Elektrolyseurs.

Die Einführung einer Gleichzeitigsregel schränkt den Betrieb eines Elektrolyseurs ein. Durch sie wird die zeitliche Bilanzierbarkeit der EE-Stromproduktion festgelegt und stellt somit einen virtuellen Speicher der Grünstromgemeinschaft dar. Der Elektrolyseur erwirbt die Grüneigenschaft in einem Zeitpunkt, in dem die EE-Anlage Strom produziert, verbraucht sie jedoch erst in einem späteren Zeitpunkt während der Produktion von Wasserstoff. Die Länge des Bilanzierungszeitraums definiert die Größe dieses Speichers. In der Fallstudie werden Zeiträume von einem Jahr, 12 Stunden, 8 Stunden, einer Stunde, sowie von 15 Minuten betrachtet, wobei bei 15 Minuten keine virtuelle Speicherung möglich ist. Im relativen Vergleich der Deckungsbeiträge und Volllaststunden zeigt sich in Abbildung 2, dass die Einführung einer Gleichzeitigkeit von einem Jahr die Deckungsbeiträge gegenüber dem Fall ohne Gleichzeitigkeit

⁶ Der Break-Even-Preis variiert mit dem Betriebszustand und mit der Effizienz des Elektrolyseurs im Teillastbetrieb.

nur geringfügig reduziert. Durch die Verschiebung der Grünstromerzeugung in Stunden mit niedrigen Strompreisen profitiert der Elektrolyseur maximal von der virtuellen Speicherbarkeit des EE-Stroms. Die Volllaststunden sinken hingegen um mehr als 20%, da sie bei jährlicher Gleichzeitigkeit durch die Volllaststunden der EE-Anlage eingeschränkt sind. Die im letzten Entwurf des delegierten Rechtsakts der RED II vorgesehene stündliche Gleichzeitigkeit führt zu einer Reduktion der Deckungsbeiträge von nahezu 30% gegenüber einem Fall ohne Gleichzeitigkeit und einer Minderung der Volllaststunden um rund die Hälfte. Im Fall mit einer Gleichzeitigkeit von 15 Minuten sinken die durchschnittlichen Deckungsbeiträge um 33% und die Volllaststunden mit 53% um mehr als die Hälfte gegenüber keiner Gleichzeitigkeit.

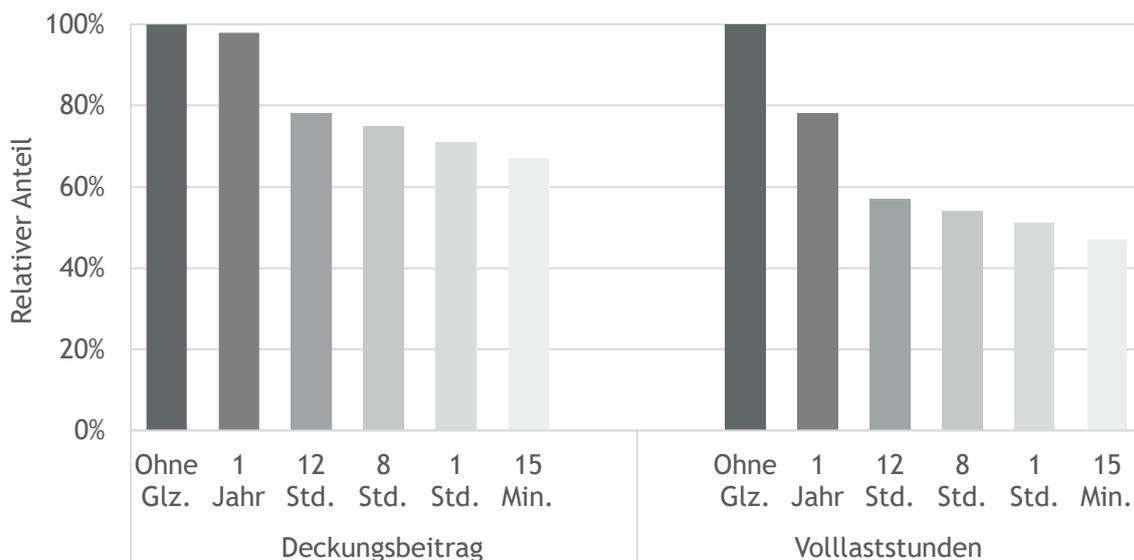


Abbildung 2: Relative Änderung der erwirtschafteten Deckungsbeiträge und der Volllaststunden unter verschiedenen Gleichzeitigkeitsvorgaben

Quelle: eigene Abbildung basierend auf Schlund et al. (2021)

Die Analyse zeigt zudem, dass das finanzielle Risiko des Elektrolyseurbetriebs mit strengerer Gleichzeitigkeitsregel zunimmt. Im Fall mit jährlicher Gleichzeitigkeit determinieren hauptsächlich die niedrigsten Strompreise des Jahres den möglichen Deckungsbeitrag, da der Elektrolyseur seine Produktion beliebig verschieben kann. Im Fall 15-minütiger Gleichzeitigkeit hingegen kann der Elektrolyseur seine Produktion nicht verschieben. Hier weist die Fallstudie insbesondere auf die Verfügbarkeit von Wind und dessen Auftreten in Stunden mit niedrigen Strompreisen als entscheidende Größe für die Wasserstoffproduktion hin. Da die wetterabhängige Windverfügbarkeit zwischen verschiedenen Jahren erheblich variieren kann, wird das finanzielle Risiko bei strenger Gleichzeitigkeit zusätzlich erhöht.

Eine strenge Gleichzeitigkeit reduziert die CO₂-Emissionsintensität des Wasserstoffs

Ein zentrales Ziel der Gleichzeitigkeitsregel ist es, zusätzliche CO₂-Emissionen im Stromsektor durch die erhöhte Stromnachfrage von Elektrolyseuren zu begrenzen. Im Rahmen der technisch-ökonomischen Modellierung werden deshalb auch die mit der Wasserstoffproduktion verbundenen Emissionen abgeschätzt. Grundsätzlich handelt es sich dabei nur um eine Annäherung, da in der Untersuchung kein gesamtes Energiesystem modelliert wird und die Zuordnung der Emissionen zum Verbraucher rein bilanziell erfolgt. Für die Wasserstoffproduktion wird eine Emissionsintensität berechnet, die sich aus zwei Bestandteilen zusammensetzt. Erstens ergibt der Stromverbrauch des Elektrolyseurs in einer Viertelstunde abzüglich der Stromerzeugung der EE-Anlage den vom Netz bezogenen Graustrom. Zweitens wird für diesen Graustrom ein Emissionsfaktor angesetzt, welcher in der Untersuchung auf einer vereinfachten Abschätzung basiert: Es wird der marginale Emissionsfaktor herangezogen, der sich aus der viertelstündlichen Merit Order des Strommarktes ergibt. Der Strompreis indiziert dabei, welches Kraftwerk in der jeweiligen Stunde marginal zur Deckung der Nachfrage notwendig ist und somit den Strompreis und den viertelstündlichen Emissionsfaktor bestimmt.⁷

In der Simulation bildet die 15-minütige Gleichzeitigkeit die untere Grenze, da sie per Annahme als emissionsfrei gewertet wird (siehe Abbildung 3). Die obere Grenze wird durch den Fall ohne Gleichzeitigkeitsregel definiert. Die Auswirkungen auf die Emissionsintensität des Wasserstoffs wird anhand der Veränderung gegenüber dem Fall ohne Gleichzeitigkeit bewertet. Es ist zu beobachten, dass eine Verschärfung der Gleichzeitigkeitsregel grundsätzlich die Emissionsintensität des Wasserstoffes senkt. In diesem Fall führt bereits eine Einführung der

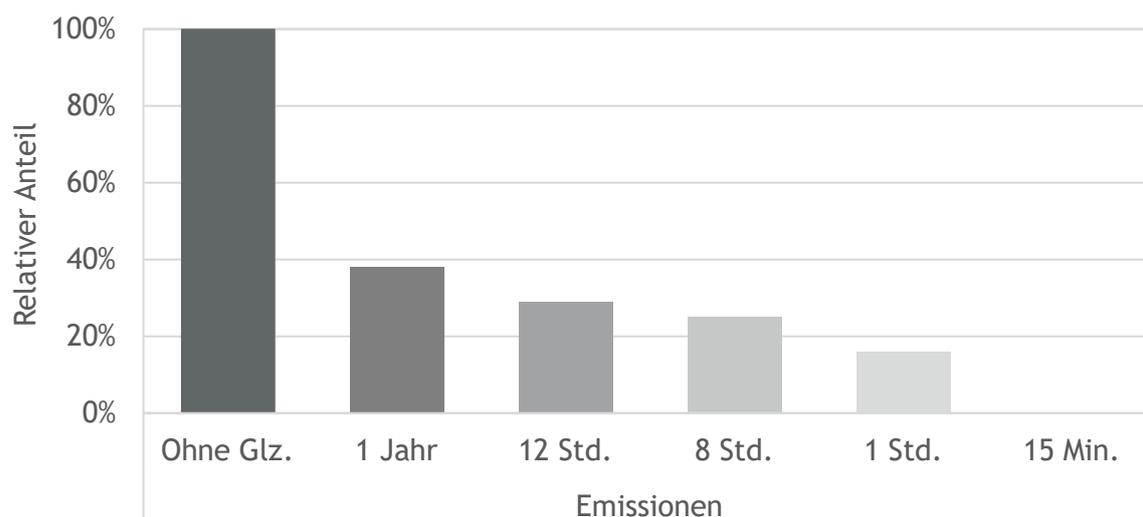


Abbildung 3: Relative Änderung der Emissionsintensität mit verschärfter Gleichzeitigkeit

Quelle: eigene Abbildung basierend auf Schlund et al. (2021)

⁷ Alternativ kann für die Berechnung der durchschnittliche Emissionsfaktor des deutschen Strommixes herangezogen werden. Ein Vergleich der Emissionsintensität von Wasserstoff auf Basis der beiden Emissionsfaktoren wird im zugehörigen Working Paper vorgenommen.

Regel mit einer Gleichzeitigkeit von einem Jahr zu einer Reduktion der Emissionsintensität um knapp 60%. Dies liegt insbesondere daran, dass der Elektrolyseur durch die Einführung der Regel bilanziell an die Winderzeugung gebunden ist, da ohne Gleichzeitigkeit sämtlicher Strombezug als grau zu bewerten ist.

Die relative Reduktion der Emissionen pro zusätzliche Länge des Bilanzierungszeitraums ist am größten bei strenger Gleichzeitigkeit. Wird die Gleichzeitigkeitsregel von 15 Minuten auf eine Stunde gelockert, so erhöht sich die Emissionsintensität um ca. 15 Prozentpunkte. Weitere 15% Emissionserhöhung entstehen jedoch bei einer Auflockerung auf 12 Stunden Gleichzeitigkeit. Der Emissionseffekt flacht demnach für weniger strenge Gleichzeitigkeit ab.

Implikationen für den regulatorischen Rahmen

Die Analyse zeigt das Spannungsfeld zwischen den Zielen eines langfristigen Wasserstoffmarkthochlaufs und der kurzfristigen Reduzierung von Emissionen im Stromsektor auf, die sich durch eine Gleichzeitigkeitsregel ergeben. Neben dem Wasserstoffverkaufspreis hat eine weniger strenge Gleichzeitigkeitsregel signifikante Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseuren. Die implizite Speicherung der Grünstromeigenschaft erhöht nicht nur den Deckungsbeitrag, sondern reduziert auch das aus der volatilen EE-Erzeugung resultierende Risiko. Eine strenge Gleichzeitigkeitsregel erfüllt das Ziel, die Emissionen zu begrenzen, jedoch auf Kosten verminderter Deckungsbeiträge und höherer Risikofaktoren. Zu beachten ist dabei die Rückwirkung der Emissionen auf den europäischen Emissionshandel (EU ETS). Die Emissionen im EU ETS sind auf ein Gesamtbudget limitiert und höhere Emissionen im Stromsektor durch die zusätzliche Nachfrage der Elektrolyseure würden demnach zunächst das noch verfügbare Budget reduzieren. In der Realität ist das Gesamtbudget durch die Marktstabilitätsreserve (MSR) jedoch dynamisch. Abhängig von der Menge überschüssiger CO₂-Zertifikate und den diskreten Schwellenwerten zur Löschung dieser Zertifikate, ist der endgültige Emissionseffekt auf Systemebene demnach nicht eindeutig zu identifizieren. Aufgrund der geringen absoluten Emissionsmengen im Stromsektor durch die Elektrolyseurnachfrage, kann davon ausgegangen werden, dass die Wirkung auf die MSR vernachlässigbar ist.

Aus Investitionssicht sind die Deckungsbeiträge im Referenzfall ohne Gleichzeitigkeitsregel zu niedrig. In der betrachteten Fallstudie stehen jährliche Fixkosten aus Betrieb und Investition von 119 €/kW einem Deckungsbeitrag von 40 €/kW gegenüber.⁸ Entsprechend verbleibt eine Finanzierungslücke von knapp 80 €/kW. Aus einer Verschärfung der Gleichzeitigkeitsregel auf 15 Minuten resultiert ein Deckungsbeitrag von rund 27 €/kW. Die Finanzierungslücke wächst auf 92 €/kW. Das Risiko aus der variierenden EE-Stromerzeugung, indiziert durch eine Standardabweichung von ± 5 €/kW des Deckungsbeitrags, fällt in Relation dazu niedrig aus. Die Reduzierung von Investitionskosten hat demnach vorerst Priorität gegenüber dem Senken des Risikos aus EE-Erzeugung.

⁸ Zu beachten ist, dass die absoluten Größen stark von den getroffenen Annahmen der Fallstudie abhängen. Das relative Verhältnis der Größen zueinander stellt aber den strukturellen Zusammenhang dar, der somit auch auf andere Fälle übertragbar ist.

Aus Regulierungssicht stellt sich die Frage, welche Position zwischen den Zielen der Investitionsanreize zur Ermöglichung eines Wasserstoffmarkthochlaufs und der Begrenzung von CO₂-Emissionen mithilfe der Gleichzeitigkeitsregel eingestellt werden soll. Dabei kann eine lockere bzw. der Verzicht auf eine Gleichzeitigkeitsregel als Investitionsanreiz verstanden werden. Durch die Speicherung der Grüneigenschaft wird dem Elektrolyseurinvestment zusätzlicher Wert beigemessen, jedoch auf Kosten zusätzlicher Emissionen im Stromsektor. Es gilt zu beachten, dass eine Gleichzeitigkeitsregel immer nur in einem sich in Transformation befindlichen System Bestand hat. In einem Energiesystem mit sehr hohem Anteil an EE-Erzeugung verblasen die Emissionseffekte und somit deren Spannungsfeld mit Investitionen.

In jüngster Vergangenheit wurde eine Gleichzeitigkeitsregel im Rahmen von zwei Regulierungsvorhaben diskutiert: zum einen im Rahmen der Befreiung von Elektrolyseuren zur Zahlung der EEG-Umlage in Deutschland und zum anderen während der Erarbeitung des delegierten Rechtsakts zur Definition erneuerbarer Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs in der RED II der europäischen Kommission. Bei der EEG-Befreiung wurde auf eine strenge Gleichzeitigkeitsregel verzichtet. Herkunftsnachweise ohne Zeitstempel werden als ausreichend angesehen, um die Grüneigenschaft zu zertifizieren. Stattdessen sieht die Verordnung eine Obergrenze der Volllaststunden des Elektrolyseurs vor, um so die Zunahme von Stromnachfrage in Stunden mit hohem Anteil fossiler Erzeugung zu begrenzen. Demnach gilt nur solcher Wasserstoff als grün, der innerhalb der ersten 5.000 Volllaststunden erzeugt wird (EEG, 2021). Der sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt in Arbeit befindliche delegierte Rechtsakt der RED II sieht im letzten Entwurf eine höhere Gleichzeitigkeit von einer Stunde ohne explizite Begrenzung der Volllaststunden vor. Die Definition der Gleichzeitigkeitsregel stellt eine Abwägung des Ziels kurzfristiger Emissionsminderung und des Ziels eines langfristigen Hochlaufs eines Wasserstoffmarktes dar.

Fazit

In der aktuellen politischen und wissenschaftlichen Diskussion wird eine Gleichzeitigkeitsregel zwischen EE-Stromerzeugung und der Produktion grünen Wasserstoffs erwogen, um die Emissionsintensität des Energieträgers während der Produktion zu reduzieren. Die Untersuchung des EWI zeigt, dass eine strenge Gleichzeitigkeitsregel Deckungsbeiträge der Wasserstoffproduktion und die Produktionsmengen signifikant reduziert, sowie das zu tragende finanzielle Risiko durch volatile EE-Erzeugung erhöht. Eine weniger strenge oder der Verzicht auf eine Gleichzeitigkeitsregel hingegen bedeutet, dass die Wasserstoffproduktion durch den Einsatz fossiler Kraftwerke im Stromsektor deutlich emissionsintensiver wird.

Aufgrund der beschriebenen Effekte kann der Verzicht auf eine Gleichzeitigkeitsregel kurzfristig als Instrument zur Förderung des Markthochlaufs von Wasserstoff verstanden werden. Die Abwägung der Politik besteht im Wesentlichen darin, das Ziel kurzfristiger Emissionsminderung im Stromsektor und des langfristigen Markthochlaufs von Wasserstoff auszubalancieren. Langfristig wird eine Gleichzeitigkeitsregel aufgrund hoher Anteile regenerativer Stromerzeugung im Versorgungsmix voraussichtlich keinen Bestand haben.

Literaturverzeichnis

EEG, 2021: Verordnung zur Umsetzung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes 2021 und zur Änderung weiterer energierechtlicher Vorschriften.

EU, 2018: Richtlinie (EU) 2018/2001 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union.

EWI et al., 2020: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) & Institut für Elektrische Anlagen und Netze, Digitalisierung und Energiewirtschaft RWTH Aachen (IAEW) (2020). Einführung von Power-to-Gas in Deutschland. Studie im Auftrag des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfachs e.V. (DVGW).

EWI, 2021: Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI) (2021). dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Klimaneutralität 2045 - Transformation der Verbrauchssektoren und des Energiesystems. Herausgegeben von der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena).

Fraunhofer ISI et al., 2021: Fraunhofer ISI, consentec, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu) & TU Berlin (2021). Langfristszenarien 3 - Wissenschaftliche Analysen zur Dekarbonisierung Deutschlands.

Luderer et al., 2021: Gunnar Luderer, Christoph Kost & Dominika Sörgel (2021). Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich, (Ariadne-Report), Potsdam: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 359 p.

Pototschnig, 2021: Alberto Pototschnig (2021). Renewable hydrogen and the “additionality” requirement: why making it more complex than is needed?, Policy Brief 2021/36, Florence School of Regulation (FSR), Robert Schuman Centre (RSC).

Schlund et al., 2021: David Schlund & Philipp Theile (2021). Simultaneity of green energy and hydrogen production: Analysing the dispatch of a grid-connected electrolyser. EWI Working Paper no. 2021-10. Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI)