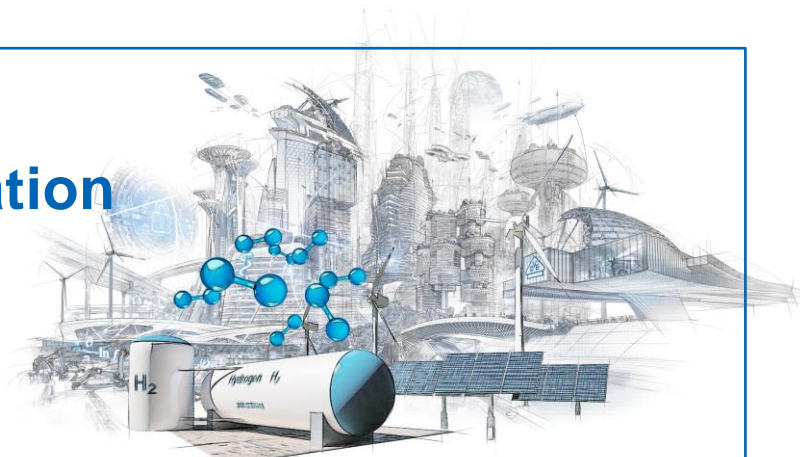


## Netzdienliche Integration von Elektrolyseuren



### Flexibilisierung des Energiesystems durch den Einsatz von Elektrolyseuren

Das Ziel der deutschen Bundesregierung, die Klimaneutralität bis 2045 zu erreichen, erfordert in allen Bereichen unserer Gesellschaft einen Umbau der bestehenden Systeme, besonders im Energiesektor. Es geht darum, den Energiebedarf Deutschlands über Effizienzsteigerung zu verringern und Treibhausgasemissionen nahezu komplett zu reduzieren sowie weiterhin die Versorgungssicherheit zu garantieren. Der Stromsektor nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Über die zunehmende Elektrifizierung vergrößert sich sein Einflussbereich und mittels Ausbau der Erneuerbaren Energien verringern sich seine Emissionen. Darüber hinaus werden über den Stromsektor künftig auch die schwer zu elektrifizierenden Bereiche indirekt, d.h. über „Power-to-Gas“-Verfahren und deren Folgeprodukte, mit grüner Energie und Grundstoffen versorgt. Dies erfordert, dass die an vielen Stellen voneinander unabhängigen Sektoren Strom und Gas über Wasserstoff stärker als bisher vernetzt werden.

Neben kontinuierlichen Energieeinsparungsmaßnahmen wird die effiziente Nutzung und Speicherung von Energie aus Erneuerbaren ein wichtiger Baustein für den Umbau sein. Die Abregelung von fluktuierenden Erneuerbaren aufgrund von Stromnetzengpässen ist nach wie vor ein viel diskutiertes Thema, das an vielen Stellen bereits adressiert und mit Wasserstoff in Verbindung gebracht wird (BMWK, 2022; Art. 4 Abs. 4 European Commission, 2022; Netzentwicklungsplan Strom, 2022). Die Erhöhung der Flexibilität im Stromnetz kann dafür eine Lösung sein. Elektrolyseure können an dieser Stelle, sowie bei anderen Systemdienstleistungen, als flexible Stromabnehmer einen solchen Beitrag leisten, indem sie die Kopplung zwischen den Strommärkten und dem Gas-Markt übernehmen und so die Flexibilität im Stromnetz gewährleisten. Allerdings muss die Einbindung und der Betrieb von Elektrolyseuren in den elektrischen Netzen nicht nur aus technischen Gesichtspunkten bewertet werden, sondern auch aus wirtschaftlichen.

Dieses Impulspapier soll die Möglichkeiten und Herausforderungen der Integration von Elektrolyseuren durch Flexibilität aufzeigen und ihre Relevanz einordnen. Ziel des Impulses ist es, einen Gedankenanstoß für weitere Diskussionen zu diesem Themenkomplex anzuregen, um künftig Einigkeit über Rahmenbedingungen erzielen zu können. Es kann darüber hinaus für Betreibende von Elektrolyseuren als Anregung für zusätzliche Geschäftsmodelle genutzt werden, um abzuschätzen, wie diese sich künftig entwickeln könnten.

### Abstract

Im Stromnetz gibt es unterschiedliche Optionen, die Flexibilität zu erhöhen. Zu diesen Optionen gibt es aktuell verschiedene Definitionsmöglichkeiten. Dieses Impulspapier stellt eine Definitionsmöglichkeit für den flexiblen Einsatz von Elektrolyseuren vor, welche die Sektoren Strom und Gas enger miteinander koppelt, und eine optimale Gesamtsystemintegration anstrebt. Das Stromnetz hat darüber hinaus verschiedene Anforderungen an einen flexiblen Stromverbrauch. Diese Anforderungen sollten bei den technologischen Möglichkeiten von Elektrolyseuren berücksichtigt werden. Dafür muss ein Elektrolyseprojekt hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Lebensdauer und Gesamtsystemintegration auf den optimalen Betriebspunkt ausgelegt werden. Für den gesamtsystemdienlichen Ansatz soll die flexible Betriebsweise der Elektrolyse als zusätzliche Einnahmequelle dienen können.

## Wie lauten die Definitionen rund um Flexibilitätsnutzung?

Der Umbau des Energiesystems auf Erneuerbare Energien erfordert neue Betriebsweisen aller Energieanlagen. Damit nicht ungleiche Zustände in einem Zielsystem miteinander verglichen werden, ist es wichtig, dass es einheitliche Definitionen bzw. ein einheitliches Verständnis von Begriffen in der Flexibilitätsnutzung gibt. Aktuell lassen diese noch Interpretationsspielraum zu (Schulze et al., o. J.). Das zeigte sich auch bei der Erstellung dieses Papiers mit den unterschiedlichen beteiligten Personen.<sup>1</sup> Im Folgenden sind die Begriffe nach einem system- bzw. sektorenübergreifenden Ansatz definiert, der aktuell nicht vollumfänglich der Praxis entspricht und als Impuls für Diskussion verstanden werden soll.

### **Netzverträglichkeit:**

Alle an das öffentliche Stromnetz angeschlossenen Anlagen müssen netzverträglich agieren, demnach keine Störungen verursachen und somit den Betrieb des Netzes nicht gefährden. Die derzeitigen Anforderungen werden in den Technischen Anschlussregeln (TAR) für alle vier Spannungsebenen – Nieder-, Mittel-, Hoch- und Höchstspannung – definiert (§19 EnWG, 2005; VDE FNN, 2022). Diese sind an die Bedingungen der jeweiligen Netzebene geknüpft.<sup>2</sup> Netzverträglichkeit ist demnach die Grundvoraussetzung für den Anschluss einer Anlage an die Stromnetze. Hierbei geht darum, die Einhaltung elektrischer Eigenschaften und das richtlinienkonforme Verhalten eines geeigneten Netzkopplungspunkts festzustellen und die Erfüllung der technischen Anschlussbedingungen zu prüfen (z.B. harmonische Rückkopplung, Wirk- und Blindleistung, Interaktion der Leistungselektronik der Elektrolyse).

### **Netzdienlichkeit:**

Anlagen, die dazu beitragen Netzengpässe zu beheben und langfristig den Netzausbaubedarf zu reduzieren oder die Netzbetriebsführung zu optimieren, agieren netzdienlich (Schulze et al., 2021). Die Netzbetreiber können die Netzdienlichkeit durch die Steuerung der Anlagen sicherstellen, indem je nach Situation im Stromnetz unter Einbezug der Spannungsebenen gehandelt wird. In der Folge können die Netzausbau- und -Betriebskosten verringert werden (Schulze et al., 2021, S. 5). Diese betrifft vor allem die Übertragungsnetzbetreiber, die die Systemverantwortung für das Elektrizitätsversorgungssystem tragen (§13 EnWG, 2005). Teils gibt es für netzdienliches Verhalten einen Markt, in dem sich Netzbetreiber und Anlagenbetreiber finden können (z.B. Regelleistungsmarkt), teils gibt es jedoch keine marktlichen sondern administrative Beschaffungslösungen (EnWG, 2005).

### **Systemverträglichkeit:**

Analog zur Netzverträglichkeit sollten Anlagen, welche mit mehreren Systemen bzw. Sektoren (bspw. Strom, Wärme, Gas) interagieren, den Anforderungen aller angebotenen Systeme gerecht werden. Dieser Ansatz über Systemgrenzen hinaus ist derzeit nicht gängige Praxis. Dies wäre für den Elektrolyseur ausschlaggebend, denn seine Wasserstoffeinspeisung darf bspw. die Kapazitätsgrenzen des angeschlossenen Gasnetzes nicht übersteigen. Erfüllt er darüber hinaus gleichzeitig die Anforderungen eines stromnetzverträglichen Betriebs, ist der Elektrolyseur nach der hier geschilderten Definition systemverträglich.

### **Systemdienlichkeit:**

Anlagen, die sich system- bzw. sektorübergreifend netzdienlich verhalten und darüber hinaus Marktakteure einbeziehen, sind nach der Definition des Impulses systemdienlich. Sie agieren und adressieren damit eine sogenannte „Gesamtsystemdienlichkeit“. Beispielsweise kann systemdienliche Wasserstoffproduktion neben dem Angebot von Stromnetzdienstleistungen mithilfe einer Wasserstoffeinspeisung aktiv den Brennwert des Gasmixes im Gasnetz nach Bedarf optimieren. Jedoch können auch Verteilnetzbetreiber

---

<sup>1</sup> Neben den hier verwendeten Definitionen zu den Begriffen netzdienlich und systemdienlich, werden die Begriffe netzorientiert und systemorientiert von der VDE ETG Taskforce „Flexibilisierung des Energiesystems“ verwendet. Beide Begriffe beziehen sich auf das Stromsystem und nicht auf eine gesamtsystemdienliche Sichtweise, wie hier definiert. Allerdings wird in diesen Definitionen oftmals die Unterscheidung zwischen Ortsspezifika und Gebotszonen hinzugezogen.

<sup>2</sup> Hier sind Informationen über die TAR für die Mittelspannungsebene zu finden:

<https://www.vde-verlag.de/standards/0100495/vde-ar-n-4110-anwendungsregel-2018-11.html>

<https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/tar-mittelspannung-vde-ar-n-4110>

systemdienliche Fahrweisen von Anlagen initiieren: Betriebsführung, Frequenzhaltung, Spannungshaltung und Versorgungswiederaufbau.

**Energiewendedienlichkeit:**

Der energiewendedienliche Betrieb einer Anlage geht über den netzdienlichen und den systemdienlichen Betrieb hinaus, indem alle Systeme und Sektoren in der Transformation hin zu einer einhundertprozentigen Versorgung mit erneuerbaren Energien optimiert werden. Daher wird in diesem Verständnis die bestmögliche physikalische und Markt kompatible Integration der fluktuierenden Erneuerbaren Energien (fEE) wie Wind- und Solarenergie berücksichtigt (Schalling et al., 2022).<sup>3</sup>

Abbildung 1 verdeutlicht den Zusammenhang der definierten Begriffe, deren jeweiligen Fokus bzw. Zielsetzung sowie die beteiligten Akteur\*innen. Aktuell ist dies jedoch nicht Realität. Dies kann ein mögliches Zielsystem sein, um die Integration von fEE optimal zu gestalten.

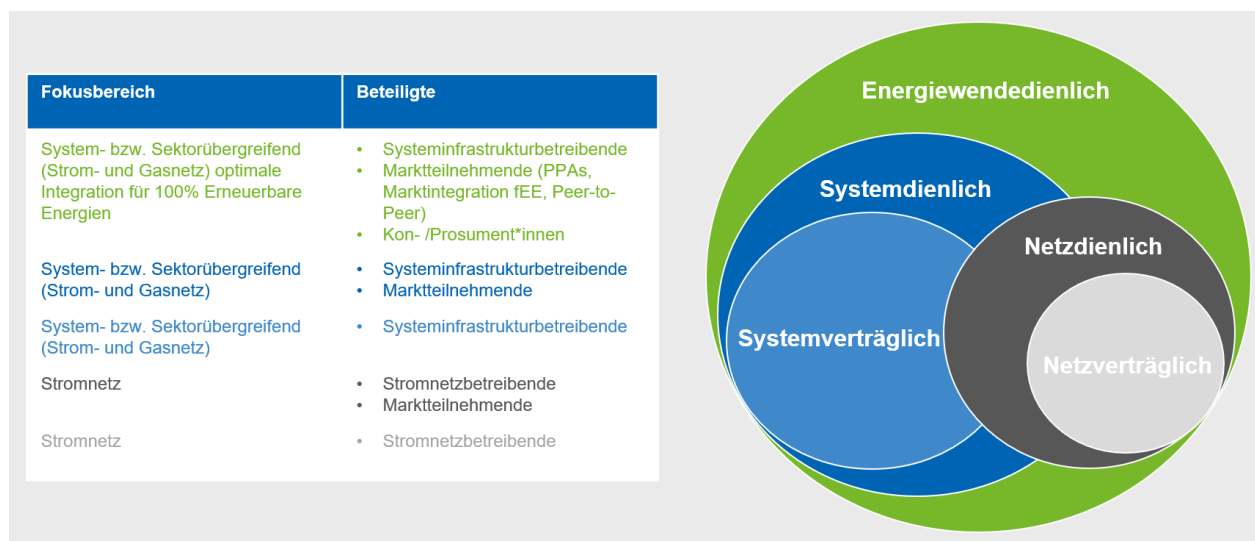


Abbildung 1: Übersicht über die definierten Begriffe, deren jeweiliger Fokus und ihre Zusammenhänge in einem möglichen Zielsystem sowie die beteiligten Akteur\*innen. (Eigene Darstellung nach Green Planet Energy eG)

**Welche Elektrolysetechnologien eignen sich für einen flexiblen Betrieb?**

Die drei aktuell gängigsten Elektrolyseverfahren eignen sich unterschiedlich gut für den flexiblen Betrieb. Derzeit setzt sich vor allem die Protonenaustauschmembran (PEM-) Elektrolyse in der breiten Anwendung durch (Hydrogen Europe, 2022). Sie wird als Basis für dieses Impulspapier herangezogen. Die anderen beiden Technologien sollen dennoch nicht außer Acht gelassen werden, deshalb werden sie ebenfalls kurz beschrieben. Generell ist bei der Nutzung und Weiterentwicklung aller Elektrolysetechnologien darauf zu achten, dass diese die notwendige Flexibilität bieten, um den Anforderungen des heutigen und zukünftigen Energiesystems gerecht werden zu können.

Die **alkalischen Wasserelektrolyseverfahren** (mittels Diaphragma = AEL oder Membran = AEMEL) zählen zu den ältesten und etabliertesten Elektrolyseverfahren mit hoher Langlebigkeit, die bisherigen Modelle sind jedoch in vielen Fällen weniger gut für Lastwechsel im Sekundenbereich oder längere Stillstandzeiten im intermittierenden Betrieb geeignet. Dies erschwert aus technologischen Gründen bisher eine hoch-flexible Fahrweise. Es ist wahrscheinlich, dass diese Technologie in den kommenden Jahren weitere Innovationen erfahren wird. Die Weiterentwicklungen zur Anionenaustauschmembran-

<sup>3</sup> Das Ziel der Energiewendedienlichkeit verfolgt einen holistischen Ansatz, der neben der Netz- und Systemdienlichkeit eine physische sowie marktliche Integration der fEE in ein effizientes Energiesystem optimiert. Das übergeordnete Ziel ist dabei die Unterstützung des Energiesystems hin zu 100 % Erneuerbaren. Darüber hinaus fördern energiewendedienliche Ansätze u.a. die lokale Verankerung (z.B. durch partizipative Gesellschafterformen oder stärkere Kopplung mit lokaler erneuerbarer Energieerzeugung) als auch die systemische Einbindung der Produkte Wasserstoff, Sauerstoff und Abwärme.

Technologie (AEMEL), mit neuartiger Membrantechnologie ist ein Beispiel für die Entwicklung hin zu flexibleren Geräten.

Die flexible Einbindung ist bei der **Hochtemperaturelektrolyse** (HTEL oder SOEC für Solid-Oxide-Electrolyser-Cell) am schwierigsten. Diese Elektrolyseart arbeitet mit einer keramischen Membran, deren Betrieb meist Temperaturen von 500°C bis 850°C erfordert. (AEL und PEM arbeiten bei 40°C bis 80°C.) Dadurch benötigt die Technologie bei Stillstand längere Anlaufphasen, um ihre Leistung hochzufahren. Mittelfristig möchte die Forschung jedoch auch hier die Flexibilität in Kombination mit unterschiedlichen Anwendungsszenarien untersuchen, um die Kompatibilität dieser Technologie zu erhöhen (Projekträger Jülich (PTJ), 2022, S. 11 f). Interessant ist das große Potenzial für hohe Wirkungsgrade und die Möglichkeit, neben Wasserstoff auch andere Produkte wie Synthesegas direkt zu erzeugen.

Die Technologie der **PEM-Elektrolyseure** ist noch vergleichsweise jung, kann aber auf Basis der technischen Parameter besser mit Teillastbetrieb und Überlastbetrieb umgehen.<sup>4</sup> Darüber hinaus weist sie eine schnelle Leistungsänderungsfähigkeit auf. Diese Vorteile sind hauptsächlich auf die Membraneigenschaften, insbesondere der Differenzdruckstabilität und die einfache Peripherie zurückzuführen. Sie ist bei Bedarf aus dem vorgewärmten Zustand in wenigen Sekunden einsatzbereit und erlaubt im Vergleich zur AEL noch höhere Lastgradienten. Allerdings nimmt bei dynamischen Fahrweisen die Degradation der teuren Katalysatoren zu und damit die Lebensdauer ab. Es besteht jedoch noch viel Entwicklungspotenzial, um PEM-Elektrolyseure in Hinblick auf Lebensdauer bei dynamischem Betrieb zu optimieren und Anschaffungskosten weiter zu verringern (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), 2020).

*Tabelle 1 Übersicht der Elektrolysearten und ihre Passform für einige Flexibilitätsmärkte (Eigene Darstellung nach(ENTSO-E AISBL, 2022))*

Elektrolyse-technologie	Reaktionszeit (Kaltstart) <sup>5</sup>	Frequency Containment Reserve (FCR) <small>Volle Angebotsleistung: 30 sec Min. Größe: 1 MW Bereitstellung: 4 h</small>	Automatic Frequency Restoration Reserve (aFRR) <small>Volle Angebotsleistung: 5 min Min. Größe: 1 MW Bereitstellung: 15 min</small>	Manual Frequency Restoration Reserve (mFRR) <small>Volle Angebotsleistung: 12,5 Min Min. Größe: 1 MW Bereitstellung: 15 min</small>
AEL	1 min – 10 Min	Ja – mit Einschränkungen	Ja – mit Einschränkungen	Ja
PEM	1 sec – 5 Min	Ja – mit Einschränkungen	Ja	Ja
HTEL	<60 Min	Nein	Nein	Nein

### Welche Rolle spielt die flexible Einbindung von Elektrolyseuren?

Fluktuierende Erneuerbare Energien (fEE) werden im großen Maß dezentral gebaut und in die Stromnetze eingebunden. Um die installierte Leistung der fEE zu integrieren, muss das Stromnetz entsprechend ausgebaut werden. Wird ein Elektrolyseur mit netzdienlicher Fahrweise im Stromnetz an Orten mit substanziellen Überschüssen an erneuerbaren Energien eingebunden, kann dies dazu beitragen, dass die Kosten des notwendigen Stromnetzausbaus reduziert werden können. Denn Strom aus Erneuerbaren, der nicht in das Stromnetz integriert werden kann, wäre über die elektrolytische Umwandlung in Wasserstoff nutzbar. Diese netzdienliche Betriebsweise erhöht somit die gesamtsystemische Nutzung der EE-Anlagen und vermeidet eine Überlastung des Stromnetzes.

Ein weiterer Faktor ist, dass der Stromverbrauch oft nicht mit den fEE zusammenpasst. Stromerzeugung und -verbrauch müssen jedoch zu jedem Zeitpunkt im Einklang sein. Historisch betrachtet konnte sich die

<sup>4</sup> Teilweise befindet sich genau diese Betriebsweise jedoch noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium.

<sup>5</sup> Es soll darauf hingewiesen werden, dass Definitionen bzw. Annahmen zu Kaltstartzeiten in der Literatur stark voneinander abweichen. (ENTSO-E AISBL, 2022, S. 10)

fossile Stromerzeugung größtenteils nach dem Verbrauch richten. Durch die Erzeugung mit fEE muss sich nun der Verbrauch so weit wie möglich nach den Erzeugern richten. Stromspeicher und flexibel betriebene Elektrolyseure können diese Flexibilitätslücke mitschließen bzw. Überschüsse an erneuerbarer Energie aufnehmen.<sup>6</sup> Zukünftig gewinnen Elektrolyseure im Stromsystem dadurch an Bedeutung, um insbesondere marktbedingte aber auch netzbedingte Überschüsse erneuerbarer Erzeugung aufzunehmen. Heute werden jährlich etwa fünf bis sieben Terawattstunden Strom aus fEE im Rahmen des Netzengpassmanagements abgeregelt (Merten et al., 2020; Schalling et al., 2022). Allerdings finden diese Abregelungen oftmals lokal und somit über viele Standorte verteilt statt. Je nach Zukunftsszenario könnte die Menge an Überschüssen laut Merten et al. bis zum Jahr 2030 enorm ansteigen. Ein Elektrolyseur am Ort des erneuerbaren Überschusses kann hier mit einer flexiblen Fahrweise dafür sorgen, dass die Nutzung der fEE-Anlagen steigt.

Da Elektrolyseure zusätzliche Stromverbraucher im Stromsystem sind, ist neben dem Standort der Elektrolyse ebenfalls die Betriebsweise ein entscheidender Faktor darüber, wie bzw. ob das lokale Stromnetz zusätzlich ausgebaut werden muss. Wird ein Elektrolyseur als starre Last betrieben, um die Volllaststunden zu maximieren, damit er wirtschaftlich ist, kann auch dies dazu führen, dass das lokale Stromnetz stärker ausgebaut werden muss. (Netzentwicklungsplan Strom, 2022; Schalling et al., 2022)

Neben der Netzdienlichkeit sollten im Sinne der Betrachtung des Gesamtsystems weitere Faktoren zur Abwägung zwischen Netz- und Elektrolyseausbau einbezogen werden. Unter anderem kann Netzausbau durch die Umwandlungsverluste der Elektrolyse im Vergleich effizienter sein. Darüber hinaus stellt ein nicht flexibel betriebener Elektrolyseur eine weitere Last im lokalen Stromnetz dar, welche mit elektrischer Energie versorgt werden muss und das Netz zusätzlich belasten kann. Durch die höhere Grundlast kann dies zu höheren Emissionen im Stromnetz führen.

Flexibles Verhalten der Elektrolyse kann also mit dazu beitragen, den Ausbau der fEE und Speichertechnologien in ein ausgewogenes Verhältnis zu bringen. Energiewendedenliches Verhalten würde darüber hinaus System- bzw. Sektorenübergreifend physikalisch und marktlich für optimale Abstimmung sorgen.

## Welche Chancen und Risiken ergeben sich für Elektrolyse-Betreibende aus einer flexiblen Fahrweise?

Die Wirtschaftlichkeit ist eine wichtige Anforderung des Elektrolyse-Betreibenden an die flexible Fahrweise. Die Anzahl der Volllaststunden und die damit einhergehenden Strombezugskosten sowie Produktionsmenge an Wasserstoff sind neben dem Absatzpreis für Wasserstoff maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit. Aufgrund der aktuell hohen Technologiekosten sinken die spezifischen Wasserstoffgestehungskosten mit der Anzahl der Betriebsstunden. Im Falle höherer Betriebsstunden können die Wasserstoffgestehungskosten wiederum aufgrund des verstärkten Strombezugs in Hochpreisstunden ansteigen. Wie bereits im Abschnitt über die verschiedenen Elektrolysetechnologien beschrieben, hat die Betriebsweise zudem Einfluss auf die Lebensdauer des Elektrolyseurs. Dies kann dazu führen, dass z.B. Teile ersetzt werden müssen oder die Effizienz sinkt. In der praktischen Anwendung gibt es derzeit noch nicht viele Daten, um die Langzeiteffekte einer flexiblen Fahrweise realitätsnah beschreiben zu können. (Papakonstantinou et al., 2020; Van Pham et al., 2021)

Die Studie des Reiner Lemoine Instituts (RLI) kommt zu dem Schluss, dass „[...] ein wirtschaftlicher Betrieb von Elektrolyseuren allein mit Energieüberschüssen derzeit noch nicht möglich ist“. Unter aktuellen Rahmenbedingungen kann erwartet werden, dass flexible Elektrolyseure bis zu einer Größe von etwa fünf Megawatt ab 2030 wirtschaftlich betrieben werden können.<sup>7</sup> In Ausnahmefällen kann bei einer lokalen

---

<sup>6</sup> Elektrolyseure benötigen entsprechend passende Gasspeicher oder Gasnetzanschlüsse, um diese Flexibilität gewährleisten zu können.

<sup>7</sup> Für die Abschätzung der Wirtschaftlichkeit sind Investitionskosten und Strombezugpreise sowie Standortfaktoren wichtig. Vor diesem Hintergrund ist es nicht möglich zu sagen, wie viele Betriebsstunden pauschal nötig sind, um wirtschaftlich zu sein. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit Zunahme der fEE auch die Volllaststunden der Elektrolyseure steigen (Netzentwicklungsplan Strom, 2022).



hohen installierten Leistung fEE und geringer Netzkapazität auch ein netzdienlicher Elektrolyseur mit 14 Megawatt wirtschaftlich betrieben werden (Schalling et al., 2022). Vor allem in Netzgebieten mit hohem Anteil fEE ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass eine netzdienliche Betriebsweise wirtschaftlich sein kann. Ist ein Netzgebiet lastdominiert, wird eine netzdienliche Fahrweise aufgrund von fehlenden Energieüberschüssen weniger wahrscheinlich.

Große Elektrolyse-Anlagen haben heute den Vorteil durch Skalierungseffekte Einsparungen in den Investitions- und Betriebskosten zu erzielen. Dieser Vorteil kann sich in Zukunft reduzieren, wenn die spezifischen Investitionskosten, wie erwartet, mit höheren Produktionszahlen sinken. Das heißt, dass künftig auch Elektrolyse-Anlagen im einstelligen Megawatt-Bereich attraktiv sein können und somit zur dezentralen Versorgung beitragen können. Doch nicht nur die Preisentwicklung von Elektrolyseuren, sondern auch die Weiterentwicklung des Marktdesigns bzw. finanzielle Anreize sind ausschlaggebend dafür, welche Rolle der Elektrolyseur im Gesamtsystem spielen wird (Müller, 2022). So könnten wirtschaftliche Anreize für Elektrolyseure jeglicher Größen zu einem netzdienlichen Betrieb anregen. Dies würde bedeuten, dass der flexible Betrieb von großen Elektrolyseuren ebenfalls wirtschaftlich umsetzbar wäre. Insgesamt sollte sich unser Stromsystem jedoch stärker auf die Vergütung von Flexibilisierung ausrichten, um netzdienliches Verhalten im Stromnetz anzuregen.

Darüber hinaus richten Elektrolyse-Betreibende die Produkte auf die Abnehmenden aus. Es ist beispielsweise wichtig, vorab zu ergründen, wie lokal mit flexibler Wasserstoff-, Wärme- und Sauerstofflieferung umzugehen ist. Passt die Abnahme nicht zur Betriebsweise des Elektrolyseurs, kann dies dazu führen, dass die flexible Fahrweise nicht bevorzugt wird. Pufferspeicher (lokaler Wasserstoffspeicher bzw. Wasserstoffnetz) können dazu beitragen, diese Problematik zu lindern.

Im Idealfall sind im Elektrolyseprojekt sämtliche Standortfaktoren der Netzverknüpfungspunkte optimal auf die Größe des Elektrolyseurs abgestimmt und passen zu einer flexiblen Betriebsweise, die sicherstellt, dass die Anlage systemdienlich agiert. Es kommt also auf die Standortbedingungen und damit einhergehend den Business-Case sowie die Betriebsführung an. Voraussetzung ist, dass die Regulatorik zur Betriebsführung und zum Absatzmodell passen.

## **Mit Hilfe welcher Märkte lassen sich Elektrolyseure flexibel und wirtschaftlich betreiben?**

Grundsätzlich ist für die Wirtschaftlichkeit eines Elektrolyseurs der Handelspreis von grünem Wasserstoff und damit einhergehend sowohl die Strombezugskosten als auch die Preisentwicklung für Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO<sub>2</sub>) wichtig (Netzentwicklungsplan Strom, 2022; Schalling et al., 2022). Wie im Abschnitt zuvor bereits erwähnt, regen heute vor allem die hohen Fixkosten dazu an hohe Volllaststunden anzustreben, um den Elektrolyseur wirtschaftlich zu betreiben. Dieses Impulspapier regt dazu an, die flexible Fahrweise des Elektrolyseurs verstärkt in Betracht zu ziehen. Schließlich lassen sich Elektrolyseure bereits heute vor allem mit Hilfe von drei Märkten flexibel anbinden: Day-Ahead-Markt, Intraday-Markt (jeweils Spotmärkte) und Regenergiemarkt.

Die Strompreissignale der Spotmärkte können aufgrund der zunehmend höheren zeitlichen Korrelation von Strompreisen und EE-Anteilen im Stromnetz sowie damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen des Strommixes dazu genutzt werden, den Betrieb des Elektrolyseurs zu steuern. Dabei sind niedrige Preise zunehmend ein Indiz für einen relativ hohen EE-Anteil und relativ geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen im Strommix.

Neben der Teilnahme an Spotmärkten können Elektrolyseure Systemdienstleistungen anbieten und dadurch zusätzlich netzdienlich agieren. Diese Dienstleistungen können einerseits zum kurzfristigen Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch dienen, indem Regelleistung angeboten wird. Hierbei wird wie in Tabelle 1 in die drei Regelleistungs-Qualitäten (FCR, aFRR, mFRR) unterschieden sowie zwischen positiver und negativer Regelleistung. Im Falle der FCR wird eine symmetrische, d.h. positive wie negative, Leistungsmenge als Gebot am Regelleistungsmarkt platziert. Im Fall eines Abrufs muss der Elektrolyseur diese Leistung innerhalb von 30 Sekunden bereitstellen und mindestens 15 Minuten erbringen können. (Siehe Tabelle 1) Alternativ kann der Elektrolyseur für die aFRR und mFRR getrennte Gebote im Regelleistungsmarkt abgeben und beispielsweise im Fall einer Überspeisung des Netzes diesem den Überschussstrom entnehmen. Dies wird als negative Regelleistung bezeichnet. Die Leistung muss im Fall der

aFRR innerhalb von 5 Minuten bereitstehen. Die Regelleistungsbeschaffung erfolgt in einem marktlichen Verfahren durch die Übertragungsnetzbetreiber und werden nach dem Auktionsprinzip vergeben.

Für einen flexiblen und netzdienlichen Betrieb sollte idealerweise zusätzlich der lokale Zustand des Stromnetzes, insb. Netzengpässe, berücksichtigt werden. Aktuell ist dies nicht direkt möglich und könnte mit Hilfe von z.B. von Netzampeln, die die Auslastung der lokalen Netze prognostizieren, umgesetzt werden (Schleswig-Holstein Netz AG, o. J.). Zukünftig kommt Verteil- und Übertragungsnetzbetreibern hierbei eine zentrale Rolle zu.

Die Kombination aus preis- und netzbasierten Signalen zur Betriebsführung bietet für Anlagenbetreiber den Vorteil, den Elektrolyseur vorrangig zu ökonomisch günstigen Zeitpunkten zu betreiben. Der Anlagenbetreiber kann sich innerhalb der Sollwertvorgaben am Netzanschlusspunkt, die der Netzbetreiber vorgibt, eigenständig optimieren. Wichtig ist, dass immer die Vorgabe des Netzbetreibers die höchste Priorität hat.

Allerdings können sich die lokalen Netzerfordernisse und Marktpreise in der Stromgebotszone unterscheiden, wodurch ein Hochfahren des Elektrolyseurs das lokale Netz zwar entlasten oder gar Abregelungen von EE-Anlagen verhindern kann, zeitgleich allerdings aufgrund einer gebotszonenweiten höheren Last für den Betrieb sehr hohe Preise anfallen. Hierbei können neu zu schaffende Flexibilitätsmärkte helfen, diese lokalen Effekte zu vermeiden und einen monetären Anreiz zum netzdienlichen Betrieb schaffen.

Neben den Strommärkten kann der Elektrolyseur in weiteren Märkten agieren und somit Sektoren koppeln. Beispielsweise lassen sich die Koppelprodukte der Elektrolyse, Abwärme und Sauerstoff, nutzen und vermarkten. In diesen Formen der Vermarktung muss die Fluktuation der flexiblen Bereitstellung mit Hilfe von Redundanzen (z.B. in der Wärmebereitstellung) oder Pufferspeichern berücksichtigt werden, um nicht das stromseitige Flexibilitätspotential zu beschränken.

Zusammenfassend kann ein netzdienlicher Betrieb schon heute die Wirtschaftlichkeit des Elektrolyseurs unterstützen. Aktuell sind die Anreize für lastseitige Flexibilitäten jedoch nicht ausreichend. Da zur Bestimmung des jeweiligen optimalen Betriebspunkts des Elektrolyseurs eine Vielzahl von Signalen verarbeitet werden müssen, ist diese zusätzliche Einnahmequelle jedoch komplex. Immer mehr Unternehmen nehmen dieses Thema unter verschiedenen Gesichtspunkten in ihr Portfolio auf.

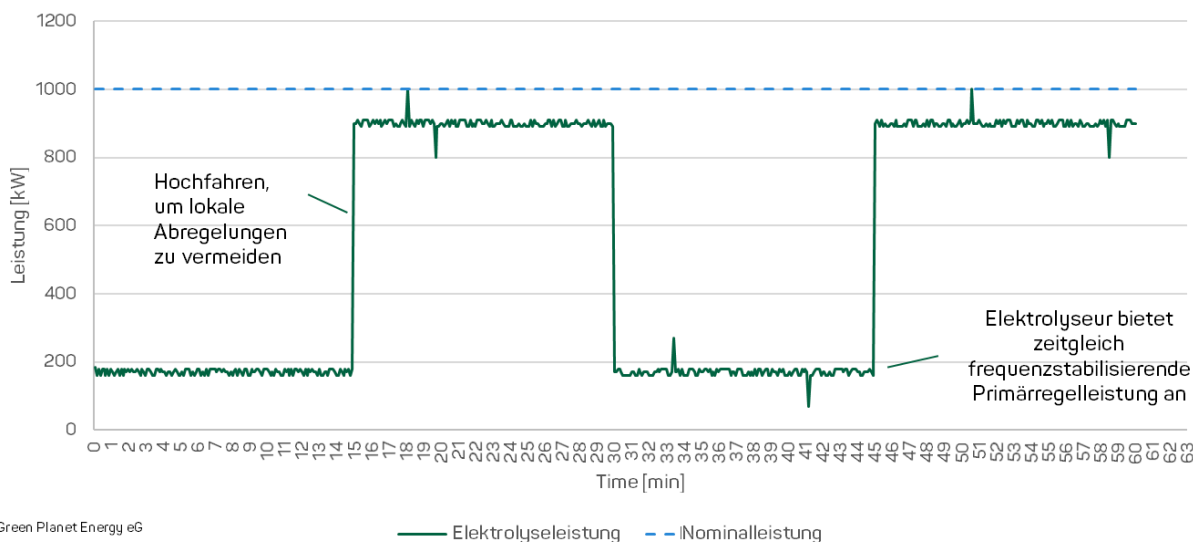


Abbildung 2 Beispiel einer Fahrweise, die die Berücksichtigung lokaler Netzsignale und Primärregelleistung vereint. (Quelle: Green Planet Energy eG)

## Der Blick in die Zukunft: Was wird in Deutschland benötigt, um mehr Elektrolyseure flexibel zu integrieren?

Aktuell sind in Deutschland 65 Megawatt Elektrolysekapazität am Netz (E.ON, 2022). Laut den Zielen der Bundesregierung aus dem Koalitionsvertrag von 2021 sollen bis 2030 zehn Gigawatt gebaut sein (Koalitionsvertrag Regierungsparteien, 2021, S. 60). Die flexible Integration wird sowohl im Osterpaket der Bundesregierung als auch in der RED II (Renewable Energy Directive)<sup>8</sup> als wichtiger Bestandteil thematisiert (BMWK, 2022; European Commission, 2022). Allerdings sind einige regulatorische Themen, wie die Kriterien für grünen Wasserstoff (Zusätzlichkeit, zeitliche und geografische Korrelation) und das „Labelling“ von Wasserstoff aus „Überschussstrom“, zum Zeitpunkt dieses Impulspapiers noch nicht abschließend definiert und sorgen demnach für Unsicherheit im Umgang mit flexibler Integration (European Commission, 2022; European Parliament, 2018).

Hohe Technologiekosten stellen aktuell einen Anreiz zu hohen Volllaststunden dar. Um jedoch eine aus einem inflexiblen Betrieb resultierende zusätzliche Grundlast von derzeit angestrebten zehn Gigawatt zu vermeiden, sollte bereits heute die flexible Einbindung dieser lokalen Nachfrage berücksichtigt und angereizt werden. Im Netzentwicklungsplan für 2037 werden über geeignete Elektrolyse-Standorte hinsichtlich der Strom- und Gasnetze nachgedacht (Netzentwicklungsplan Strom, 2022), allerdings fehlen derzeit entsprechende Allokationssignale für Investition und flexiblen Betrieb. Einige Pionier-Projekte nutzen schon heute die flexible Fahrweise als zusätzliche Einnahmequelle für ihren Elektrolyseur.<sup>9</sup>

Dieses Impulspapier zeigt, dass es einige technische Möglichkeiten, aber begrenzte wirtschaftliche Anreize gibt, Elektrolyseure flexibel in das Stromnetz einzubinden. Die Standortfrage wird aufgrund des lokalen Energiebedarfs und lokal verfügbarer fluktuierender Erneuerbarer Energien ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit sein, wenn Elektrolyseure flexibel gefahren werden sollen. Darüber hinaus ist die Entwicklung der Technologiekosten sowie die Preisentwicklung für Strom, Wasserstoff, Abwärme und Sauerstoff essenziell für die Wirtschaftlichkeit des Elektrolyseurs.

Die verschiedenen Regelleistungsarten adressieren kurzfristige Abweichungen zwischen Verbrauch und Erzeugung. Elektrolyseure können hier helfen, stehen aber mit anderen Technologien (bspw. Batteriespeichern) im Wettbewerb. Insgesamt sollte sich unser Stromsystem jedoch stärker auf die Anreizung von Flexibilität ausrichten, um netzdienliches Verhalten im Stromnetz anzuregen. Für Netzbetreiber stellen Elektrolyseure derzeit vor allem eine Herausforderung unter anderem für Netzengpässe und resultierende Netzausbaubedarfe dar. Allerdings gibt es derzeit keine Anreize für ein netzdienliches Verhalten zur Verringerung bzw. Vermeidung von zusätzlichen Netzengpässen. Klare Anreize und Vorschriften zur Förderung netzdienlichen Verhaltens sind notwendig, um eine effiziente Integration von Elektrolyseuren zu erreichen

Die einheitliche Beschreibung von Definitionen ist eine weitere Grundvoraussetzung für eine funktionierende Gesamtsystemintegration. An welchen Stellen die Festlegung von Standards notwendig ist, ist noch zu ermitteln. Der Erstellungsprozess des Impulspapiers hat gezeigt, wie unterschiedlich die Definitionen derzeit noch sind und dass die gesamtsystemdienliche Sicht oftmals noch nicht im Fokus liegt. VDE, DKE und FNN bieten hierfür den idealen Raum diese gemeinsam zu gestalten.

---

<sup>8</sup> Diese wird allerdings gerade überarbeitet.

<sup>9</sup> Beispielhaft seien hier die Projekte Windgas Haßfurt zur Nutzung lokaler EE-Überschüsse sowie Windgas Haurup zur Verhinderung von Abregelungen von Windstrom genannt. Auch die Projekte Energiepark Mainz und Wunsiedel haben den flexiblen Betrieb von Elektrolyseuren in ihren Konzepten eingebunden.



## Quellen

- BMWK, B. für W. und K. (2022). *Überblickspapier Osterpaket*.  
[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406\\_ueberblickspapier\\_osterpaket.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=14](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.pdf?__blob=publicationFile&v=14)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). (2020). *Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende*.
- ENTSO-E AISBL. (2022). *Potential of P2H2 technologies to provide system services*.
- EnWG. (2005). *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)*.  
[https://www.gesetze-im-internet.de/enwg\\_2005/BJNR197010005.html#BJNR197010005BJNG000100000](https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html#BJNR197010005BJNG000100000)
- E.ON. (2022). *Deutschlands H2 Bilanz*. <https://www.eon.com/de/hydrogen/h2-bilanz.html>
- European Commission. (2022). *Renewable Energy Directive II - Delegated Act*.  
<https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/>
- European Parliament. (2018). *Renewable Energy Directive II*. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC)
- Hydrogen Europe. (2022). *Clean Hydrogen Monitor 2022*. <https://hydrogeneurope.eu/clean-hydrogen-monitor-2022/>
- Koalitionsvertrag Regierungsparteien. (2021). *Koalitionsvertrag 2021 - 2025 zwischen SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP*.
- Merten, F., Scholz, A., Krüger, C., Heck, S., Girad, Y., Mecke, M., & Goerge, M. (2020). *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung*. Wuppertal Institut. <https://wupperinst.org/fa/redaktion/downloads/projects/LEE-H2-Studie.pdf>
- Müller, S. (2022). *Systemdienliche Allokation von Elektrolyseuren: wo und wie? - Agora Energiewende*.
- Netzentwicklungsplan Strom. (2022). *Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2037 mit Ausblick 2045, Version 2023 - Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber*.  
[https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf\\_NEP2037\\_2023.pdf](https://www.netzentwicklungsplan.de/sites/default/files/paragraphs-files/Szenariorahmenentwurf_NEP2037_2023.pdf)
- Papakonstantinou, G., Algara-Siller, G., Teschner, D., Vidaković-Koch, T., Schlögl, R., & Sundmacher, K. (2020). *Degradation study of a proton exchange membrane water electrolyzer under dynamic operation conditions*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920313751>
- Projekträger Jülich (PTJ). (2022). *Langfassung der Expertenempfehlung Forschungsnetzwerk Wasserstoff*.
- Schalling, A., Arnhold, O., Helfenbein, K., Röpke, T., & Backhaus, A. (2022). *Netzdienliche Wasserstoffherzeugung - Studie zum Nutzen kleiner, dezentraler Elektrolyseure*. Rainer Lemoine Institut (RLI).
- Schleswig-Holstein Netz AG. (o. J.). *Netzampel Übersicht - Digitalkarte*.  
<https://www.netzampel.energy/home>
- Schulze, Y., Müller, M., Faller, S., Duschl, W., & Wirtz, F. (2021). *Was ist Netzdienlichkeit?*  
[https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/07/20210428\\_Was-ist-Netzdienlichkeit\\_HP.pdf](https://www.ffe.de/wp-content/uploads/2021/07/20210428_Was-ist-Netzdienlichkeit_HP.pdf)
- Van Pham, C., Escalera-López, D., Mayrhofer, K., Cherevko, S., & Thiele, S. (2021). *Essentials of High Performance Water Electrolyzers – From Catalyst Layer Materials to Electrode Engineering*.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aenm.202101998>
- VDE FNN. (2022). *Die Technischen Anschlussregeln im Überblick (TAR)*.  
<https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar>

## Die Autor\*innen

- **Andrea Appel**, VDE
- **Carolin Dähling**, Green Planet Energy eG
- **Christoph Heinemann**, Öko-Institut
- **Florian Lessing**, VDE Renewables
- **Friedrich Kunz**
- **Lucy Schwarz**, Uniper Hydrogen GmbH
- **Mats Bednarczyk**, Green Planet Energy eG
- **Moritz Vogl**, Öko-Institut
- **Phillip Miersch**, VDE FNN
- **Sebastian Kosslers**, VDE DKE
- **Thomas Holzmann**, VDE