



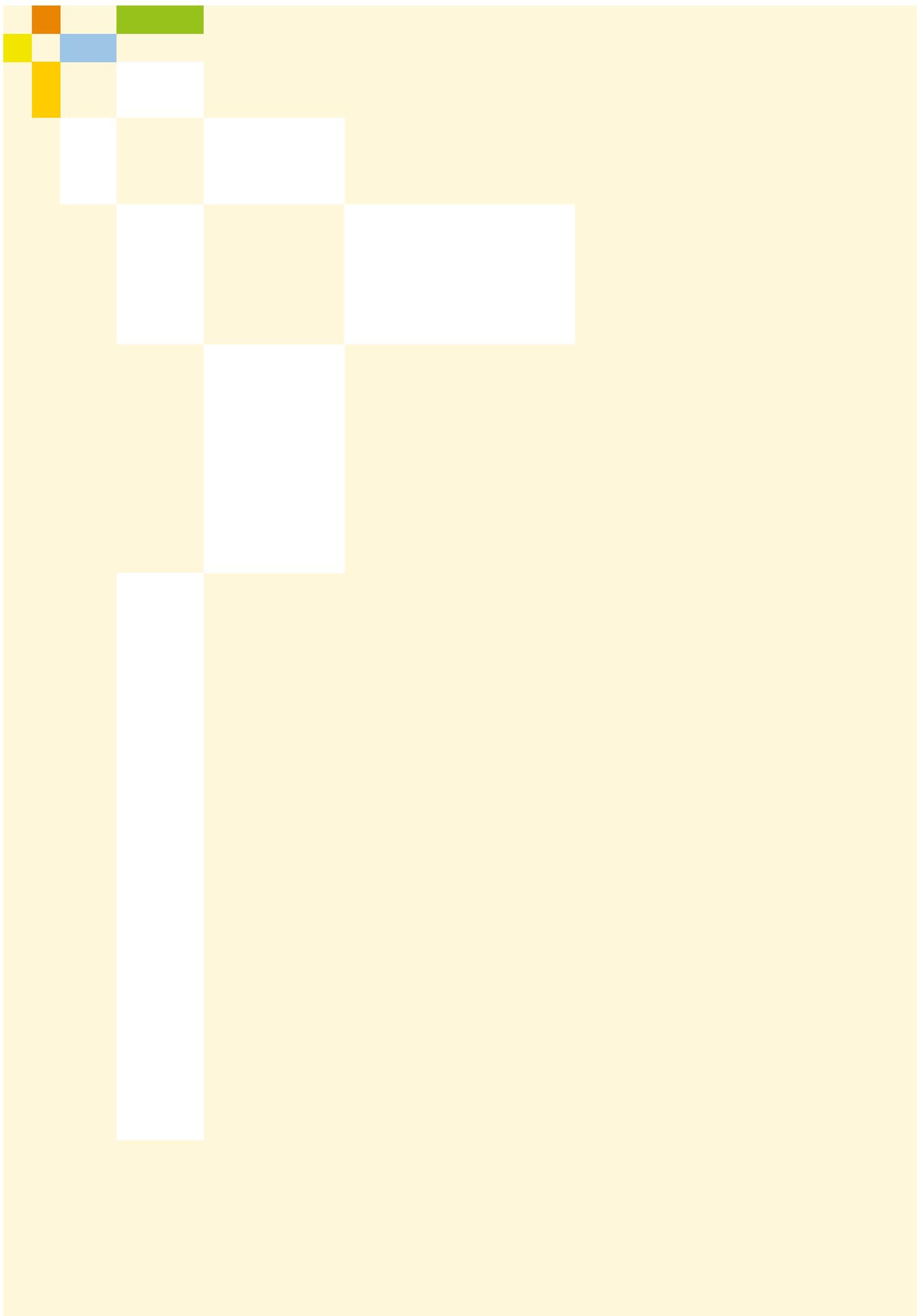
acatech IMPULS

# Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft

M. Brudermüller, R. Neugebauer, R. Ploss,  
F. Süssenguth, A. Liepold

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER  
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech IMPULS

# Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft

M. Brudermüller, R. Neugebauer, R. Ploss,  
F. Süssenguth, A. Liepold



## Die Reihe acatech IMPULS

In dieser Reihe erscheinen Debattenbeiträge und Denkanstöße zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Sie erörtern Handlungsoptionen, richten sich an Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie die interessierte Öffentlichkeit. IMPULSE liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter [www.acatech.de/publikationen](http://www.acatech.de/publikationen) zur Verfügung.

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>5</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>Interviewpartnerinnen und Interviewpartner</b>	<b>11</b>
<b>Mitwirkende</b>	<b>13</b>
<b>Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft</b>	<b>14</b>
<b>1 Elektrolyseurtypen</b>	<b>15</b>
<b>2 Die etablierte Wasserstoff-Farbenlehre</b>	<b>17</b>
<b>3 Wasserstoff- und Elektrolyseur-Wertschöpfungsnetzwerke</b>	<b>18</b>
<b>4 Marktprognosen Elektrolyseure</b>	<b>21</b>
4.1 Marktprognosen nach Weltregionen	22
4.2 Marktprognosen nach Elektrolyseurtypen	22
<b>5 Elektrolyseur-Herstellerlandschaft Deutschland</b>	<b>23</b>
5.1 Überblick über deutsche Elektrolyseur-Herstellerlandschaft	23
5.2 Internationaler Überblick über Elektrolyseur-Herstellerlandschaft	24
<b>6 Rahmenbedingungen für den Hochlauf deutscher Elektrolysekapazitäten</b>	<b>26</b>
6.1 Elektrolyse-Ausbauprognosen versus Bedarfe	26
6.2 CAPEX- und OPEX-Kosten	27
<b>7 Deutsche und europäische Gesetzeslage und Vorgaben</b>	<b>29</b>
7.1 Deutsche Gesetzeslage und Vorgaben	30
7.2 Europäische Gesetzeslage und Vorgaben	30
<b>8 Wasserstoffinfrastruktur</b>	<b>32</b>
8.1 Kosten und Kapazitäten	32
8.2 Wasserstoff-Pipelinennetz	33
8.3 Regulatorik für eine Wasserstoffinfrastruktur	35
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>36</b>
<b>Literatur</b>	<b>37</b>



## Vorwort

Auf fossilen Ressourcen beruhende Energiesysteme und chemische Industrien stehen vor einem grundlegenden Umbau: Die Defossilisierung erfordert ein Update der Transport- und Wertschöpfungsnetze, die bislang auf Öl, Kohle und Erdgas beruhen. Der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine hat den Transformationsdruck weiter erhöht. Zugleich hat das vergangene Jahr gezeigt, dass sich die Flussrichtung von Energie und Ressourcen auf absehbare Zeit nicht verändern wird. Deutschland bleibt auf Importe angewiesen.

Grüner Wasserstoff rückt daher zu Recht als gut transportabler Energieträger und als Schlüssel einer nachhaltigen Chemie-, Zement- und Stahlproduktion in den Fokus. Zugleich bietet seine Herstellung durch die Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mittels grünen Stroms eine große Chance für Deutschland und Europa: Als internationaler Leitanbieter für Elektrolyseure könnte die europäische Industrie eine Schlüsselstelle im neu entstehenden Wertschöpfungsnetzwerk der Wasserstoffproduktion besetzen, bevor es andere tun.

Um den globalen Bedarf an grünem Wasserstoff in Zukunft zu decken, werden wir große Elektrolyseurkapazitäten zur Wasserstoffherstellung benötigen. Deutsche Elektrolyseurhersteller gehören derzeit zu den globalen Marktführern. Initiativen wie

der amerikanische Inflation Reduction Act und eine strategische Förderung der Wasserstoffwirtschaft in China, etwa durch regionale Clusterbildung, verschärfen gegenwärtig aber den internationalen Wettbewerb um diese Schlüsseltechnologie. Ohne eine kluge europäische Antwort droht ein Verdrängungswettbewerb, der mit einem schwer wieder aufzuholenden Wertschöpfungsverlust einhergehen kann. Die jüngste Geschichte der Photovoltaikindustrie Deutschlands ist hier ein mahndes Beispiel.

Die Produktion und auch der Einsatz von Elektrolyseuren in Deutschland müssen jetzt gestärkt werden, um den Hochlauf der heimischen Wasserstoffwirtschaft zu ermöglichen, vor allem aber, um die globale Leitanbieterschaft zu erreichen und eine Abwanderung heimischer Hersteller und Kompetenzen zu verhindern. Dieser Impuls zeigt auf, was jetzt getan werden muss, um dieses Potenzial für Klimaschutz und Wertschöpfung zu heben.

Der vorliegende Impuls ist die leicht überarbeitete Fassung eines Papiers, das mit Mitgliedern der Bundesregierung Ende 2022 diskutiert wurde.

acatech dankt allen Mitwirkenden für ihr besonderes Engagement bei der Erstellung.

**Prof. Dr. Henning Kagermann,**  
Vorsitzender des acatech Kuratoriums



## Zusammenfassung

**Deutsche Elektrolyseurhersteller** gehören derzeit zu den **globalen Marktführern**. Doch der internationale politische und wirtschaftliche Wettbewerb um diese Schlüsseltechnologie der Energiewende ist intensiv und dynamisch.

In mehreren Ländern sind zudem die Rahmenbedingungen und auch die Förderstrukturen für den Elektrolyseurbetrieb attraktiver als in **Deutschland**. Hier ist gegenwärtig **kein wirtschaftlicher Elektrolyseurbetrieb realisierbar**.

Ein besonderer internationaler Paukenschlag, auf den die deutschen und europäischen Wasserstoffstrategien eine Antwort finden müssen, ist der 2022 verabschiedete amerikanische **Inflation Reduction Act (IRA)**. Mit diesem wird die amerikanische Wasserstoffwirtschaft einen starken Schub erfahren und eine starke Anziehung auch auf deutsche Elektrolyseurhersteller ausüben.<sup>1</sup>

„Der IRA ist maximal anfangs für den Standort Deutschland hilfreich, denn da kann ich noch aus Deutschland liefern – aber irgendwann muss ich in die USA.“

Hierauf gilt es **schnellstmöglich Antworten** zu finden, um eine Abwanderung von Fertigungskapazitäten und Kompetenzen in das Ausland aufgrund der erhöhten ökonomischen Attraktivität zu verhindern und stattdessen die Entstehung einer **Zukunftsbranche in Deutschland** und die globale Leitanbieterschaft zu ermöglichen. Dafür ist eine industriepolitische Strategie notwendig, die in ihrem Umfang und klaren Fokus dem Inflation Reduction Act (IRA), aber auch der strategischen Förderung von Elektrolyse in China Paroli bieten kann.

Im März 2023 hat die EU-Kommission als Reaktion auf den IRA mit dem **Net Zero Industrial Act** im Rahmen des Green Deal Industrial Plan einen neuen Rahmen zur Schaffung günstigerer Investitionsbedingungen für strategische Netto-Null-Technologien eröffnet. Um den gewünschten Schub für die Wasserstoffwirtschaft zu bewirken, müssen die vorgeschlagene Maßnahmen, wie etwa kürzere Genehmigungsfristen, straffere Verfahren oder der beschleunigte Zugang zu Finanzmitteln für Netto-Null-Technologien wie die Elektrolyse nun schnellstmöglich und pragmatisch umgesetzt werden.

Die **Wichtigkeit von Wasserstoff** für die Erreichung der Klimaziele ist unumstritten und wurde durch ambitionierte Ausbauziele für Elektrolysekapazitäten von der Bundesregierung anerkannt.<sup>2</sup> Der vorliegende IMPULS zeigt Handlungsoptionen auf, wie sowohl der angestrebte Ausbau und Betrieb von Elektrolyseuren in Deutschland als auch der Aufwuchs der Elektrolyseurbranche **beschleunigt** vorangetrieben werden kann.

Zentral hierfür waren **Interviews** mit unterschiedlichen Expertinnen und Experten – von Elektrolyseurherstellern über die Anwenderindustrien bis hin zu Forschung und Entwicklung – sowie der **Austausch mit dem Nationalen Wasserstoffrat**.

Auf Basis dieser Analyse wird die rasche und ambitionierte Umsetzung der folgenden **fünf Handlungsoptionen** empfohlen:

### 1. Selbsttragende, unternehmerische Geschäftsmodelle zum Betrieb von Elektrolyseuren ermöglichen: das System Wasserstoffherzeugung und -nutzung befähigen

Trotz der vielversprechenden Potenziale für grünen Wasserstoff muss man aktuell anerkennen, dass es in Deutschland derzeit **noch keine selbsttragenden Geschäftsmodelle** für die Produktion von grünem Wasserstoff gibt, selbst wenn die Errichtung von Anlagen subventioniert wird. Deshalb ist es wichtig, dass die Politik durch die Schaffung förderlicher Rahmenbedingungen entsprechende Geschäftsmodelle ermöglicht.

„Aktivitäten bei Gesetzgebern sind außerhalb Europas um Welten besser als in Europa. Das ist ein massiver Wettbewerbsnachteil!“

Zur Schaffung entsprechender Rahmenbedingungen muss schnellstmöglich eine **schlagkräftige und pragmatisch ausgestaltete Antwort** auf die Wasserstoff-Wirtschaftsförderung des **IRA** gefunden werden. Als Land mit starker Elektrolyseur-Herstellerlandschaft sollte sich Deutschland deshalb mit Nachdruck dafür in Brüssel einsetzen, den Net Zero Industrial Plan der EU-Kommission schnellstmöglich umzusetzen. Um ein transatlantisches Level Playing Field sicherzustellen und einen Förderwettbewerb zu vermeiden, ist es unerlässlich, deutschen Herstellern der **Zugang zur Förderung durch den IRA** zu ermöglichen. Im Gegenzug sollten US-amerikanischen Herstellern

1 | Vgl. 117th Congress of the United States of America 2022.

2 | Vgl. SPD et al. 2021.

allerdings auch Möglichkeiten eingeräumt werden, an der europäischen Antwort auf den IRA zu partizipieren.

Die nach seiner Bekanntgabe befragten Expertinnen und Experten sehen dabei den dem IRA zugrunde liegenden Mechanismus, bei dem die Förderung durch einen **Steuereinnahmenverzicht** anstatt einer Direktförderung erfolgt, prinzipiell auch in Hinsicht auf europäische Maßnahmen als sehr attraktiv an. Er ist unkompliziert konstruiert und zahlt zugleich auf das **übergreifende Ziel einer CO<sub>2</sub>-Reduktion** ein, was über eine gestaffelte Förderung je nach CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial der jeweils zugrunde liegenden Wasserstoff-Produktionstechnologie erreicht wird.

Die EU-Kommission setzt in ihrer Antwort in Form des im März 2023 vorgestellten **Net Zero Industrial Act** nun aber vor allem darauf, Genehmigungsverfahren zu verkürzen sowie private und öffentliche Finanzierungsmöglichkeiten zu erleichtern, um so die Investitionsbedingungen für Netto-Null-Technologien zu verbessern. Unter anderem sollen im Rahmen einer europäischen Wasserstoffbank Wasserstoff-Wertschöpfungsketten aufgebaut und Investitionslücken geschlossen werden.

Der Vorstoß der EU-Kommission mit dem Net Zero Industrial Act ist für den **Aufbau von Produktionskapazitäten von Elektrolyseuren in Europa** ein Schritt in die richtige Richtung. Der Aufbau der Produktionskapazität allein, wie im Net Zero Industrial Act vorgesehen, wird für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft jedoch nicht ausreichen. Diesbezüglich gilt weiterhin die Einschätzung der Expertinnen und Experten, dass es unbürokratischer und pragmatischer Programme zur Förderung entsprechender **Initiativen zum Wasserstoffhochlauf** (Bau und Betrieb von Elektrolyseuren, Aufbau der Infrastruktur) bedarf, die mit substanziellen Mitteln ausgestattet sein müssen, um einen ähnlichen Schub für die Wasserstoffwirtschaft zu bewirken wie der IRA.

Der schnelle Markthochlauf von Elektrolyseuren wird so oder so nur im Rahmen des umfassenden Markthochlaufs einer deutschen und europäischen Wasserstoffwirtschaft erfolgreich sein. Das Ziel muss eine CO<sub>2</sub>-neutrale Wasserstoffwirtschaft sein. Um den **Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft** allgemein zu **beschleunigen**, sollte daher bis zur ausreichenden Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff die Nutzung von blauem und türkischem Wasserstoff zugelassen werden.

Viele Befragte sind dabei der Auffassung, dass sich zukünftig grüner Wasserstoff unter klugen Rahmenbedingungen deutlich

günstiger herstellen lässt und so **im technologischen und ökonomischen Wettbewerb** mit blauem Wasserstoff attraktiv werden kann.

Eine derart ermöglichte schnellere Ausweitung des Wasserstoffangebots würde **Planungssicherheit** für die Industrie schaffen, die eine betriebswirtschaftliche Voraussetzung dafür ist, dass Unternehmen den Schritt wagen, industrielle Prozesse bereits heute auf wasserstoffbasierte Lösungen umzustellen.

Insgesamt würde auf diesem Weg das Ziel einer **Defossilisierung** der industriellen Basis Deutschlands **schneller** erreicht werden, als es durch einen rein grünen – und damit langsameren – Ausbaupfad möglich wäre.

Ein solcher beschleunigter Hochlauf setzt voraus, dass verschiedene Prozesse **gleichzeitig** politisch begleitet und unterstützt werden: Mit dem Hochlauf der **Elektrolyseurproduktion** müssen auch der Ausbau der **Wasserstoffinfrastruktur** und die **Umrüstung industrieller Prozesse** einhergehen.

Eine zentrale Voraussetzung für die Ermöglichung selbsttragender Geschäftsmodelle ist die **ausreichende Verfügbarkeit von grünem Strom zu günstigen Preisen**. Da der Einsatz von Elektrolyseuren sehr stromintensiv ist, muss deshalb auch der Ausbau regenerativer Energien in Deutschland (und Europa) mit Nachdruck vorangetrieben werden. Auf begrüßenswerten Initiativen wie den von der Europäischen Kommission vorgeschlagenen Sofortmaßnahmen zur Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien<sup>3</sup> muss aufgebaut werden.

Mittelfristig wird durch den Ausbau der erneuerbaren Energiequellen in Kombination mit dem Atom- und dem Kohleausstieg der **Anteil der erneuerbaren Energiequellen am deutschen Strommix stetig anwachsen**. Der Betrieb von Elektrolyseuren und der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft müssen bis dahin – ähnlich wie der Hochlauf der Elektromobilität – bereits heute vorangetrieben werden, auch wenn der genutzte Strommix noch nicht zu einhundert Prozent CO<sub>2</sub>-neutral ist.

Die Nutzung bereits vorhandener regenerativer Energiequellen für die Produktion von grünem Wasserstoff ist technisch möglich, wird aktuell aber häufig durch strenge regulatorische Vorgaben (zum Beispiel durch strikte Grünstromkriterien der Erneuerbare-Energien-Richtlinie) verhindert. Hier gilt es **pragmatischere Regeln** zu finden (siehe Handlungsoption 2), um den Betrieb von Elektrolyseuren beschleunigt voranzutreiben.

3 | Vgl. BMWK 2022.



## 2. Hürden abbauen: Schaffung einer einfachen Regulatorik für den Betrieb von Elektrolyseuren

Für eine schnelle Ausweitung des Betriebs von Elektrolyseuren und einen beschleunigten Markthochlauf der Wasserstoffwirtschaft müssen **bestehende regulatorische Hürden abgebaut** und einfache regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen werden.

Zudem müssen **Genehmigungsverfahren deutlich beschleunigt** werden (Zielgröße: Wochen oder Monate statt Jahre). Die Expertinnen und Experten berichten von Zeiträumen von im Schnitt 5 bis 7 Jahren, die zwischen der Planung und der Realisierung eines Elektrolyseprojekts vergehen – ein Umstand, der oftmals langwierigen Genehmigungsverfahren geschuldet ist.

Für den beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien werden auf Bundes- und EU-Ebene Gesetzesnovellen vorangetrieben, die Verschlinkungen von Planungs- und Genehmigungsverfahren erzielen sollen. Für den Aufbau von Produktionskapazitäten für vorab festgelegte Technologien sieht auch der Net Zero Industrial Act schnellere Genehmigungsverfahren vor. Leider gelten diese nicht für den Bau und den Betrieb dieser Technologien, unter anderem auch Elektrolyseuren, in industriellen Anwendungen. Diese Vorteile des Net Zero Industrial Act sollten dringlich auch für Net-Zero-Projekte in der Industrie zugänglich gemacht werden, beispielsweise durch einen Transfer in andere Legislativakte, wie den Temporary Crisis and Transition Framework für Dekarbonisierungsvorhaben oder den Sustainable Carbon Removals Certification Framework für Technologien im Bereich Circular Economy.

Sollen das derzeit zur Debatte stehende EU-weite Wasserstoffziel für die Industrie und das Gigawattziel der Bundesregierung bis 2030 erreicht werden, müssen noch eine Vielzahl an Elektrolyseuren bis 2030 in Betrieb genommen werden. Die personelle Ausstattung und die notwendige Kompetenz in Behörden müssen dafür ausgebaut werden.

„Solange Regulatorik im Hochlaufstadium so eng gefasst bleibt, wird es scheitern. Dann werden wir in Europa nur den besagten Champagner der Energiewende produzieren und der Markt wird woanders entstehen.“

Besonders **hemmend** ist die **langwierige Diskussion zur Überarbeitung der Erneuerbare-Energien-Richtlinie** (Renewable Energy Directive = RED) auf EU-Ebene. Die geplanten strengen Vorgaben beispielsweise für Grünstromkriterien sind ein großes Hemmnis für den wirtschaftlichen Betrieb von Elektrolyseuren. So werden zum Beispiel die Kriterien der „Zusätzlichkeit“<sup>4</sup> und „Gleichzeitigkeit“<sup>5</sup> als starke Einschränkung für den Hochlauf einer Wasserstoffwirtschaft wahrgenommen.

Das EU-Parlament hatte im Jahr 2022 in seinem Entwurf eine **Vereinfachung der Klassifizierung von Grünstrom** beziehungsweise von grünem Wasserstoff nicht biologischen Ursprungs sowie die direkte Regelung der Grünstromkriterien in der RED vorgeschlagen. Dieser Vorschlag wurde von den befragten Expertinnen und Experten als ein richtiger erster Schritt begrüßt, um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft europaweit zu beschleunigen.

Während die Diskussion zur Überarbeitung der RED auch noch über eine am 30. März 2023 erzielte Trilog-Einigung hinaus andauert, wurden die **Grünstromkriterien zur Wasserstoffherzeugung** inzwischen bereits am 12. Februar 2023 in einem **delegiertem Rechtsakt** beschrieben. Anstelle einer umfassenden Lockerung wurde nun eine **zeitlich begrenzte Möglichkeit zur Aussetzung** des Zusätzlichkeitskriteriums bis Ende 2027 und zur **Lockerung** des Gleichzeitigkeitskriteriums bis Ende 2029 festgelegt.

Mit Abschluss der RED-III-Diskussion sollen die **Grünstromkriterien auch auf den Industriesektor ausgeweitet** werden. Um den insbesondere für die 2030er Jahre dringend benötigten verstärkten Markthochlauf an Elektrolyseuren voranzutreiben, erscheinen die angesetzten **Übergangsfristen zur Aussetzung der strengen Grünstromkriterien** bis Ende 2027 und 2029 jedoch als zu kurz. Deutschland sollte in Europa auch über die Übergangsfristen hinaus weiterhin für eine Ausgestaltung der RED werben, welche technologieoffen CO<sub>2</sub>-freie und -arme Wasserstoff-Geschäftsmodelle befähigt und sie nicht behindert.

4 | Das Kriterium gibt vor, dass die für den Elektrolyseurbetrieb nötigen erneuerbaren Energiequellen neu (= zusätzlich) gebaut werden müssen. So dürfen zum Beispiel bereits vorhandene PV-Anlagen oder Windräder nicht für den Betrieb eines Elektrolyseurs verwendet werden.

5 | Das Kriterium legt fest, dass regenerativ erzeugter Strom innerhalb eines sehr eingeschränkten Zeitfensters verwendet werden muss. Der Draft Delegated Act schlägt eine stündliche Korrelation vor. Eine solche Einschränkung bedeutet, dass Strom nicht gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt für die Elektrolyse verwendet werden kann.

„Wir haben große Investitionen in Wasserstoff getätigt und schaffen es aktuell aber nicht, ein einziges Projekt in Deutschland umzusetzen. Es kann doch nicht sein, dass wir einfacher Projekte im Ausland realisieren als hier!“

Durch einen zeitnahen Abschluss der Diskussionen sowie eine maximal **pragmatische Ausgestaltung von RED III**, der Grünstromkriterien zur Wasserstofferzeugung, und die anschließende Überführung in nationale Gesetzgebung würde ein Rechtsrahmen geschaffen, der Planungssicherheit für zum Beispiel Investoren ermöglicht und dadurch hilft, die Wasserstoffwirtschaft voranzutreiben.

Bis zur Verabschiedung von RED III auf EU-Ebene sollte die Bundesregierung in Deutschland nationale Spielräume in der Gesetzgebung, etwa im Bundes-Immissionsschutzgesetz (**BImSchG**), ausnutzen.

„Die Sicherheit darf nicht leiden, aber es braucht nicht für jeden kleinen Elektrolyseur ein komplettes BImSch-Verfahren.“

Wünschenswert wäre zudem eine systemische **Standardzertifizierung** für die Geräte und den Betrieb von Elektrolyseuren bis fünf Megawatt, sodass nicht für jeden Elektrolyseur eine individuelle Betriebsgenehmigung erforderlich ist. Hierfür gibt es bereits konkrete Vorschläge vonseiten der Industrie, auf die aufgebaut werden kann.<sup>6</sup>

### 3. Beschleunigter Ausbau des Stromnetzes und des industriellen Wasserstoff-Startnetzes sowie Förderung regionaler Cluster

Da in Deutschland sowohl der Betrieb von Elektrolyse-Großanlagen als auch die Realisation von dezentralen Elektrolyse-lösungen zum Beispiel für den Mobilitätssektor erwartet werden, müssen sowohl der Ausbau des Stromnetzes als auch der Aufbau einer **industriellen Wasserstoffinfrastruktur** vorangetrieben werden.

Gerade für dezentrale Elektrolyseanwendungen darf kein **Henne-Ei-Problem** bezüglich der Stromverfügbarkeit entstehen: Wenn

erst bei der Beantragung eines Elektrolyseurs über einen gegebenenfalls nötigen Stromnetzausbau nachgedacht wird, ist dies ein großes Hemmnis beziehungsweise eine unnötige Verzögerung für die Realisation von dezentralen Projekten.

Der **Ausbau des Stromnetzes muss deshalb vorausschauend geplant** und auch dezentrale Wasserstoffprojekte sollten frühzeitig berücksichtigt werden. Ergänzend zum Betrieb dezentraler Wasserstoffprojekte muss das Stromnetz auch darauf ausgelegt werden, die – wo effektiv und realisierbar – direkte Elektrifizierung industrieller Prozesse zu ermöglichen.

Die angeratene Schaffung eines **Wasserstoff-Startnetzes** beinhaltet die Verknüpfung großskaliger Wasserstoff-Produktionsanlagen mit den Hauptindustrieanwendern sowie weiteren Schlüsselstellen (zum Beispiel Anlandehäfen). Aufbauend auf diesem Grundgerüst sollte das Wasserstoffnetz nach Bedarf ausgebaut werden. Gerade bei eingeschränkten finanziellen Mitteln sollte der Ausbau dieses industriellen Backbones priorisiert werden. Zum derzeitigen Zeitpunkt erachtet sie ein weitverbreitetes, flächendeckendes Wasserstoffnetz als nicht notwendig.

Bereits heute kann gut abgeschätzt werden, welche Industrien – etwa Stahl, Chemie, Zementherstellung – große Bedarfe an Wasserstoff haben werden. Zu entsprechenden industriellen Zentren muss vorrangig eine **H<sub>2</sub>-fähige Pipeline-Infrastruktur aus- beziehungsweise aufgebaut** werden. Der Transport von Wasserstoff in Pipelines ist sicher und effizient.<sup>7</sup> Eine mögliche Umwidmung und Nachrüstung bestehender Gaspipelines sollten dabei, wo möglich, geprüft werden.

Auch der Bedarf des industriellen Mittelstands muss ausreichend berücksichtigt werden. Die **Versorgung regionaler Mittelstandscluster** mit erhöhtem Wasserstoffbedarf sollten im Rahmen des Wasserstoff-Infrastrukturausbaus ebenfalls gewährleistet werden.

### 4. Förderung und Umsetzung großskaliger Produktionsprojekte > ein Gigawatt

Damit Deutschland die geplanten, ambitionierten Gigawattziele (zehn Gigawatt bis 2030) erreicht, wird es Elektrolyse-Großanlagen in Deutschland geben müssen. Die Umsetzung von Großanlagen im Bereich > 1 GW-Elektrolyse-Kapazität bietet jedoch auch zusätzliche Chancen für deutsche Akteure der Wasserstoffwirtschaft: Die so entstehenden Anlagen können als **„Showroom“** für deutsche Hersteller dienen und ermöglichen es

6 | Vgl. WILO 2022.

7 | Vgl. ENTSOE et al. 2021.



Herstellern, vor Ort die nächste Generation der Elektrolyseure weiterzuentwickeln. Zudem können an diesen Standorten eine umfassende Infrastruktur und damit einhergehende Geschäftsmodelle entwickelt werden.

Um im Rahmen dieser Großanlagen wirtschaftlich selbsttragende Business Cases zu ermöglichen, sollten diese an Orten realisiert werden, die eine **räumliche Nähe zu einer Abnehmerindustrie** mit entsprechend großen Bedarfen an grünem Wasserstoff (siehe Handlungsoption 3) aufweisen und idealerweise über **ausreichend regenerative Energiequellen** vor Ort verfügen.

Zudem sollte eine Einspeisung in das Wasserstoff-Startnetz (siehe Handlungsoption 3) möglich sein, um bei Bedarf auch andere Regionen mit grünem Wasserstoff versorgen zu können. Explizit abgeraten wird von einer rein politisch getriebenen **Standortfindung** für die mögliche Realisation eines Elektrolyse-Großprojekts. Im Rahmen eines **Stakeholderdialogs** mit der Industrie sollten geeignete Standorte identifiziert werden.

## 5. Industrialisierung der Elektrolyseurproduktion vorantreiben

Aktuell werden die in Deutschland produzierten Elektrolyseure weitgehend in Handarbeit hergestellt. Eine **Automation und Industrialisierung** der Elektrolyseurfertigung ist jedoch ein zentrales Element, um als Hochlohnland international wettbewerbsfähige Preise anbieten zu können. Es gilt zudem mit Automatisierungsschritten internationaler Wettbewerber Schritt zu halten.

Eine fokussierte Fortführung des BMBF-Leitprojekts **H<sub>2</sub>Giga** mit einem Fokus auf die **Entwicklung skalierbarer Fertigungskapazitäten** wird daher empfohlen. Die deutsche Wirtschaft verfügt durch ihre Expertise im Maschinen- und Anlagenbau sowie durch

gutes Prozesswissen über beste Voraussetzungen, die aber für die Elektrolyseurherstellung aktiv nutzbar gemacht werden müssen.

Um die angestrebte internationale Wettbewerbsfähigkeit deutscher Elektrolyseurhersteller zu unterstützen, sollte gerade in den nächsten Jahren daher ein besonderer Fokus der **Forschung und Entwicklung** auf skalierbare Fertigungskapazitäten gelegt werden.

Damit der Innovationsvorsprung gehalten werden kann, muss parallel zu exzellenter Forschung und Entwicklung auch der **Aufbau praktischen Know-hows** für die skalierte Fertigung und den effizienten Betrieb von Elektrolyseuren vorangetrieben werden. Diese als Distinktionsmerkmal im internationalen Wettbewerb wichtige Routine entsteht nur durch eine Realisierung einer großen Zahl ambitionierter Projekte (siehe Handlungsoption 4).

„Man muss jetzt auch schnell sein. Wir dürfen nicht ‚früh Klasse, später Masse‘ machen, sondern müssen gleich mit der Masse einsteigen.“

Die nötige Automatisierung der Produktion ist auch eine Frage der zur Verfügung stehenden **Fachkräfte**, um die ein internationaler Wettbewerb herrscht. Das Halten heimischer und die Gewinnung ausländischer Fachkräfte für die Energiewende müssen daher ein zentraler Teil der Umsetzung der Fachkräftestrategie der Bundesregierung sein.

Darüber hinaus bestehen bei den neueren Elektrolysetechnologien sowie in der Materialforschung – beispielsweise im Fall der Substitution oder Verringerung des Bedarfs an knappen Rohstoffen wie Iridium – weiterhin Forschungsbedarfe. Hier ist eine kontinuierliche Forschungsförderung nötig, um auch bei den **übernächsten Elektrolyseurgenerationen** einen Technologie- und Kompetenzvorsprung zu erhalten.

# Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

## Danksagung

In Ergänzung zur Auswertung von Fachliteratur und anderen Studien hat die acatech Geschäftsstelle mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft explorative Experteninterviews geführt.

Die Gespräche wurden im Zeitraum von August bis November 2022 geführt und dauerten eine Stunde. Ziel war es, Impulse zu identifizieren, wie sowohl der Aufwuchs der Elektrolyseurbranche beschleunigt als auch der Ausbau und Betrieb von Elektrolyseuren in Deutschland vorangetrieben werden kann.

Nils Aldag

Gero Böhmer

Dr. Peter Buchholz

Dr. David Franzen

Tino Freiheit

Dr. Hartmut Freitag

Dr. Dominik Heiß

Dr. Stefanie Kesting

Dr. Lars A. Kissau

Dr. Alexander Klonczynski

Dr. Wilfried Kölscheid

Dr. Detlef Kratz

Dr. Isabel Kundler

Um den explorativen Charakter der Befragungen zu unterstützen und auch die „leisen Töne“ einzufangen, wurde auf eine offene Gesprächsführung gesetzt. Im vorliegenden IMPULS wird ein Überblick über die zentralen in den Interviews geäußerten Einschätzungen gegeben, womit aber nicht ausgeschlossen werden soll, dass einzelne Interviewpartnerinnen und -partner zu bestimmten Fragen andere Standpunkte vertreten. Zur Illustration einiger ausgewählter Kerngedanken der Befragten werden im Text hin und wieder den Interviews entnommene, anonymisierte Zitate aufgeführt. Die genannten Funktionen der Interviewpartnerinnen und -partner beziehen sich auf den Zeitpunkt des jeweiligen Gesprächs.

Die Geschäftsstelle dankt im Namen des acatech Präsidiums allen nachfolgend aufgeführten Beteiligten sehr herzlich für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an den Interviews und Hintergrundgesprächen!

Sunfire GmbH

WILO SE

Deutschen Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

NEUMAN & ESSER GROUP

HIAT gGmbH

XENON Automatisierungstechnik GmbH

H-Tec Systems GmbH

NEUMAN & ESSER GROUP

BASF SE

Robert Bosch GmbH

Robert Bosch GmbH

BASF SE

DECHEMA e. V.  
Fachbereich Energie & Klima



Martin Linge-Boom	WILO SE
Prof. Dr. Andreas Löschel	Ruhr-Universität Bochum
Dr. Wiebke Lüke	WEW GmbH
Peter Müller-Baum	VDMA e. V.  International Council on Combustion Engines (CIMAC)
Prof. Dr. Karsten Pinkwart	Hochschule Karlsruhe, Fakultät für Elektro- und Informationstechnik  Nationaler Wasserstoffrat der Bundesregierung  Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT)
Robin von Plettenberg	H-Tec Systems GmbH
Dr. Christian Preetz	WILO SE
Katherina Reiche	Nationaler Wasserstoffrat  Westenergie GmbH
Prof. Dr. Robert Schlögl	Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft, Abteilung Anorganische Chemie
Dr.-Ing. Friedrich Wilhelm Speckmann	Fraunhofer-Institut für Produktions- technik und Automatisierung IPA
Dr. Stefan Spindler	Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Zudem wurden Hintergrundgespräche mit dem BMWK, BMBF und der Leitstelle Wasserstoff geführt.

## Mitwirkende

### Gesamtleitung

- Dr. Martin Brudermüller, BASF SE
- Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Fraunhofer-Gesellschaft
- Dr. Reinhard Ploss, acatech

### Inhaltliche Begleitung/Review

- Dr. Patrick Dieckhoff, Fraunhofer-Gesellschaft
- Dr. Carolin Kranz, BASF SE

### Konzeption, Text und Interviews

- Dr. Anka Liepold, acatech Geschäftsstelle
- Florian Süssenguth, acatech Geschäftsstelle

### Mit Unterstützung durch

- Mehdi Bhourri, acatech Geschäftsstelle
- Lars Hofius, acatech Geschäftsstelle
- Silke Liebscher, acatech Geschäftsstelle
- Elisa Reker-Gluhic, acatech Geschäftsstelle
- Ina Stevens, acatech Geschäftsstelle (bis 30. November 2022)
- Preskal Tadrous, acatech Geschäftsstelle

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16PLI7004 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



## Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft

Aufbauend auf den zentralen Handlungsoptionen und zum Zweck ihrer Einordnung werden nachfolgend vertiefende beziehungsweise weiterführende Aspekte für den Hochlauf der Elektrolyseurproduktion sowie des Elektrolyseurbetriebs in Deutschland aufgeführt. Die nachfolgenden Kapitel bieten einen Überblick über

- die unterschiedlichen Elektrolyseurtypen (Kapitel 1),
- die etablierte Farbenlehre für Wasserstoff (Kapitel 2),
- verschiedene Elemente entlang des gesamten Wertschöpfungsnetzes rund um Elektrolyseure (Kapitel 3),
- Einschätzungen zu Marktprognosen für die Elektrolyseurbranche (Kapitel 4),
- die deutsche sowie die internationale Elektrolyseur-Herstellerlandschaft (Kapitel 5),
- Rahmenbedingungen für den Hochlauf deutscher Elektrolyseurkapazitäten (Kapitel 6),
- relevante Aspekte der Gesetzeslage (Kapitel 7) sowie
- die Anforderungen an eine Wasserstoffinfrastruktur (Kapitel 8).

# 1 Elektrolyseurtypen

Es gibt vier Elektrolyseurtechnologien. Sie unterscheiden sich in ihrer technologischen Reife. Aus ihren jeweiligen Eigenschaften resultieren Vor- beziehungsweise Nachteile eines Einsatzes in unterschiedlichen Nutzungsszenarien. Das älteste und etablierteste Verfahren ist die alkalische Elektrolyse (AEL), am zweithäufigsten genutzt wird die Protonenaustausch-Membran-Elektrolyse (PEM).

Wasserstoff kann auf verschiedenen Wegen hergestellt werden. Heute wird er überwiegend aus fossilen Grundstoffen wie Erdgas gewonnen, was mit Kohlenstoffemissionen verbunden ist. Die **Elektrolyse** ermöglicht dagegen eine **klimafreundliche Herstellung**, sofern Strom aus erneuerbaren Quellen genutzt wird.

Das bekannteste Verfahren ist die Wasserelektrolyse, die Wasser ( $H_2O$ ) mithilfe von elektrischem Strom in seine Bestandteile Sauerstoff (O) und Wasserstoff ( $H_2$ ) spaltet. Da die Elektrolyse mit elektrischen Verlusten behaftet ist, entsteht dabei auch Abwärme, die im Rahmen einer Nachnutzung für andere industrielle Prozesse oder zur Beheizung von Gebäuden genutzt werden kann.

Die **Kernkomponente** eines Elektrolyseurs ist der sogenannte **Stack**, der aus geschichteten Lagen von zumeist metallischen Bipolarplatten (BPP) und Kunststoffmembranen besteht, die gasdicht miteinander verklebt werden müssen. In diesem findet die Reaktion statt. Dazu kommt die Peripherie: Strom- und Wasserzuführung, Gasabführung und -aufbereitung sowie die Kühlung und gegebenenfalls die anschließende Speicherung des Wasserstoffs.

Die **vier kommerziell verfügbaren Elektrolyseurtypen** unterscheiden sich hinsichtlich ihres technologischen Reifegrads, der Investitions- und der Betriebskosten. Vor allem unterscheiden sie sich aber darin, inwieweit sie im Betrieb mit Teillast gefahren werden können beziehungsweise ob ein schnelles Hoch- und Herunterfahren möglich ist. Dieser Betriebszustand wird häufig auch als dynamische Fahrweise beziehungsweise dynamischer Betrieb bezeichnet.

Es gibt vier unterschiedliche Elektrolyseurtypen mit marktreifen Produkten:

- alkalische Elektrolyse (AEL)
- Protonenaustausch-/Polymerelektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM)
- Anionenaustausch-Membran-Elektrolyse (AEM)
- Festoxid-/Hochtemperatur-Elektrolyse (SOEC)

Nachfolgend werden die Eigenschaften der vier bereits auf dem Markt erhältlichen Elektrolyseurtypen genauer vorgestellt:

## AEL-Elektrolyse

Die alkalische Elektrolyse (AEL) ist das älteste Elektrolyseverfahren und wurde ursprünglich für die Chlorherstellung entwickelt. Die AEL ist in großtechnischem Maßstab verfügbar und hat sich seit circa hundert Jahren bewährt.

Ihre Vorteile sind **geringe Investitionskosten** und eine **lange Stack-Lebensdauer**. Zudem werden praktisch keine kritischen Rohstoffe benötigt. Nachteilig ist allerdings die **lange Kaltstartzeit**, weswegen die AEL für eine dynamische Fahrweise schlechter geeignet ist. Den geringen Investitionskosten stehen zudem vergleichsweise **hohe Betriebskosten** gegenüber.

## PEM-Elektrolyse

Bei der PEM-Elektrolyse (Protonenaustausch-/Polymerelektrolyt-Membran-Elektrolyse) handelt es sich um eine jüngere Technologie, die aber bereits ebenfalls seit mehreren Jahren kommerziell verfügbar ist.

Die wichtigste Eigenschaft von PEM-Elektrolyseuren ist ihre **kurze Kaltstartzeit**, die eine gute Anpassung an eine fluktuierende Stromversorgung mit einem guten Teillastverhalten verbindet. Dies lässt zum Beispiel die Nutzung volatiler regenerativer Energien als Quelle zu. Zudem ermöglicht die PEM-Elektrolyse eine **kompaktere Bauweise** als die AEL-Elektrolyse. Allerdings benötigt ein PEM-Elektrolyseur aufgrund der sauren Elektrolyseumgebung korrosionsfeste Trägermaterialien wie Titan. Darüber hinaus werden knappe und geopolitisch umkämpfte **Rohstoffe wie Iridium und Platin für die Herstellung benötigt**. Daher sind PEM-Elektrolyseure **vergleichsweise teuer** in der Anschaffung.

## AEM-Elektrolyse

Bei den AEM-Elektrolyseuren (Anionenaustausch-Membran-Elektrolyse) handelt es sich ebenfalls um eine noch recht junge Technologie, die die Vorteile der AEL- und der PEM-Technologie verbindet: **kompakte Bauweise, Verzicht auf kritische Rohstoffe und die Möglichkeit der dynamischen Fahrweise**.



Aktuell haben die in der AEM-Elektrolyse eingesetzten Membranen aber technologiebedingt noch eine kurze Lebensdauer. Im Rahmen von FuE-Projekten wird bereits an Ansätzen geforscht, um diese zu verlängern.

## SOEC-Elektrolyse

Einen Sonderfall stellt die SOEC-Elektrolyse (Festoxid-/Hochtemperatur-Elektrolyse) dar, die **Betriebstemperaturen von über 600 Grad Celsius** benötigt. Wenn die benötigte Wärme aus

Abwärme benachbarter Prozesse bereitgestellt werden kann, lässt sich mit ihr eine hohe Effizienz bei geringen Betriebskosten erreichen. Aufgrund der benötigten Betriebstemperatur ist keine dynamische Fahrweise möglich.

Aktuell zeichnen sich SOEC-Elektrolyseure noch durch **hohe Investitionskosten** aus, und verlässliche Lebensdauererfahrungen fehlen.

Die nachfolgende Tabelle (siehe Abbildung 1) bietet eine Übersicht über die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Elektrolysetechnologien:

	AEL	PEM	AEM	SOEC	Kommentar
etablierte Technologien	+	o	-	-	
günstige Investkosten	+	(-)	+	nn	PEM: starke Kostendegression erwartet
günstige Betriebskosten	-	+	+	o	SOEC: abhängig von der Verfügbarkeit grüner Abwärme
dynamischer Betrieb (Kaltstart innerhalb von Minuten) möglich	-	+	+	-	
Verwendung kritischer Rohstoffe	-	+	-	+	
verschiedene Hersteller in Deutschland	+	+	-	-	
existierende Gigawatt- Großanlagen	+	+	-	-	
Stack-Lebensdauer	+	o	-	-	Hersteller geben aktuell noch kaum Garantien

Abbildung 1: Vergleich der verschiedenen Elektrolyse-Grundtypen; Legende: + positiv, - negativ, o neutral, nn keine Daten, hellgelb hinterlegt sind neuere Technologien (Quelle: eigene Darstellung)

**Alle Elektrolyseverfahren** haben einen extrem **hohen Energiebedarf**. Pro Tonne Wasserstoff benötigt man etwa fünfzig Megawattstunden (Grün-)Strom.

Es gibt noch weitere Elektrolyseverfahren, die jedoch noch keine Marktreife erreicht haben: Ein vielversprechender Ansatz ist die **Meerwasserelektrolyse**. Da die Nutzung von Meerwasser das Material sehr stark beansprucht und es aktuell noch keine Materialien gibt, die dieser Beanspruchung im Betrieb standhalten könnten, ist dieser Ansatz aktuell noch in einem sehr frühen Forschungsstadium.<sup>8</sup>

Darüber hinaus gibt es die CO<sub>2</sub>-freie Methanpyrolyse sowie **weitere neue Wasserstoff-Herstellungsverfahren**, die nicht auf Elektrolyse basieren, die ebenfalls einen Beitrag zu einer wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft leisten könnten, wie etwa **Waste-to-Hydrogen beziehungsweise Plastics-to-Hydrogen**, die auf einem Pyrolyseprozess basieren. Interessant wären diese Verfahren vor allem dann, wenn anderweitig zu entsorgende Abfälle wie Klärschlämme oder Krankenhausmüll für die Herstellung von Wasserstoff verwendet werden könnten. Auf bereits dazu laufenden Forschungsprojekten sollte aufgebaut werden.<sup>9</sup>

8 | Vgl. Neugebauer 2022.

9 | Vgl. Horizon 2020/Europäische Kommission 2021.

## 2 Die etablierte Wasserstoff-Farbenlehre

Je nach Herstellungsverfahren wird Wasserstoff einem bestimmten Farb-Label zugeordnet. Dieses dient zur schnellen Einordnung der im Herstellungsprozess verwendeten Energiequelle und damit der Klimafreundlichkeit. Man unterscheidet zum Beispiel die Wasserstofferzeugung auf Basis von Erdgas, Atomstrom oder regenerativen Energien.

In der Literatur und der politischen Diskussion werden je nach Herstellungsverfahren verschiedene, teils uneinheitliche Farbbezeichnungen für Wasserstoff verwendet.

In Deutschland haben zum Beispiel der nationale Wasserstoffrat sowie das Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität eigene Farbenlehren herausgegeben.<sup>10</sup> Die nachfolgende Tabelle (siehe Abbildung 2) bietet eine gängige Übersicht über die Farbbezeichnungen.

H <sub>2</sub> -„Farbe“	Verfahren	Wasserstoffquelle	Energiequelle
grün	Elektrolyse	Wasser	Erneuerbarer Strom
rot/pink	Elektrolyse	Wasser	Strom aus Kernkraft
gelb/grau	Elektrolyse	Wasser	Strommix (national)
türkis	Methanpyrolyse mit Kohlenstoffabtrennung	Erdgas	Erneuerbarer Strom
blau	Erdgasreformierung mit CO <sub>2</sub> -Abscheidung und Speicherung	Erdgas	Erdgas
grau	Erdgasreformierung	Erdgas	Erdgas

Abbildung 2: Überblick über die Wasserstoff-Farbenlehre (Quelle: eigene Darstellung)

In Deutschland spielt in der Diskussion um die Nachhaltigkeit von Wasserstoff die Frage, wie „grün“ der Wasserstoff ist, eine sehr zentrale Rolle. In der Folge orientieren sich auch politische Maßnahmen an einer sehr binären Grün-/Nicht-grün-Logik. Zu Beginn der politischen und gesellschaftlichen Diskussion empfanden befragte Expertinnen und Experten diese Unterscheidung als sehr hilfreich, um die Debatte über den Einstieg in eine Wasserstoffwirtschaft anzustoßen. Mittlerweile wird die Unterscheidung allerdings von vielen als Hürde wahrgenommen, die eine beschleunigte Transformation hin zu einer klimaneutralen Industrie ausbremst, da sie pragmatische Ansätze blockiert.

„Die ‚Grün-Diskussion‘ ist singular weltweit, überall anders redet man über CO<sub>2</sub>-Reduktion.“

In anderen Ländern werden zunehmend Begriffe wie „Low-Carbon-“ oder „Carbon-free“-Wasserstoff verwendet.<sup>11</sup> Dies bedeutet, dass dort das CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial in den Vordergrund gerückt wird und das jeweilige Herstellungsverfahren eine nachgeordnete Rolle spielt. Dieser Ansatz wird von einem Großteil der Befragten empfohlen, siehe auch Handlungsoption 1.

<sup>10</sup> | Vgl. IKEM 2020; Nationaler Wasserstoffrat 2022.

<sup>11</sup> | Vgl. World Energy Council 2022.



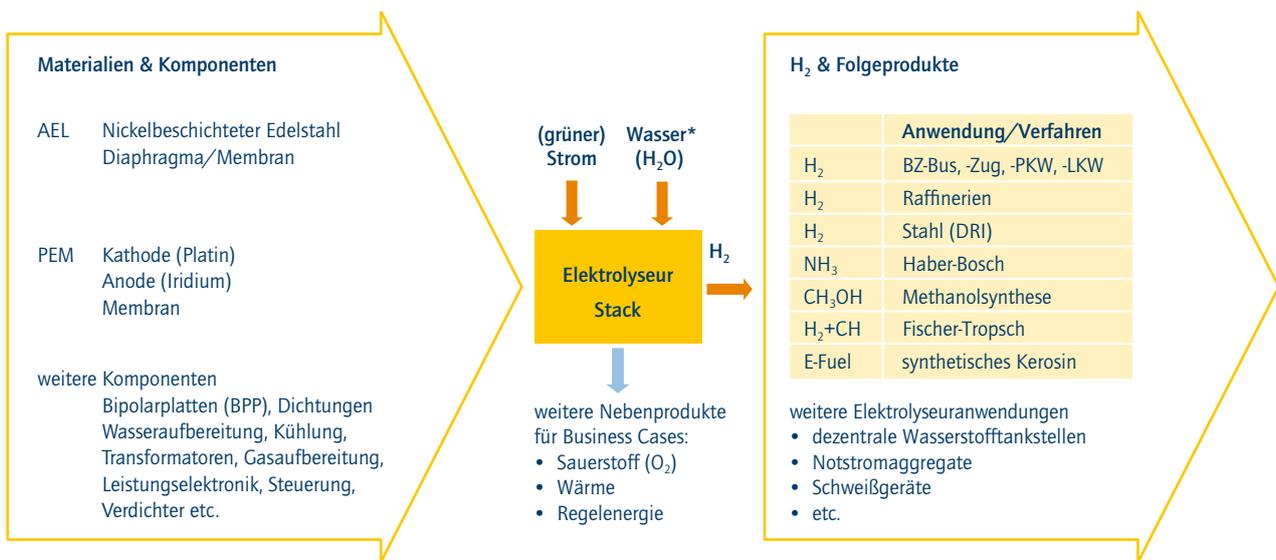
### 3 Wasserstoff- und Elektrolyseur-Wertschöpfungsnetzwerke

Für eine erfolgreiche Skalierung der Elektrolyseurproduktion müssen die gesamten Wertschöpfungsnetzwerke betrachtet werden. Diese reichen von kritischen Rohstoffen und Komponenten, die es für die Herstellung braucht, bis hin zur nachgelagerten Nutzung des Wasserstoffs beziehungsweise Wasserstoffderivats.

Die tatsächliche Skalierung der Elektrolyseurproduktion kann nur gelingen, wenn das gesamte sie umspannende Wertschöpfungsnetzwerk mit betrachtet wird.<sup>12</sup>

Die Wasserstoff-Wertschöpfungsnetzwerke, in die Elektrolyseure eingebettet sind, umfassen (siehe auch Abbildung 3):

- Stromverfügbarkeit und Strommarktdesign
- Materialien und Komponenten
- Stack- und Elektrolyseurherstellung
- Verteilung, Transport und Nutzung von Wasserstoff beziehungsweise Wasserstoffderivaten



\* für 1 t H<sub>2</sub> werden ca. 10 t H<sub>2</sub>O benötigt

Abbildung 3: Wasserstoff-Wertschöpfungskette mit Elektrolyseur als Mittelpunkt (Quelle: eigene Darstellung)

#### Stromverfügbarkeit und Strommarktdesign

Wie in Handlungsoption 1 formuliert, ist die ausreichende **Verfügbarkeit von grünem Strom zu wettbewerbsfähigen Preisen eine Grundvoraussetzung** für die Schaffung von Geschäftsmodellen zum Betrieb von Elektrolyseuren.

Perspektivisch dürfte der Elektrolyseurbetrieb durch eine weitere Verbesserung der Wirkungsgrade noch etwas effizienter werden. Dennoch bleibt die Grundkonstellation, dass **in Deutschland**

**Stromkosten den Löwenanteil der Betriebskosten** eines Elektrolyseurs ausmachen werden, unverändert, da anders als in sonnenreichen Staaten eine Stromproduktion zu Grenzkosten gegen null nicht in Sicht ist.

Der notwendige zusätzliche Strombedarf für die angestrebten Elektrolyseziele der Bundesregierung ist nicht zu unterschätzen. Für einen wirtschaftlichen Betrieb von Elektrolyseuren in Deutschland muss der Ausbau der erneuerbaren Energien stark vorangetrieben werden. Um die bis 2030 geplanten **10 Gigawatt**

12 | Vgl. BMWi 2020; Neugebauer 2022.

**Elektrolysekapazität zu betreiben**,<sup>13</sup> sind jährlich – je nach zugrunde gelegter Annahme – **circa 40 bis 45 Terawattstunden an Strom notwendig**.<sup>14</sup> Dies entspricht in etwa acht Prozent der deutschen Nettostromerzeugung in 2020.<sup>15</sup>

## Materialien

Je nach Elektrolyseurtyp gibt es unterschiedliche **kritische Rohstoffe**, die aktuell für die Materialherstellung benötigt werden: Für die PEM-Elektrolyse braucht man **Iridium** und **Platin**, für die AEL-Elektrolyse **Nickel**, für die SOEC-Elektrolyse **Scandium** und **Yttrium**.<sup>16</sup> Iridium wird beispielsweise nur zusammen mit Platin gefördert, vor allem in Südafrika.<sup>17</sup>

Diese Rohstoffe werden von deutschen Herstellern über den freien Weltmarkt bezogen, wo sie teils starken Preisschwankungen und teilweise auch künstlicher Verknappung durch die Produzenten unterliegen. Im Rahmen des erwarteten internationalen Elektrolyseurhochlaufs muss davon ausgegangen werden, dass sich diese Materialien weiter verknappen.

„Die aktuell geförderte Menge an Iridium weltweit reicht definitiv nicht aus, um die angestrebte Elektrolyseleistung in Europa wie geplant aufzubauen.“

Damit werden die Preise hoch bleiben beziehungsweise besteht im Fall von **Iridium und Scandium** sogar die **Möglichkeit, dass die Nachfrage das verfügbare Material übersteigt**. So heißt es in Szenarien, die einen schnellen Aufwuchs der Elektrolyseurbranche annehmen, dass der Bedarf an Iridium bis 2040 die aktuell verfügbare jährliche Produktionsmenge um ein Fünffaches überschreiten würde.

Der wichtigste Scandiumproduzent weltweit ist China mit über 75 Prozent der globalen Produktion.<sup>18</sup> Der Yttriumbedarf würde bis 2040 knapp 80 Prozent der derzeitigen Jahresabbaumenge (Bergwerksförderung 2018: 9,1 Tonnen; Yttriumbedarf im Szenario bis 2040: 7 Tonnen) nur für die Elektrolyseurherstellung

ausmachen.<sup>19</sup> Yttrium wird zukünftig aber ebenfalls für die Herstellung von Solid-Oxide-Fuel-Cell(SOFC)-Brennstoffzellen oder die Herstellung von Leuchtstoffen benötigt werden.

Um den Markthochlauf von Elektrolyseuren in Deutschland nicht zu gefährden und die Versorgung mit kritischen Rohstoffen sicherzustellen, sollten kurzfristig **Rohstoffpartnerschaften** zum Beispiel mit Südafrika (Iridium/Platin) oder den Philippinen (Nickel) geschlossen werden.<sup>20</sup> China verfolgt eine Rohstoffstrategie für Zukunftstechnologien, die den proaktiven Kauf von Minen beziehungsweise Explorations- und Abbaurechten beinhaltet. Die Befragten berichten, dass derzeit in Südafrika und Simbabwe vermehrt chinesische Aktivitäten zur Absicherung von PEM-Elektrolyse-relevanten Rohstoffen wahrzunehmen sind.

„China ist sehr gut darin, Zugriff auf Rohstoffe abzusichern. Wir sind eher schlecht darin.“

Damit die Abhängigkeit von Importen dieser wertvollen, kritischen Rohstoffe zukünftig sinkt, ist es wichtig, den benötigten Rohstoffbedarf durch FuE weiter zu senken sowie **Circular-Economy-Ansätze** für die Wiedergewinnung und erneute Nutzung dieser Rohstoffe zu entwickeln. So wird zu der Senkung des Iridiumgehalts bei PEM-Elektrolyseuren geforscht. Auf existierenden Forschungsprojekten, die Ansätze für Recycling und Circular Economy ergründen, zum Beispiel im Rahmen von H<sub>2</sub>Giga, sollte aufgebaut werden.

## Komponenten

Bei einigen Komponenten, etwa **Diaphragmen** oder **Membranen**, gibt es – je nach Elektrolyseurtyp – nur **Single-Source-Lieferanten**. Expertinnen und Experten berichten, dass es hier gerade für kleinere Hersteller schwierig sein kann, verlässliche Lieferbeziehungen zu etablieren. So berichten einzelne Befragte, von einem einzigen japanischen AEL-Diaphragma-Hersteller abhängig zu sein.

13 | Dies entspricht zum Beispiel 2.000 Elektrolyseuren mit einer Nennleistung von 5 Megawatt.

14 | Vgl. Ariadne Kopernikus-Projekt 2022; Nationaler Wasserstoffrat 2021.

15 | Vgl. Ariadne Kopernikus-Projekt 2022.

16 | Vgl. DERA 2022.

17 | Vgl. DERA 2021.

18 | Vgl. DERA 2022.

19 | Vgl. ebd.

20 | Vgl. BDI 2022; SWP 2022.



Eine **Diversifizierung der Herstellerlandschaft** bei den genannten Komponenten wäre aus Resilienzgründen **wünschenswert** (siehe auch acatech IMPULS *Resilienz als wirtschafts- und innovationspolitisches Gestaltungsziel*). Nach Einschätzung der Expertinnen und Experten wäre das Know-how hierfür in Europa vorhanden.

Darüber hinaus sehen die Befragten im Hinblick auf weitere benötigte Komponenten wie Elektronikbauteile oder Dichtungen (siehe auch Abbildung 3) keine Verfügbarkeitsprobleme.

### Stack- und Elektrolyseurherstellung

Das Kernstück eines Elektrolyseurs sind die einzelnen **Zellen**, die aus jeweils einer gasdicht verpressten beschichteten Bipolarplatte und einer Membran bestehen, die dann zu den **Stacks** „gestapelt“ werden. Gerade die Automatisierung des Stacking-Prozesses ist äußerst komplex, weshalb dieser Schritt meist noch in Handarbeit stattfindet. Hier gilt es Ansätze für eine industriell skalierbare Fertigung zu entwickeln.

„Der Zusammenbau von Elektrolyseuren ist die Königs-  
klasse des Maschinenbaus.“

Um dieses Kernstück werden – je nach Hersteller und Elektrolyseurtyp unterschiedlich groß – die restlichen notwendigen Komponenten wie Wasser- beziehungsweise Stromanschluss, Kühlung, Kontroll- und Steuerungssysteme angeschlossen. Die meisten Hersteller setzen hierbei inzwischen auf standardisierte **Containerlösungen**: Diese können von circa mikrowellengroßen Elektrolyseuren bis hin zu schiffscontainergroßen reichen.<sup>21</sup>

Einige der Befragten sind der Einschätzung, dass es aktuell in Deutschland zu wenige Unternehmen gibt, die als **Systemintegratoren** fungieren, um Stacks und Komponenten zu effizienten Elektrolyseuren zu integrieren. Andere Expertinnen und Experten hingegen sehen hierin kein Problem.

Da viele der für den Elektrolyseurbau notwendigen Kompetenzen gut zu der in Deutschland vorhandenen **Expertise bei Automobilzulieferern** passen, sollten erfolgreiche Initiativen wie die **Nutzung** von Räumlichkeiten eines Automotive-Zulieferers inklusive der Weiterbildung der dort arbeitenden Fachkräfte im Hinblick auf die Elektrolyseurherstellung dahingehend geprüft werden, ob sie als **Best Practices** breit umgesetzt werden könnten. Die Fähigkeit deutscher Hersteller, vollständige Elektrolyseanlagen inklusive der elektrotechnischen Ausrüstung (Stromanschluss), der verfahrenstechnischen Komponenten (Verdichtung, Reinigung, Speicherung) und der notwendigen Steuerungstechnik liefern zu können, wird von den Befragten als Vorteil gewertet.

### Verteilung, Transport und Nutzung von Wasserstoff beziehungsweise Wasserstoffderivaten

Die Nutzung von Elektrolyseuren ist besonders effizient, wenn **systemische Ansätze** realisiert werden, die eine **Nutzung der anfallenden Nebenprodukte** wie Wärme oder Sauerstoff vor Ort vorsehen.

Falls es keine Direktverwertung oder Speicherung des Wasserstoffs vor Ort gibt, braucht es eine **leistungsfähige Transportinfrastruktur**, in die der Wasserstoff eingespeist werden kann (siehe Kapitel 8).

Die Entscheidung, welcher Elektrolyseurtyp am sinnvollsten ist, ist größtenteils vom Nutzungsszenario abhängig. Für die Herstellung von **Wasserstoff-Folgeprodukten** als Teil der Prozesskette eines Chemieparks muss meistens eine Wasserstoffbereitstellung rund um die Uhr garantiert werden. Für diesen Anwendungszweck eignen sich vor allem AEL- oder SOEC-Elektrolyseure. Für dezentrale Nutzungszwecke, etwa Wasserstofftankstellen, Notstromaggregate oder Schweißgeräte, werden bevorzugt PEM-, aber auch AEM-Elektrolyseure verwendet, da sie eine bessere dynamische Nutzung ermöglichen.

Zukünftig wird auch der Aufbau eines **Servicegeschäfts** an Bedeutung gewinnen, da im Rahmen notwendiger Instandhaltungsmaßnahmen je nach Elektrolyseurtyp alle 6 bis 20 Jahre die Membranen zu ersetzen sind.

21 | Vgl. Neugebauer 2022.

## 4 Marktprognosen Elektrolyseure

Mit einer global steigenden Nachfrage nach grünem Wasserstoff wird auch die Elektrolyseurnachfrage bis 2030 deutlich steigen. Neben dem weiterhin wachsenden Markt für AEL-Elektrolyseure wird prozentual vor allem bei PEM-Elektrolyseuren ein starkes Wachstum erwartet. Insgesamt wird sich nicht ein Elektrolyseurtyp durchsetzen, sondern es werden je nach Einsatzszenario unterschiedliche Technologietypen verwendet werden.

Global wird grüner Wasserstoff als Schlüsseltechnologie angesehen.<sup>22</sup> Da künftig mit einem großen und steigenden Bedarf an grünem Wasserstoff in unterschiedlichsten Branchen gerechnet wird, zählen Elektrolyseure zudem zu den **Wachstumstechnologien** (siehe Abbildung 4).

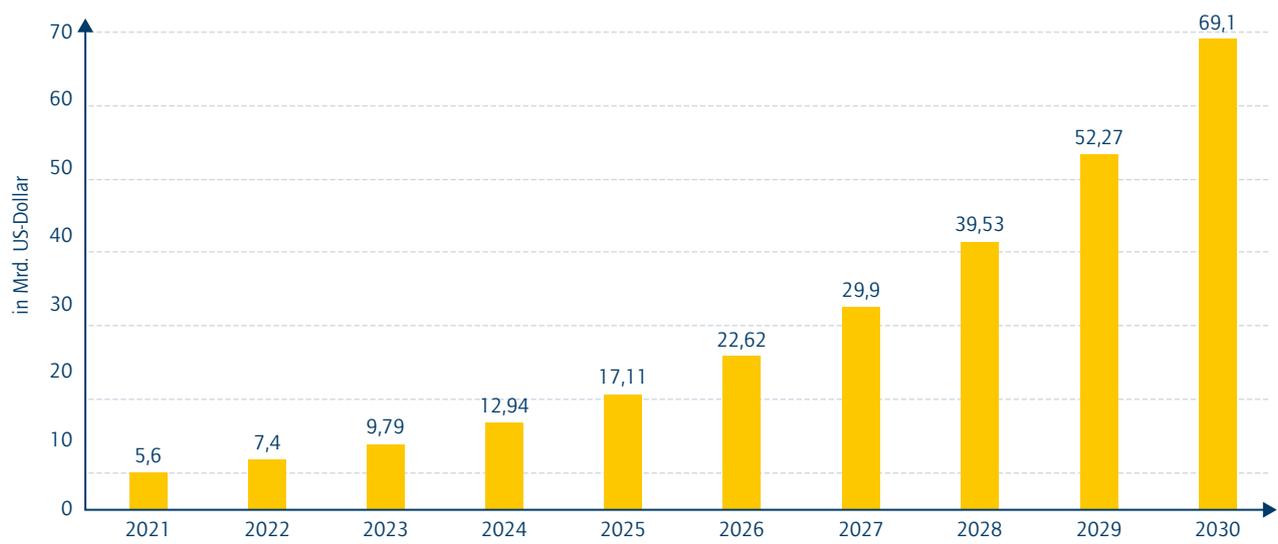


Abbildung 4: Größe des Elektrolyseurmarktes 2021–2030 (Quelle: eigene Darstellung basierend auf Precedence Research 2022)

Die nachfolgend **aufgeführten Zahlen** und Einschätzungen aus Marktstudien sind jedoch **mit Vorsicht zu genießen**: Aufgrund unvorhersehbarer Entwicklungen und veränderter politischer Rahmenbedingungen können die prognostizierten Zahlen schnell obsolet werden. So stammen alle zitierten Zahlen aus der Zeit vor der Verabschiedung des Inflation Reduction Act (IRA)<sup>23</sup> in den

USA<sup>24</sup>, welcher von den befragten Expertinnen und Experten als starker Boost für die dortige Elektrolyseurindustrie gewertet wird. Zudem ist nur ein beschränkter Einblick in die chinesischen Aktivitäten möglich, sodass hier seit Längerem große Unsicherheiten in Bezug auf verlässliche Prognosen bestehen.

22 | Vgl. FfE 2022.

23 | Im August 2022 trat in den USA der Inflation Reduction Act (IRA) in Kraft. Der IRA umfasst ein Gesamtfördervolumen von 738 Milliarden US-Dollar, wovon 391 Milliarden US-Dollar für Ausgaben zur Stärkung der Energiewirtschaft und zur Bekämpfung des Klimawandels vorgesehen sind. Insgesamt soll dadurch auch die Wasserstoffwirtschaft vor Ort gestärkt werden. Die Förderung erfolgt im Rahmen einer Steuergutschrift. Die Förderhöhe für Wasserstoffproduzenten erfolgt auf Basis des pro Kilogramm produzierten Wasserstoffs eingesparten CO<sub>2</sub>-Wertes. Elektrolyseure, die grünen (= CO<sub>2</sub>-neutralen) Wasserstoff erzeugen, werden dabei mit dem Höchstfördersatz unterstützt. Die Spannweite reicht von 0,60 US-Dollar für fossilen Wasserstoff bis zu 3,00 US-Dollar für CO<sub>2</sub>-freien Wasserstoff. Die Förderung ist vor allem für Local Content vorgesehen, was darauf abzielt, heimische Produzenten gezielt zu fördern.

24 | Vgl. 117th Congress of the United States of America 2022.



„Wenn man JETZT den Weltmarkt gewinnen will, muss man JETZT handeln und nicht nur weiter auf Forschung und Entwicklung setzen.“

2021 wurde der globale Elektrolyseurmarkt auf circa 5 Milliarden US-Dollar geschätzt. Bis 2030 ist ein Wachstum auf bis zu über 65 Milliarden US-Dollar möglich. Je nach Marktstudie wird **bis 2030 mit einer jährlichen Zuwachsrate des Marktes von circa 6 bis zu über 30 Prozent gerechnet.**<sup>25</sup>

## 4.1 Marktprognosen nach Weltregionen

Drei Weltregionen werden besonders gute Wachstumschancen vorhergesagt: **Nordamerika** (hier sind sowohl die USA als auch Kanada stark), **Europa** – Deutschland wird hier als großer Treiber des Wachstums eingeschätzt – sowie der asiatisch-pazifische Raum (**Asia Pacific**), wo das Wachstum vor allem von Japan und China getrieben wird.<sup>26</sup>

Obwohl **China** derzeit der größte globale Wasserstoffproduzent ist, ist nur ein Prozent des dort produzierten Wasserstoffs aktuell grün. Die chinesische Regierung will primär den Aufwuchs der Wasserstoffwirtschaft insgesamt fördern, die Umstellung auf grünen Wasserstoff ist ein sekundäres Ziel („industry development first, greening second“).<sup>27</sup>

Aufgrund starker staatlicher Eingriffe in den Markt ist die Entwicklung von Technologien in China – so auch von Elektrolyseuren – zum Teil von der globalen Marktlogik entkoppelt. Da die chinesische Parteispitze bis 2030 bis zu einhundert Gigawatt installierte Elektrolyseleistung anvisiert<sup>28</sup>, sind die Effekte einer

dafür forcierten Skalierung für die chinesischen Hersteller und deren Rolle auch auf dem Weltmarkt nicht zu unterschätzen (siehe Kapitel 5.2).

In den globalen Marktstudien werden folgende **deutsche Hersteller zu den global führenden Elektrolyseherstellern** gezählt: Siemens Energy, Linde, Sunfire GmbH und H-Tec.<sup>29</sup> Die Befragten schätzen zudem auch thyssenkrupp nucera als starken internationalen Player ein.

Sie bewerten es zudem insgesamt als Stärke des deutschen Marktes, dass es dort eine diverse Elektrolyseur-Herstellerlandschaft gibt – sowohl in Bezug auf die Größe der Unternehmen als auch in Bezug auf die Elektrolyseverfahren (für einen Überblick über die deutsche Elektrolyseur-Herstellerlandschaft siehe auch Kapitel 5.1).

## 4.2 Marktprognosen nach Elektrolyseurtypen

Aktuell dominiert die alkalische Elektrolyse (AEL) den globalen Markt und es wird hier ein stetiger Zuwachs bis 2030 erwartet, begründet durch die erprobte Stabilität der Technik.<sup>30</sup> Prozentual wird bei PEM-Elektrolyseuren bis 2030 der größte Zuwachs erwartet<sup>31</sup>. Zur AEM beziehungsweise SOEC liegen keine belastbaren Zahlen vor.

Die Expertinnen und Experten sind der Überzeugung, dass sich mittelfristig nicht ein einzelner Elektrolyseurtyp durchsetzen wird, sondern abhängig vom Einsatzszenario die **unterschiedlichen Elektrolyseurtypen nebeneinander bestehen bleiben** werden – es ist also mit einem die Technologieplattformen übergreifenden Branchenwachstum zu rechnen.

25 | Vgl. Allied Market Research 2021; Fortune Business Insights 2022; Global Market Insights Inc. 2022; Precedence Research 2022.

26 | Vgl. Fortune Business Insights 2022.

27 | Vgl. MERICS 2022.

28 | Vgl. ebd.

29 | Vgl. Fortune Business Insights 2022; Global Market Insights Inc. 2022.

30 | Siehe ebd.

31 | Vgl. Allied Market Research 2021.

## 5 Elektrolyseur-Herstellerlandschaft Deutschland

Deutschlands Elektrolyseur-Herstellerlandschaft deckt alle Arten der Elektrolyse ab und verfügt international über einen guten Ruf. Sie beinhaltet dabei sowohl Start-ups als auch etablierte deutsche Unternehmen. Deutschland gehört damit zur Weltspitze der Elektrolyseurherstellung, aber auch andere Länder wie die USA, Kanada, Japan und China sind bereits stark aufgestellt und bauen proaktiv die Wettbewerbsfähigkeit der jeweils heimischen Industrie aus.

Auch dank **frühzeitiger und intensiver Förderung** durch die Bundesregierung ist die Forschungs- und Entwicklungslandschaft für Elektrolyseure in Deutschland gut aufgestellt. Die Expertinnen und Experten loben Programme wie das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP)

sowie das derzeit laufende BMBF-Leitprojekt H<sub>2</sub>Giga.<sup>32</sup> Regionale Förderprogramme – zum Teil eingebettet in regionale Wasserstoffstrategien – ergänzen zudem die nationalen Förderrichtlinien.

Unter anderem als Ergebnis dieser umfassenden Förderung sind **deutsche Elektrolyseurhersteller** aktuell **Technologieführer** und genießen international einen guten Ruf.

„Deutschland ist stark aufgestellt bei Wasserstoff, wir müssen aber auch aufpassen, diesen Vorsprung zu halten. Wir dürfen uns nicht auf unserem Vorsprung ausruhen.“

### 5.1 Überblick über deutsche Elektrolyseur-Herstellerlandschaft

Die nachfolgende Abbildung 5 bietet einen Überblick über die aktuelle Herstellerlandschaft in Deutschland:



\*Reine Stack-Produzenten

Abbildung 5: Überblick über die deutsche Elektrolyseur-Herstellerlandschaft (Quelle: eigene Darstellung)

32 | Vgl. BMBF 2022; BMWK 2016.



## 5.2 Internationaler Überblick über Elektrolyseur-Herstellerlandschaft

**Deutschland** gehört nach Einschätzung der Expertinnen und Experten technologisch zu den Innovationsführern, und deutsche Elektrolyseurhersteller gehören zu den **Top 3 oder Top 5** Ländern in Bezug auf Marktanteile. Auch verschiedene Marktstudien sehen Deutschland als international starken Player.<sup>33</sup>

Darüber hinaus verfügen vor allem nachfolgende Länder ebenfalls über eine starke Elektrolyseur-Herstellerlandschaft:

- **USA:** unter anderem Plug Power, Cummins, Teledyne Energy Systems
- **Kanada:** unter anderem Hydrogenics, Next Hydrogen

- **Japan:** unter anderem Asahi Kasei, TOSHIBA
- **China:** unter anderem Suzhou Green Hydrogen, PERIC Hydrogen Technologies
- **Norwegen:** unter anderem Nel ASA
- **UK:** unter anderem ITM

Das stärkste Marktwachstum im Bereich der Elektrolyseurherstellung wird in Nordamerika, Europa und im asiatisch-pazifischen Raum erwartet. Die nachfolgende Tabelle (siehe Abbildung 6) fokussiert daher auf das regional jeweils stärkste Land und stellt dessen Stärken, aber auch Schwächen heraus:

Deutschland		USA		China	
	starke Förderlandschaft für Hersteller (H2Giga etc.)		Incentivierung des Marktes durch Inflation Reduction Act		staatliche Förderung (zum Beispiel durch Fünfjahresplan)
	Expertise im Maschinen- und Anlagenbau		gute Skalierbarkeit durch großen heimischen Markt (derzeit global größter Markt)		gute Skalierbarkeit durch großen heimischen Markt
+	diverse Herstellerlandschaft: Start-ups und etablierte Unternehmen	+	großes Investmentvolumen für Start-ups (ermöglicht starke Beteiligung an Großprojekten)	+	gute Absicherung der Rohstoffversorgung durch heimische Quellen
	Diversität der Produktion (Fertigung aller Elektrolyseurtypen)		Diversität der Produktion (Fertigung aller Elektrolyseurtypen)		aktives Recruiting von Fachkräften durch gezielte Ausbildung
	hohe Qualität und hoher Wirkungsgrad der Elektrolyseure		kurbelt Nachfrage an: zügiger und großflächiger Wasserstoffinfrastruktur-Ausbau		günstige Preise für Elektrolyseure
o	Fachkräfteverfügbarkeit (aktuell in Ordnung; Prognose: Fachkräftemangel)	o	Fachkräfteverfügbarkeit	o	Diversität der Produktion (starker Fokus auf Alkalielektrolyse)
-	hohe Abhängigkeiten von Rohstoffimporten	-	hohe Abhängigkeiten von Rohstoffimporten (aufgrund lokaler Rohstoffvorkommen leicht bessere Situation als in Deutschland)	-	aktuell mindere Qualität und geringerer Wirkungsgrad der Elektrolyseure

Abbildung 6: Stärken und Schwächen deutscher, amerikanischer und chinesischer Elektrolyseurhersteller im Vergleich (Quelle: eigene Darstellung)

33 | Vgl. Allied Market Research 2021; Fortune Business Insights 2022; Precedence Research 2022.

**Deutsche und europäische Elektrolyseurhersteller** genießen laut Einschätzung der Expertinnen und Experten international ein **hohes Vertrauen**. Die Qualität und Langlebigkeit der Elektrolyseure wird als sehr gut eingeschätzt und ist durch Referenzanlagen belegt. Sie erzielen oftmals einen besonders hohen Wirkungsgrad, was vor allem für Länder mit einem höheren Strompreis ein wichtiges Kriterium ist.

Da fast alle in Deutschland hergestellten Elektrolyseure derzeit noch **in Manufaktur produziert** werden, sind sowohl die Kosten für Komponenten, die nur in geringer Stückzahl benötigt werden, als auch für die Arbeitszeit vergleichsweise hoch.

Um eine rasche Marktdurchdringung sowie schnellere Feedback-Zyklen zu erreichen, sollte nach Einschätzung einiger Befragter auch mehr FuE in Richtung Minimum Marketable Produkt (MMP) unterstützt werden.

„Derzeit genießen wir in Deutschland einen Vertrauensvorschluss beim Thema Qualität.“

**Chinesische Hersteller** produzieren – wohl auch durch staatliche Subventionen – Elektrolyseure, die deutlich **günstiger** als deutsche beziehungsweise europäische Produkte sind. So wird berichtet, dass die Preise bei einigen Modellen bei nur rund zwanzig Prozent der Kosten europäischer Modelle lägen.<sup>34</sup> Die Expertinnen und Experten sind sich einig, dass die Qualität chinesischer Elektrolyseure aktuell noch nicht mit den internationalen Spitzenmodellen mithalten kann.

„Wir haben eine echte ernst zu nehmende Gefahr aus China, wenn die jetzt schon Alkalielektrolyseure – zwar noch mit schlechterer Qualität – für maximal fünfzig Prozent der Kosten herstellen.“

Uneins sind sich die Befragten, wie groß die **Gefahr** ist, dass **China mittelfristig zum (Mit-)Marktführer aufsteigt**: Ihrer Einschätzung nach könnten je nach Einsatzszenario günstige chinesische Elektrolyseure in Regionen mit viel Überschussstrom erfolgreicher als teurere europäische Produkte sein, da der niedrigere Wirkungsgrad eine nachgeordnete Rolle spielt. Einige Befragte sind jedoch auch der Überzeugung, dass die höhere Qualität deutscher und europäischer Elektrolyseure auch mittelfristig für einen Marktvorsprung sorgen wird. Die von den befragten Expertinnen und Experten gesehene Notwendigkeit, die Herstellungskosten in Deutschland und Europa durch Skalierung und Automatisierung zu senken, wäre in jedem Fall ein entscheidender Schritt zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit gegenüber China.

Damit **Deutschland** im wissenschaftlich, wirtschaftlich und auch politisch hochdynamischen Feld der Elektrolyseurherstellung **seine gegenwärtig gute internationale Position behaupten und eventuell sogar ausbauen** kann, muss die europäische Antwort auf den technologieoffenen amerikanischen IRA schnell, unbürokratisch und pragmatisch umgesetzt werden und in ihren Ambitionen deutlich über den Green Deal Industrial Plan hinausgehen. Der Wasserstoffwirtschaft müssen hierzulande zum IRA konkurrenzfähige Bedingungen geschaffen werden, um eine Abwanderung heimischer Hersteller und Kompetenzen zu verhindern (siehe Handlungsoption 1).



## 6 Rahmenbedingungen für den Hochlauf deutscher Elektrolysekapazitäten

Der Aufwuchs einer wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft in Deutschland ist sowohl aus Wertschöpfungsperspektive als auch energiepolitisch ein wünschenswertes Ziel, das politischer Begleitung bedarf. Damit die Industrie ihre Prozesse auf Wasserstoff umstellen kann, muss die Frage von Wasserstoffimporten zu kompetitiven Preisen adressiert werden. Zudem werden Betriebskosten zu einem guten Anteil von gestaltbaren Rahmenbedingungen beeinflusst, weswegen deren innovationsfreundliche Ausgestaltung eine zentrale Rolle für die Ermöglichung von Geschäftsmodellen spielt.

Es gibt gute Gründe für die Ermöglichung eines wettbewerbsfähigen **Betriebs von Elektrolyseuren in Deutschland**:

- Deutsche Hersteller können die in Deutschland stehenden Anlagen als ihren „**Showroom**“ und als Referenzen für internationale Interessenten nutzen.
- Durch den Betrieb in Deutschland können die Hersteller „vor Ort“ Erfahrungen mit den eingesetzten Elektrolyseurtypen sammeln und Lehren für die **Weiterentwicklung der Technologie** ziehen, was wichtig ist, um den Innovationsvorsprung zu halten.
- Der Betrieb von Elektrolyseuren in Deutschland ist ein wichtiger Baustein der Energiewende und trägt zur **Verringerung von Abhängigkeiten bei der Energieversorgung** bei.
- Elektrolyseure und grüner Wasserstoff können beim weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien zur **Netzstabilität** in Deutschland beitragen.

### 6.1 Elektrolyse-Ausbauprognosen versus Bedarfe

In Deutschland sind knapp doppelt so viele Elektrolyseprojekte geplant beziehungsweise im Bau wie aktuell bereits in Betrieb.<sup>35</sup> Sprich: Es wird ein starker Zuwachs an Elektrolysekapazitäten erwartet. Doch selbst wenn man die Leistung aller derzeit geplanten Projekte zusammenrechnet, **werden die 2030 in Deutschland zur Verfügung stehenden Elektrolysekapazitäten** weit hinter den politischen Ausbauzielmarken des Koalitionsvertrags der Bundesregierung von zehn Gigawatt bis 2030<sup>36</sup> und **weit hinter den tatsächlichen Bedarfen zurückliegen** (siehe Abbildung 7).

„Die Politik sollte weniger von neuen Zielen sprechen, sondern fragen: Wie kriegen wir die geplanten Vorhaben zum Laufen?“

Ähnlich wie bei anderen Energieträgern wird **Deutschland bei Wasserstoff** auch ein **Energieimportland** bleiben. Ein beschleunigter Ausbau von Elektrolysekapazitäten kann auch einen Teil der deutschen Bedarfe abdecken, aber ein **Großteil des Bedarfsdeltas muss durch Importe gedeckt** werden. Spiegelbildlich zu Importstrategien für Wasserstoff sollte Deutschland daher eine explizite Exportstrategie für Elektrolyseure entwickeln.

Einige Expertinnen und Experten geben beim Thema Importe zudem zu bedenken, dass der freie Marktpreis für grünen Wasserstoff in den nächsten Jahren deutlich über den tatsächlichen Produktionskosten liegen könnte, da international nur eine begrenzte und heiß umkämpfte Menge an grünem Wasserstoff zur Verfügung stehen wird. Sie raten der Bundesregierung daher zu einer klaren **Importstrategie** und zum Ausbau bilateraler **Wasserstoffpartnerschaften**.

Der ausreichende **Import** von grünem Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen ist **unerlässlich**, damit Unternehmen heute und in naher Zukunft die **Umstellung auf Wasserstoff basierte Prozesse in der Industrie** planen und umsetzen können.

35 | Vgl. Wasserstoff Kompass 2022.

36 | Vgl. SPD et al. 2021.

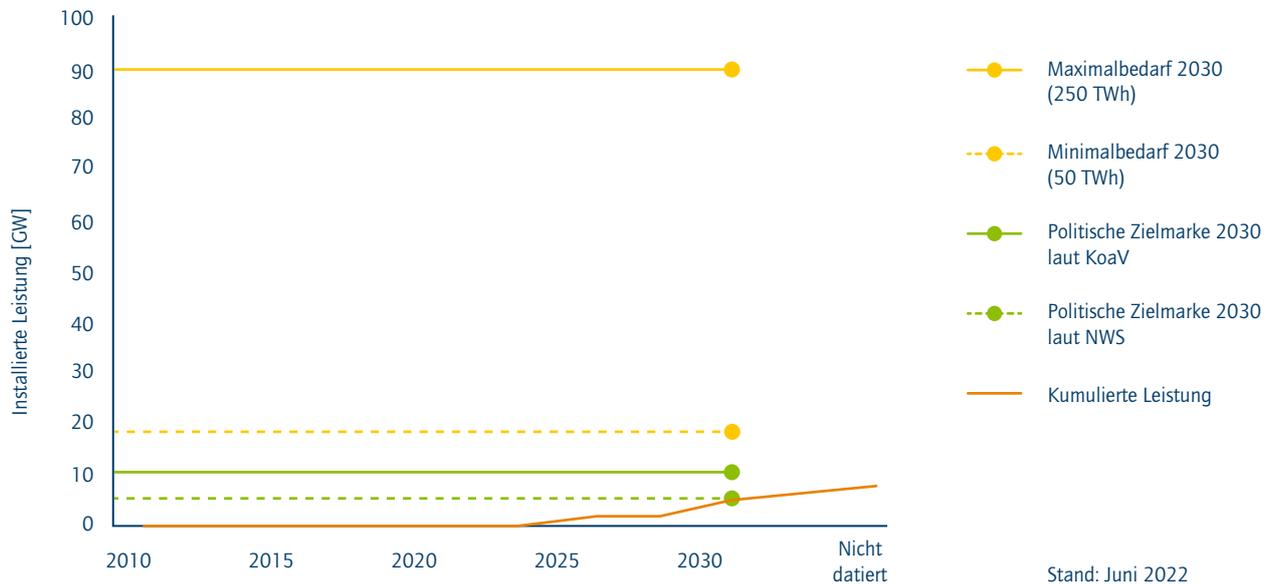


Abbildung 7: Überblick über geplante Elektrolysekapazitäten in Deutschland (Quelle: eigene Darstellung basierend auf dem Wasserstoff Kompass 2022)

Initiativen wie **H2 Global**, die im Rahmen ihres Doppelauktionsmodells wettbewerbsfähige Preise für (importierten) grünen Wasserstoff für die Abnehmerindustrie ermöglichen<sup>37</sup>, sollten **weitergeführt** und auch im europäischen Rahmen, etwa über die Verzahnung von H2 Global mit der Europäischen Wasserstoffbank<sup>38</sup>, **ausgeweitet** werden.

einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien und günstigeren Stromkosten wie Portugal oder der MENA-Region spielt der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs eine weniger wichtige Rolle als für Anwendungen in Deutschland, wo der Strompreis deutlich höher liegt und ein hoher Wirkungsgrad mit entscheidend ist, um ein tragfähiges Geschäftsmodell zu realisieren.

## 6.2 CAPEX- und OPEX-Kosten

Je nach Reifegrad der Technologie und der benötigten Rohstoffe (siehe Kapitel 1) sind die derzeit auf dem Markt verfügbaren Elektrolyseure unterschiedlich teuer in der Anschaffung. Deutsche beziehungsweise europäische Produkte sind in der Regel teurer als beispielsweise chinesische Fabrikate, haben dafür aber einen höheren Wirkungsgrad und eine erprobte Verlässlichkeit im Betrieb (siehe Kapitel 5.2).

Da der Betrieb von Elektrolyseuren sehr stromintensiv ist, spielt der Strompreis eine entscheidende Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit der Betriebskosten. Der **Strompreis in Deutschland liegt deutlich über dem EU-Durchschnittspreis**.<sup>39</sup> In Ländern mit

„Wir werden in Deutschland nie in die gleichen Strompreisregionen von circa 1,5 Cent die Kilowattstunde kommen, wie zum Beispiel die MENA-Regionen.“

Um diesem Ungleichgewicht entgegenzuwirken und den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland voranzutreiben, regen einige Expertinnen und Experten deshalb zu staatlichen **OPEX-Förderungen** an. Ein Ansatz hierfür wäre zum Beispiel, dass der Staat für den Betrieb von Elektrolyseuren **beim Strom auf Steuern, Umlagen und Zulagen verzichtet**, sodass dadurch ein international wettbewerbsfähiger Strompreis für Geschäftsmodelle in Deutschland entsteht.

37 | Vgl. H2 Global 2022.

38 | Vgl. BMWK 2023.

39 | Vgl. Eurostat 2022.



Zudem sollte der **Aufbau des europäischen Strommarkts** mit Nachdruck vorangetrieben werden. In einigen EU-Mitgliedsstaaten wie den Niederlanden und Dänemark werden bis 2030 signifikante, lokale Überkapazitäten erwartet. Dort günstig produzierter und exportierter Grünstrom würde auch einen Beitrag zu wettbewerbsfähigen Strompreisen in Deutschland und ganz Europa leisten.

Da der Einsatz von Elektrolyseuren in strom- beziehungsweise windreichen Ländern einen beachtlichen Teil des Elektrolyseur-Weltmarktes ausmachen wird, sollten deutsche Hersteller sich

überlegen, ob sie sich auch hier Marktanteile sichern wollen – was bedeutet, dass sie sich dem Preisdruck aus Asien stellen müssten – oder ob sie sich vorrangig auf technologisch besonders ausgereifte Elektrolyseure mit einem hohen Wirkungsgrad fokussieren möchten.

Durch die Beteiligung an **internationalen Großprojekten** können deutsche Hersteller auch außerhalb Deutschlands wichtige **Erfahrungen für eine skalierbare Produktion** in Deutschland sammeln und ihre Bekanntheit steigern (siehe Kasten unten).

### Wasserstoff-Großprojekte weltweit

Hersteller, die **bei internationalen Großprojekten Erfahrungen sammeln** können, können dieses Wissen für den Bau (Skaleneffekte) und Betrieb (Entwicklung der nächsten Elektrolyseurgeneration) ihrer Produktion im Heimatland gewinnbringend einsetzen.

Weltweit entstehen immer mehr Wasserstoff-Großprojekte, die nicht nur für den Aufbau einer lokalen grünen Wasserstoffwirtschaft, sondern auch für die Herstellung von Wasserstoff(derivaten) für den Weltmarkt stehen.

Nicht bei allen Großprojekten wird die geplante Elektrolysekapazität öffentlich genannt. Bei einigen Projekten sind die Informationen jedoch frei verfügbar: Dazu zählt das in Saudi-Arabien entstehende Projekt **NEOM** (2 GW AEL-Module von thyssenkrupp nucera). Ein weiteres Projekt ist

das **E-Methanol-Projekt** von European Energy in **Dänemark** (fünfzig Megawatt PEM von Siemens Energy). Bei beiden Projekten wird die Technologie von deutschen Herstellern geliefert.

Am **BASF-Standort Ludwigshafen** soll in Kooperation mit Siemens Energy ein PEM-Elektrolyseur mit einer Leistung von 54 Megawatt gebaut werden (geplante Inbetriebnahme: 2025). Der so produzierte Wasserstoff (bis 8.000 Tonnen pro Jahr) soll vorwiegend stofflich im Verbund genutzt werden.

Von internationaler Bedeutung sind besonders auch die Aktivitäten der US-Hersteller Plug Power (PEM; Kooperation mit Lhyfe, Frankreich), Cummins (AEL & PEM; baut in Spanien ein Fertigungswerk) sowie Bloom Energy (SOEC).

# 7 Deutsche und europäische Gesetzeslage und Vorgaben

Um bei der Planung, beim Bau und Betrieb von Elektrolyseuren Sicherheitsstandards zu gewährleisten, geben auf deutscher und europäischer Ebene unterschiedliche Gesetze einen Rahmen vor. Eine zentrale Rolle spielen dabei unter anderem das BImSchG auf deutscher und die RED auf europäischer Ebene. Ziel sollte eine befähigende Gesetzgebung sein, die eine schnelle Genehmigung und einen sicheren Betrieb von Elektrolyseuren ermöglicht.

Regulatorische Vorgaben und Rahmenbedingungen bilden die Grundlage für die Einhaltung von Sicherheits-, Umweltschutz-, Arbeitssicherheits- sowie weiteren Anforderungen. Dabei greifen unterschiedliche Ebenen von berufsgenossenschaftlichen Vorgaben bis hin zu EU-Verordnungen ineinander. Abbildung 8 bietet einen hierarchischen Überblick über das komplexe Geflecht relevanter Gesetze, Verordnungen und Regelwerke.

Nachfolgend wird auf ausgewählte, zentrale regulatorische Vorgaben auf deutscher und europäischer Ebene eingegangen.

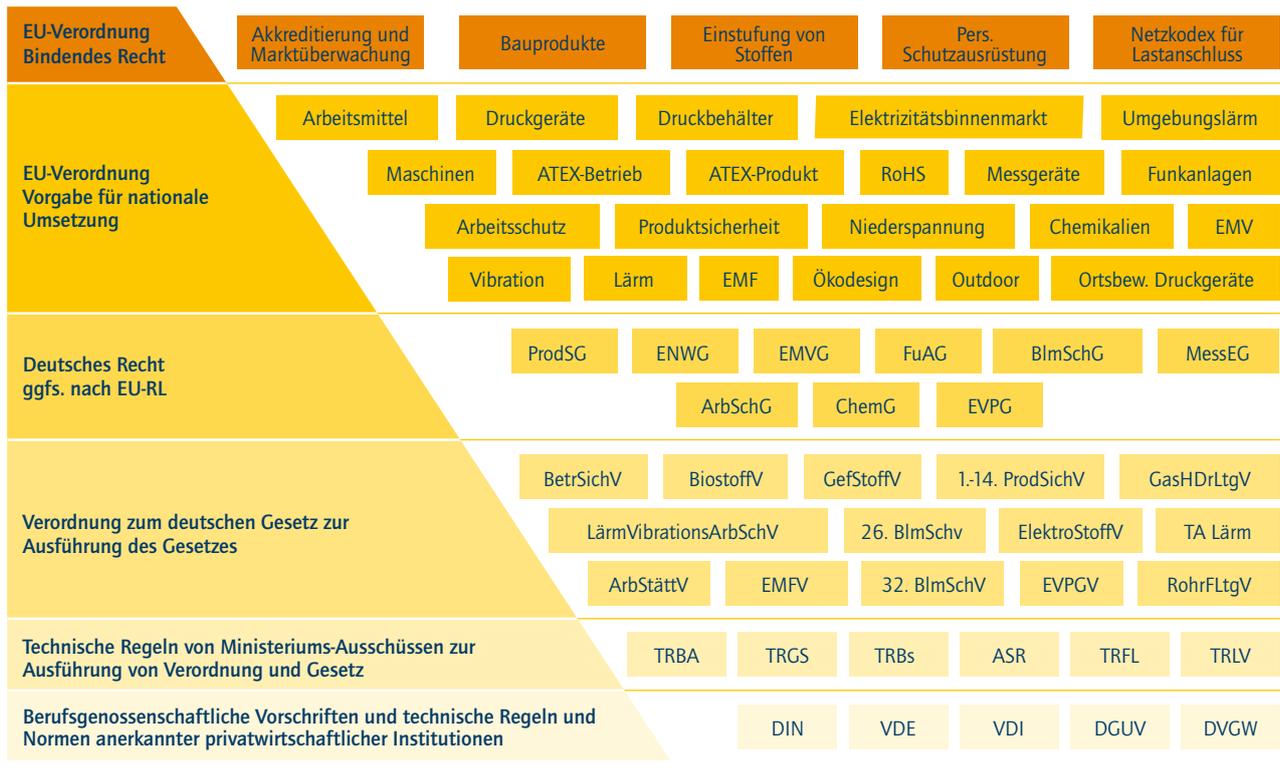


Abbildung 8: Hierarchischer Überblick über relevante Gesetze, Verordnungen und Regelwerk (eigene Abbildung auf Basis von BUW et al. 2020b)

ArbSchG: Arbeitsschutzgesetz; ArbStättV: Arbeitsstättenverordnung; ASR: Arbeitsstättenregeln; ATEX: ATEX-Richtlinien der Europäischen Union (abgeleitet vom franz. Atmosphères Explosives); BetrSichV: Betriebssicherheitsverordnung; BImSchG: Bundes-Immissionsschutzgesetz; BImSchV: Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes; BiostoffV: Biostoffverordnung; ChemG: Chemikaliengesetz; ElektroStoffV: Elektro- und Elektronikgeräte-Stoff-Verordnung; DGUV: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung; DIN: Deutsches Institut für Normung; ; DVGW: Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.; EMF: Elektromagnetische Felder; EMFV: Arbeitsschutzverordnung zu elektromagnetischen Feldern; EMV: Elektromagnetische Verträglichkeit; ENWG: Energiewirtschaftsgesetz; EVPG: Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz; FuAG: Funkanlagengesetz; GasHdRLtgV: Verordnung über Gashochdruckleitungen; GefStoffV: Gefahrstoffverordnung; LärmVibrationsArbSchV: Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung; MessEG: Mess- und Eichgesetz; ProdSG: Produktsicherheitsgesetz; ProdSichV : Produktsicherheitsverordnung; RoHS: EU-Richtlinie 2011/65/EU; RohrFLtgV: Verordnung über Rohrfernleitungsanlagen; TA Lärm: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm; TRBA: Technischen Regeln für Biologische Arbeitsstoffe; TRBS: Technische Regeln für Betriebssicherheit; TRFL: Technische Regeln für Rohrfernleitungen; TRGS: Technische Regeln für Gefahrstoffe; TRLV: Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen; VDE: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.; VDI: Verein Deutscher Ingenieure e. V.



## 7.1 Deutsche Gesetzeslage und Vorgaben

Das deutsche **Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)** ist die nationale Umsetzung der europäischen Industrieemissionsrichtlinie 2010/75/EU.

Im BImSchG sind dabei direkt relevant für Elektrolyseure die

- 4. Verordnung zur Durchführung des BImSchV, die **Betriebs-Genehmigungen** regelt sowie die
- 37. BImSchG, die die Rahmenbedingungen für die **Anerkennung (Anrechenbarkeit) synthetischer grüner Kraftstoffe** festlegt.

**Alle Elektrolyseure** fallen unter die 4. BImSchV und müssen somit unabhängig von ihrer Größe ein **förmliches Verfahren nach § 10 BImSchG** mit Öffentlichkeitsbeteiligung (beinhaltet: Bekanntmachung, Einwendungen der Bürgerinnen und Bürger sowie Erörterungstermine) durchlaufen. Ein Verfahren dauert dabei auch im besten Fall aktuell mindestens 24 Monate<sup>40</sup>.

Expertinnen und Experten berichten, dass vor allem Neuanlagen (Green Field) oftmals noch weitere bürokratische Auflagen wie Planfeststellungsverfahren nach sich ziehen. Der Einsatz von Elektrolyseuren in bestehenden Industriegebieten (Brown Field) wird als der üblicherweise schnellere Weg beschrieben. Da die jeweiligen **Zulassungsverfahren** den örtlichen Behörden unterliegen, erzählen die Befragten von **großen regionalen Unterschieden bei den Kompetenzniveaus in den regionalen Behörden** und auch teils stark abweichenden Bearbeitungszeiträumen.

„Es vergehen Jahre, bis Betriebsgenehmigungen vorliegen – hier müssen wir schneller werden.“

Für den **geplanten Elektrolyseurboom** in Deutschland mit dem Ausbauziel von 10 Gigawatt bis 2030 müssten **im Schnitt jährlich 500 Elektrolyseure** nach dem förmlichen Verfahren der 4. BImSchV mit Öffentlichkeitsbeteiligung zugelassen werden. Dies würde nach Einschätzung der Expertinnen und Experten zu einer starken Belastung bis hin zu einer Überlastung der regionalen Behörden führen.

Deswegen sollten, wie in Handlungsoption 2 gefordert, **kleinere Elektrolyseanlagen** unter 5 Megawatt mit einer geringen lokalen Wasserstoffspeicherung von unter 3 Tonnen Wasserstoff vor Ort **von förmlichen Genehmigungsverfahren gemäß der 4. BImSchV befreit** werden. Die Sicherheit von Elektrolyseuren wird abseits des BImSchG durch Typenzulassungen, Tests und Abnahmeprüfungen am Aufstellungsort nach Ansicht der dazu Befragten auf hohem Niveau garantiert.<sup>41</sup>

Einige Verbände fordern die Bundesregierung zudem auf, dass in der 37. BImSchV die **Anrechnung von grünem Wasserstoff auf die Treibhausgas-Minderungsverpflichtung** für die in den Verkehr gebrachten Kraftstoffe ermöglicht wird.<sup>42</sup> Dies würde in ihren Augen einen Beitrag zur Treibhausgasminde rung und damit zur Erreichung der Klimaziele leisten.

## 7.2 Europäische Gesetzeslage und Vorgaben

Verordnungen und Beschlüsse auf EU-Ebene gelten in allen Mitgliedsstaaten ab dem Tag ihres Inkrafttretens automatisch. **EU-Richtlinien müssen** hingegen von den Mitgliedsstaaten **in nationales Recht umgesetzt** werden (EU-KOM 2016).

Eine der zentral diskutierten EU-Richtlinien in Bezug auf den wirtschaftlichen Betrieb von Elektrolyseuren ist die **Erneuerbare-Energien-Richtlinie** (Renewable Energy Directive = **RED**). Die Diskussion um die Ausgestaltung von RED III ist aktuell noch im Fluss.

Nach RED II Artikel 27 (3) sollte die EU-Kommission bis zum 31.12.2021 die Strombezugs kriterien für die Erzeugung von grünem Wasserstoff für den Transportsektor detailliert in einem delegierten Rechtsakt festlegen. Da sich dieser delegierte Rechtsakt jedoch stark verzögerte, verlagerte sich die Diskussion um die Grünstromkriterien zeitweise mit in die Diskussion der RED III hinein. Am 14. September 2022 beschloss das **EU-Parlament Änderungsvorschläge für RED III** (EP 2022) und schlug dabei die Regelung der Grünstromkriterien direkt im Gesetzestext der RED sowie eine nach Ansicht der Befragten begrüßenswerte **Vereinfachung für die Klassifizierung von Grünstrom für die Nutzung zur Wasserstoffherzeugung** vor, was eine wichtige Voraussetzung für den Betrieb von Elektrolyseuren darstellen würde. So sollte etwa das **Zusätzlichkeitskriterium komplett wegfallen**.

40 | Vgl. BUW et al. 2020a.

41 | Vgl. BUW et al. 2020a; 2020b; NOW-GmbH 2020.

42 | Vgl. DWV/VDMA 2022.

Während die langwierige Diskussion zur Überarbeitung der RED auch nach einer Trilog-Einigung vom 30. März 2023 weiterhin anhält, wurden die Grünstromkriterien zur Wasserstoffherzeugung schließlich am 12. Februar 2023 in einem delegiertem Rechtsakt beschrieben. Die beschriebenen Kriterien sollen mit dem Abschluss der Diskussion um RED III auch auf den Industriesektor ausgeweitet werden:

Das **Zusätzlichkeitskriterium**, welches besagt, dass es eines Neubaus von regenerativen Energiequellen für den Betrieb von Elektrolyseuren bedarf, wurde um eine Befreiungsmöglichkeit in der Markthochlaufphase bis Ende 2027 ergänzt. Dies ermöglicht übergangsweise die Nutzung bereits existierender PV-Anlagen oder auch von Windrädern für die Herstellung von grünem Wasserstoff.

Das sogenannte **Gleichzeitigkeitskriterium** legt fest, dass regenerativ produzierter Strom innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters genutzt werden muss, damit dieser das Grün-Label erhält. Dadurch werden die Betriebszeiten erheblich eingeschränkt, was sich sowohl negativ auf die CAPEX-Kosten als auch auf die Verfügbarkeit von grün gelabeltem Wasserstoff auswirkt. Grundsätzlich ist eine stündliche Korrelation vorgesehen. Einige Expertinnen und Experten regten an, dieses Zeitfenster stärker auf mindestens monatlich zu weiten, um so einerseits die Wirtschaftlichkeit des Elektrolyseurbetriebs zu erhöhen und andererseits den bürokratischen Aufwand zu senken. Dies würde die Speicherung von erneuerbarem Strom zu Peakzeiten und die Nutzung zu einem späteren Zeitpunkt ermöglichen. Der delegierte Rechtsakt lässt eine monatliche Korrelation in einer Übergangsfrist bis Ende 2029 zu.

Ein weiteres Kriterium ist die **räumliche Korrelation** zwischen dem Strombezug des Elektrolyseurs und der erneuerbaren Stromerzeugung. Damit der Strombedarf von Elektrolyseuren die Netze nicht belastet, soll regenerativ produzierter Strom möglichst vor Ort verbraucht werden. Dies ist laut Einschätzung der Expertinnen und Experten jedoch nicht immer möglich (vor allem solange keine ausreichende Wasserstoffinfrastruktur für alle potenziellen Abnehmer zur Verfügung steht) und steht auch dem europäischen Ziel eines integrierten Stromnetzes und Strommarktes entgegen. Auch wenn die örtliche Nutzung regenerativen Stroms grundsätzlich sinnvoll ist, muss allen Abnehmern diskriminierungsfrei Zugang zu Grünstrom und Wasserstoff gewährt werden. Daher

halten die Befragten den **Ausbau von Strom- und Wasserstoffnetzen für den Elektrolyseurbetrieb für unerlässlich** (siehe Handlungsoption 3).

„Die größten Hürden kann und muss die Politik jetzt wegräumen.“

Im Gegensatz zu den final verabschiedeten Grünstromkriterien im delegierten Rechtsakt am 12. Februar 2023 hatte das EU-Parlament im Jahr 2022 eine **umfassende Lockerung der Kriterien für die Klassifizierung von Grünstrom** beziehungsweise grünem Wasserstoff nicht biologischen Ursprungs und die direkte Regelung der Kriterien in der Richtlinie im Rahmen des Revisionsprozesses zur Renewable Energy Directive vorgeschlagen. Dieser Vorschlag wurde von den befragten Expertinnen und Experten als ein richtiger erster Schritt begrüßt, um den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft europaweit zu beschleunigen.

Im Rahmen des delegierten Rechtsakts wurden anstelle der umfassenden Lockerung nun lediglich die oben beschriebenen zeitlich **begrenzten Möglichkeiten der Aussetzung des Zusätzlichkeitskriteriums bis Ende 2027 und der Lockerung des Gleichzeitigkeitskriteriums bis Ende 2029** festgelegt. Da ein Beharren der europäischen Kommission auf strikten Vorgaben für Grünstrom für den Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland und Europa extrem hinderlich gewesen wäre, ist die Möglichkeiten zur Aussetzung beziehungsweise zu Lockerungen der Grünstromkriterien grundsätzlich zu begrüßen. Um den insbesondere für die 2030er Jahre erwarteten verstärkten Markthochlauf an Elektrolyseuren nicht auszubremsen, könnten die Übergangsfristen jedoch zu kurz und die Kriterien insgesamt weiterhin zu kleinteilig gestaltet sein.

Die Ausdehnung der Grünstromkriterien vom Transportsektor auf den Industriesektor mit Abschluss der RED III wird die Nachfrage nach Wasserstoff nicht biologischen Ursprungs zudem massiv erhöhen. Deutschland sollte in Europa auch über die Übergangsfristen hinaus **weiterhin für eine Ausgestaltung der RED werben, welche neben Elektrolyse-Geschäftsmodellen** auch Wasserstoff auf biologischem Ursprung und CO<sub>2</sub>-arme Wasserstoffprojekte befähigt und sie nicht behindert.



## 8 Wasserstoff- infrastruktur

Für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft braucht es auch eine leistungsfähige Wasserstoffinfrastruktur. Neben dem notwendigen Ausbau der Kapazitäten des Stromnetzes für dezentrale Anwendungen muss auch der Wasserstofftransport über Pipelines ermöglicht werden. Letzteres ist der kosteneffizienteste Weg, um große Mengen Wasserstoff sicher zu transportieren.

Für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft und das Gelingen der Energiewende müssen **sowohl der Ausbau des Stromnetzes als auch der Ausbau der Pipeline-Infrastruktur** vorangetrieben werden. Wird Wasserstoff dezentral produziert, muss – falls nicht lokale erneuerbare Energiequellen zur Verfügung stehen – die Stromleitung an den jeweiligen Elektrolyseurstandorten entsprechend ausgebaut werden. Erfolgt die Produktion von Wasserstoff in Großanlagen, muss dieser durch ein Pipelinetzwerk zu den Verbrauchern gebracht werden.

„Ohne entsprechende Infrastruktur wird es keine Wasserstoffwirtschaft geben.“

Der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur sollte **auf Bestehendem aufbauen**: Bereits existierende **Stromtrassen beziehungsweise Gasnetze** sollen, wo möglich, verwendet werden. Historisch sind Stromnetze um zentrale Erzeuger gewachsen. Eine Stromleitung braucht bei der Transformation von fossilem zu reinem Grünstrom nicht umgerüstet werden, auch eine Stromrichtungsänderung ist kein Problem. Bei einem insgesamt höheren Strombedarf ist jedoch ein Netzausbau unausweichlich.

Bei notwendigen neuen Elementen für die Infrastruktur gilt es Lösungen zu finden, die einen Infrastrukturausbau in einem demokratischen Rahmen ermöglichen, ohne dass dieser Ausbau – wie aktuell oftmals der Fall – jahrelang durch lokale Protestbewegungen blockiert beziehungsweise verzögert wird.

### 8.1 Kosten und Kapazitäten

Auch wenn es sowohl ein Stromnetz- als auch ein Pipeline-Infrastrukturausbau braucht, sollte im konkreten Fall aus Gründen der Kosteneffizienz nur die jeweils sinnvollste Option verfolgt werden.

Vergleicht man die Übertragungskosten einer Stromleitung mit der einer Pipeline, so ist der **Transport per Pipeline die kostengünstigere Variante** bei einer Strecke von bis zu 1.500 Kilometern.<sup>43</sup>

Ein weiterer Vorteil von **Pipelines** besteht darin, dass die **Speicherkapazitäten** und transportierbaren **Volumina** die des Stromnetzes bei Weitem übersteigen.<sup>44</sup> Für Industrien mit sehr großen Wasserstoffbedarfen wie die Stahlindustrie ist der Anschluss an Pipelines deshalb unabdingbar. So verbrauchen beispielsweise Anlagen für die Direktreduktion von Eisenoxid bis zu 200 Tonnen Wasserstoff pro Stunde.

Der **Transport von Wasserstoff per Pipeline stellt kein erhöhtes Sicherheitsrisiko** dar (siehe Kasten rechts).

Gerade bei **Wasserstoffimporten** aus dem Ausland sind **Tanker**, die Wasserstoff beziehungsweise Wasserstoffderivate anliefern, oftmals günstiger als der Bau langer Pipelines oder die einzige technisch realisierbare Option. Zudem geben Expertinnen und Experten zu bedenken, dass die Importe mit Tankern flexibler bleiben und **keine einseitigen Abhängigkeiten** von einzelnen Ländern wie bei Pipelines (oder Stromtrassen) entstehen.

Die Befragten begrüßen daher den schnellen Ausbau der LNG-Terminals, die perspektivisch für die Einspeisung von Wasserstoff(derivaten) genutzt werden können.

„Mit einem Schiff kann man von niemandem erpresst werden. Bei Pipelines kann man nicht so einfach zwischen Lieferanten wechseln.“

43 | Vgl. SA 2018; SCI4Climate.NRW et al. 2021.

44 | Vgl. ENTSOE et al. 2021.

### Sicherheitseinschätzungen zur Wasserstoffinfrastruktur

**Wasserstoff** ist ungiftig, aber **hochentzündlich** – er zählt deshalb zu den Gefahrenstoffen.<sup>44</sup> Die **Gefahren**, die von Wasserstoff ausgehen, sind dennoch grundsätzlich **gut beherrschbar** und nicht größer als die Gefahren, die beispielsweise von Erdgas ausgehen.<sup>45</sup>

Da kleine rein lokale Elektrolyseurlösungen den industriellen Bedarf an Wasserstoff nicht decken können und perspektivisch auch importierter Wasserstoff verteilt werden muss, ist eine Wasserstoff-Netzinfrastruktur unumgänglich.<sup>46</sup> Wenn beim Bau der Infrastruktur die einschlägigen Sicherheitsvorkehrungen eingehalten werden, geht im Betrieb **kein**

**besonderes Risiko von Wasserstoffinfrastrukturen** aus.<sup>47</sup> Zudem ist heute bereits eine Beimischung von Wasserstoff in Gaspipelines möglich, ohne dass dadurch Sicherheitsrisiken steigen.<sup>48</sup>

Eines der häufigsten Wasserstoffderivate ist Ammoniak. Ammoniak ist ein explosiver Giftstoff, der sich schädlich auf die Gesundheit von Mensch und Umwelt auswirken kann.<sup>49</sup> Analog zu Wasserstoff wird jedoch der **Transport von Ammoniak ebenfalls als sicher und beherrschbar** eingestuft.<sup>50</sup>

## 8.2 Wasserstoff-Pipelinennetz

**Gaspipelines** können grundsätzlich für den Transport von Wasserstoff genutzt werden. Dafür müssen sowohl die Rohre als auch zum Beispiel Dichtungen und Armaturen **H<sub>2</sub>-ready** werden. Das Wasserstoff-Transportnetz sollte europäisch gedacht und aufgebaut werden.

Falls sich bei Wasserstoff die Erzeugungs- beziehungsweise Verbrauchsstellen im Vergleich zur bisherigen Erdgasnutzung regional verlagern, müssen Verdichterstationen unter Umständen auch „umgekehrt“ werden, um Wasserstoff entgegen der ursprünglichen Fließrichtung transportieren zu können.

Eine Minderheit der Expertinnen und Experten spricht sich dafür aus, dass die Wasserstoff-Pipelineinfrastruktur von Anfang an als komplett neue Infrastruktur parallel zu bestehenden Netzen entstehen soll. Die **Mehrheit der Befragten** ist für ein **Nachrüsten und eine Umnutzung bestehender Gaspipelines**.

Einig sind sich die Expertinnen und Experten darin, dass für die Wasserstoffinfrastruktur bestehende Schneisen und Trassen genutzt und die **Zerstörung von Umwelt möglichst minimiert** werden sollten.

Von **Vorteil** ist, dass es **zum Teil eine Deckungsgleichheit zwischen Gas- und Wasserstoffbedarfen** bei großen industriellen Abnehmern gibt. So kann in bestehenden Chemieparks auf eine vorhandene Gasinfrastruktur zurückgegriffen werden.

45 | Vgl. TÜV NORD 2022.

46 | Vgl. Hamacher 2014; Schmidtchen/Wurster 2013; TÜV SÜD 2022.

47 | Vgl. Neugebauer 2022.

48 | Vgl. TÜV SÜD 2022.

49 | Vgl. Neuman + Esser 2022.

50 | Vgl. Umweltbundesamt 2022.

51 | Vgl. Department of Homeland Security 2021; Duijm et al. 2005.

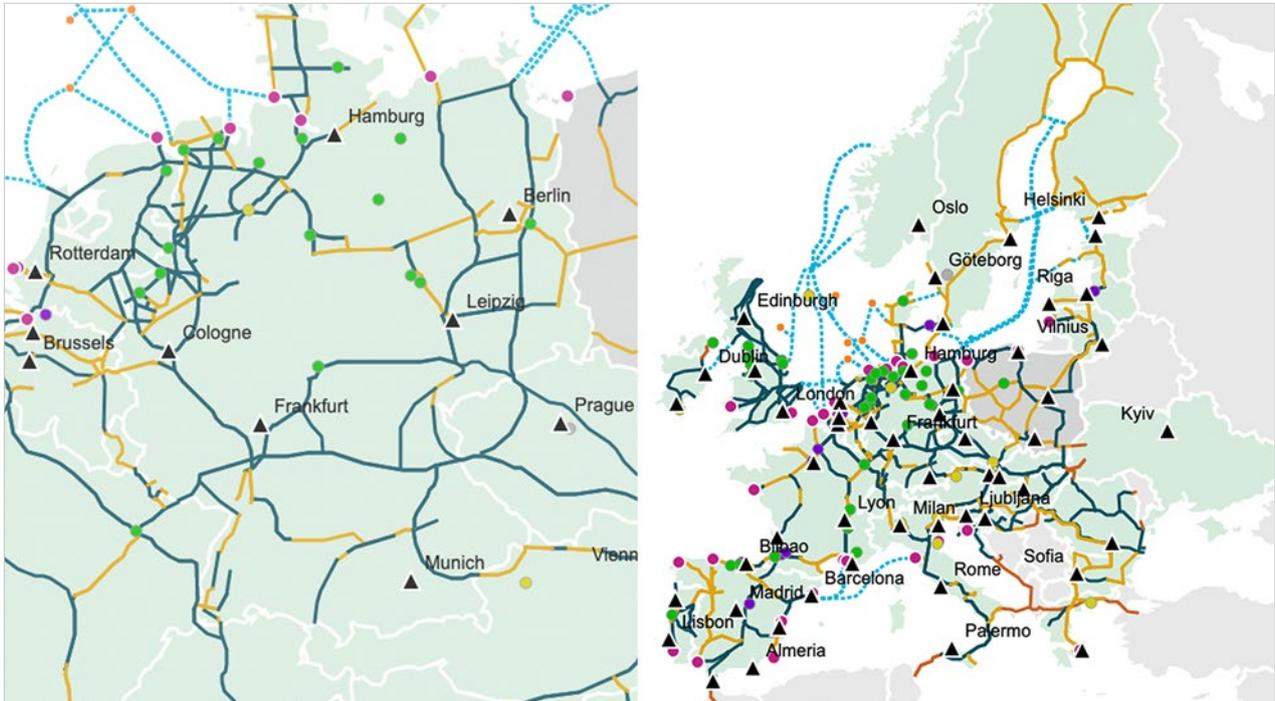


Abbildung 9: Überblick über geplante Elemente des European Hydrogen Backbone in Deutschland und Europa (rot: Gasimportterminals, orange: Offshore-Produktion, grün: umgewidmete Erdgasleitungen, gelb: neue Wasserstoffleitungen) (Quelle: EHB 2023)

## Wasserstoff-Transportnetze

Die **European Hydrogen Backbone-Initiative (EHB)** verfolgt dieses Ziel und plant eine Wasserstofftransportstruktur, die in großen Teilen auf existierende Gastransportnetze zurückgreift und eine Umwidmung dieser vorsieht.<sup>52</sup> In Deutschland ist die Vereinigung der Fernleitungsnetzbetreiber Gas (FNB Gas) für die Koordination der Aktivitäten zuständig.

Abbildung 9 gibt einen Überblick über die geplante Nutzung bestehender beziehungsweise den Bau neuer Infrastruktur als Teil der EHB-Initiative.

Expertinnen und Experten weisen darauf hin, dass vor dem Hintergrund der intensiven Bemühungen zur Entkopplung von russischen Gaslieferungen die **Verfügbarkeit von Pipelinekapazitäten im Verteilnetz nochmals neu bewertet** werden

sollte. Denn die Einspeisung von Erdgas an den LNG-Terminals in Norddeutschland bedeutet, dass freie Röhren – die teils für die zukünftige Nutzung im Rahmen eines Wasserstoffnetzes geplant waren – nun bald wieder mit Erdgas belegt sein könnten beziehungsweise werden.

## Wasserstoff-Verteilnetze

Für die perspektivische Umstellung auf Wasserstoff ist bedeutend, dass **über siebenzig Prozent der Industriebetriebe vom Gas-Verteilnetz abhängig** sind.<sup>53</sup>

Für das Wasserstoff-Verteilnetz ist geplant, einen Teil der **vorhandenen Erdgasleitungen umzuwidmen**, da oft nebeneinander mehrere Rohrstränge existieren, die perspektivisch nicht mehr alle für den Transport von Gas benötigt werden.

52 | Vgl. EHB 2022.

53 | Vgl. Zukunft Gas 2022.

### 8.3 Regulatorik für eine Wasserstoffinfrastruktur

Für einen schnellen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in Deutschland wäre es wünschenswert, wenn man die existierende Gasregulatorik direkt eins zu eins auf Wasserstoff übertragen könnte. Der **finale Entwurf der neuen Gasbinnenmarkttrichtlinie der Europäischen Kommission**<sup>54</sup> ist ein Schritt in die richtige Richtung, da grundsätzlich so für den Transport von Wasserstoff die bewährten Regeln des Gasbinnenmarkts angewendet werden können.

Das Transport- und das Verteilnetz sollen identisch geregelt werden. Im Gasnetz existieren die beiden Netzelemente als zwei getrennte Stränge nebeneinander, weshalb **Entflechtungsvorschriften** („Unbundling“) für das Netz geplant sind, um dem Grundgedanken der einheitlichen Regelung beider Netze gerecht zu werden.

Diese Entflechtungsregeln würden bestehende Regeln jedoch deutlich verschärfen: Bevor die Transformation einer Pipeline von Erdgas zu Wasserstoff erfolgen kann, müsste bei Umsetzung der Direktive eine organisatorische und finanzielle Entflechtung der Besitzstruktur erfolgen.<sup>55</sup> Da dies unter anderem drastische Auswirkungen auf das bewährte Stadtwerkemodell der Energieversorgung in Deutschland haben könnte, haben unterschiedliche Institutionen bereits **konkrete Vorschläge für Nachbesserungen vorgelegt**.<sup>56</sup>

Durch die Regulatorik werden Investitionsentscheidungen ausgebremst. Es ist deshalb wünschenswert, dass der **Gesetzgeber möglichst schnell Planungssicherheit schafft** und dadurch Investitionen anreizt.

„Man muss sich jetzt überlegen, was eine sinnvolle Strategie für eine Wasserstoffinfrastruktur sein wird.“

54 | Vgl. EU-KOM 2021.

55 | In der Praxis würde eine Umsetzung bedeuten, dass zum Beispiel Stadtwerke in Norddeutschland mit hohem kontinuierlichen Windstromüberschuss ihre fossilen Gasnetze nicht mehr Schritt für Schritt als Leitungen für grünen Wasserstoff umwidmen könnten, da dieses Vorgehen den Entflechtungsvorschriften widerspräche.

56 | Vgl. dena 2022; DVGW 2022.



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der verschiedenen Elektrolyse-Grundtypen	16
Abbildung 2: Überblick über die Wasserstoff-Farbenlehre	17
Abbildung 3: Wasserstoff-Wertschöpfungskette mit Elektrolyseur als Mittelpunkt	18
Abbildung 4: Größe des Elektrolyseurmarktes 2021–2030	21
Abbildung 5: Überblick über die deutsche Elektrolyseur-Herstellerlandschaft	23
Abbildung 6: Stärken und Schwächen deutscher, amerikanischer und chinesischer Elektrolyseurhersteller im Vergleich	24
Abbildung 7: Überblick über geplante Elektrolysekapazitäten in Deutschland	27
Abbildung 8: Hierarchischer Überblick über relevante Gesetze, Verordnungen und Regelwerk	29
Abbildung 9: Überblick über geplante Elemente des European Hydrogen Backbone in Deutschland und Europa	34

# Literatur

## 117th Congress of the United States of America 2022

117th Congress of the United States of America: *Inflation Reduction Act of 2022*, 2022.

## Allied Market Research 2021

Allied Market Research: *Electrolyzer Market by Product (Alkaline Electrolyzer, PEM Electrolyzer, and Solid Oxide Electrolyzer), Capacity (Less Than 500 Kw, 500 Kw to 2 MW, and Above 2 MW), and Application (Power Generation, Transportation, Industry Energy, Industry Feedstock, Building Heat & Power, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2020–2027*, 2021. URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/electrolyzer-market-A10609> [Stand: 31.03.2021].

## Ariadne Kopernikus-Projekt 2022

Ariadne Kopernikus-Projekt: *Wasserstoff und die Energiekrise: fünf Knackpunkte*, 2022.

## BDI 2022

Bundesverband der deutschen Industrie e. V.: *Fünf-Punkte-Forderung der deutschen Industrie. Versorgung mit kritischen Rohstoffen ist überlebenswichtig*, Berlin 2022.

## BMBF 2022

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Wasserstoff-Leitprojekte: H2Giga: Serienfertigung. Wie das Leitprojekt H2Giga Elektrolyseure zur Wasserstoff-Herstellung in die Serienfertigung bringen will*, 2022. URL: <https://www.wasserstoffleitprojekte.de/leitprojekte/h2giga> [Stand: 29.08.2022].

## BMWi 2020

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: *Die Nationale Wasserstoffstrategie*, Berlin 2020.

## BMWK 2016

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Referat Öffentlichkeitsarbeit: *Förderprogramme - Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie Phase II (NIP) - Maßnahmen der Marktaktivierung - Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität*, 2016. URL: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMVI/nip-ii-nachhaltige-mobilitaet.html> [Stand: 02.11.2022].

## BMWK 2022

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: „EU schlägt Sofortmaßnahmen zur Beschleunigung des Erneuerbaren-Ausbaus vor“ (Pressemitteilung vom 14.11.2022). URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/11/20221110-eu-schlaegt-sofortmassnahmen-zur-beschleunigung-des-erneuerbaren-ausbaus-vor.html> [Stand: 14.11.2022].

## BMWK 2023

BMWK: *Kadri Simson und Robert Habeck treffen sich zu bilateralen Gesprächen über Energiefragen und besichtigen die Zukunft der wasserstoffbasierten Stahlproduktion in der EU*, 2023. URL: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/05/20230531-simson-habeck-bilaterale-gesprache-energiefragen-und-zukunft-wasserstoffbasierte-stahlproduktion-in-der-eu.html> [Stand: 20.06.2023].

## BUW et al. 2020a

Bergische Universität Wuppertal/DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH/Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V./Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit/uniper: *PortalGreen Power-to-Gas-Leitfaden zur Integration Erneuerbarer Energien – Teil 1 Genehmigung. Genehmigungsrechtlicher Leitfaden für Power-to-Gas-Anlagen – Errichtung und Betrieb* – Berlin 2020.

## BUW et al. 2020b

Bergische Universität Wuppertal/DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH/Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V./Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit/uniper: *PortalGreen Technischer Leitfaden für P2G-Anlagen T2 Technik. Technischer Leitfaden für Power-to-Gas-Anlagen – Errichtung, Inbetriebnahme und Betrieb – T2 Technik*, 2020.

## dena 2022

Deutsche Energie-Agentur: *Vorfinanzierung durch die Netzbetreiber, Risikoabsicherung durch den Staat. Ein Vorschlag für mehr Tempo beim Ausbau der Wasserstoff-Netzinfrastruktur*, Berlin 2022.



#### **Department of Homeland Security 2021**

Department of Homeland Security: *Feature Article: Securing Transportation of Ammonia*, 2021. URL: <https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2021/06/17/feature-article-securing-transportation-ammonia> [Stand: 24.11.2022].

#### **DERA 2021**

Deutsche Rohstoffagentur: *DERA Rohstoffinformationen. Raw Materials for Emerging Technologies 2021*, 2021.

#### **DERA 2022**

Deutsche Rohstoffagentur: *DERA Themenheft. Mineralische Rohstoffe für die Wasserelektrolyse*, 2022.

#### **Duijm et al. 2005**

Duijm, N. J./Markert, F./Lundtang Paulsen, J.: *Safety Assessment of Ammonia as a Transport Fuel*, Risø R, Report Risø-R-1504(EN), Roskilde 2005.

#### **DVGW 2022**

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches: *Die Auswirkungen des EU-Gaspakets auf die deutsche Energiewende*, Bonn 2022.

#### **DWV/VDMA 2022**

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellenverband/Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.: *Gemeinsamer Offener Brief des DWV und des VDMA. Sofortmaßnahme 37. BlmSchV – Grüner Wasserstoff zur THG-Minderung für die in den Verkehr gebrachten Kraftstoffe*, Berlin 2022.

#### **EHB 2022**

European Hydrogen Backbone Initiative: *EHB European Hydrogen Backbone*, 2022. URL: <https://ehb.eu/#partners> [Stand: 23.11.2022].

#### **EHB 2023**

European Hydrogen Backbone Initiative: *European Hydrogen Backbone Maps*, 2023. URL: <https://ehb.eu/page/european-hydrogen-backbone-maps> [Stand: 28.07.2023].

#### **ENTSOG et al. 2021**

ENTSOG/Gas Infrastructure Europe/Hydrogen Europe: *Transport & Speicherung von Wasserstoff – Zahlen & Fakten*, Brüssel 2021.

#### **EP 2022**

Europäisches Parlament: *Proposal for a Directive of European Parliament and of the Council Amending Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council, Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and Directive 98/70/EC of the European Parliament and of the Council*, Brüssel 2022.

#### **EU-KOM 2016**

Europäische Kommission: *Anwendung des EU-Rechts*, 2016. URL: [https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/applying-eu-law\\_de](https://ec.europa.eu/info/law/law-making-process/applying-eu-law_de) [Stand: 24.11.2022].

#### **EU-KOM 2021**

Europäische Kommission: *finaler Vorschlag für eine EU-Richtlinie über gemeinsame Vorschriften für die Binnenmärkte für erneuerbare Gase und Erdgas sowie Wasserstoff sowie Wasserstoff*, 15.12.2021.

#### **Eurostat 2022**

Eurostat: *Energiestatistik – Preise Gas und Elektrizität*, 2022. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00117/default/table?lang=de> [Stand: 27.10.2022].

#### **FfE 2022**

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e. V. und: *Elektrolyse – Die Schlüsseltechnologie für Power-to-X – FfE München*, 2022. URL: [https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/elektrolyse-die-schluesselftechnologie-fuer-power-to-x/#:~:text=Die%20alkalische%20Elektrolyse%20\(AEL\)%20besitzt,der%20Kathode%20Wasserstoff%20%5B3%5D.](https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/elektrolyse-die-schluesselftechnologie-fuer-power-to-x/#:~:text=Die%20alkalische%20Elektrolyse%20(AEL)%20besitzt,der%20Kathode%20Wasserstoff%20%5B3%5D.) [Stand: 20.08.2022].

#### **Fortune Business Insights 2022**

Fortune Business Insights: *Electrolyzer Market Size, Share, Trends & Forecast 2022-2029*, 2022. URL: <https://www.fortunebusinessinsights.com/electrolyzer-market-103919> [Stand: 26.10.2022].

#### **Global Market Insights Inc. 2022**

Global Market Insights Inc.: *Electrolyzer Market Size & Share | Forecast Report 2022-2030*, 2022. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/electrolyzer-market> [Stand: 08.08.2022].

**H2 Global 2022**

H2 Global: *The H2Global Mechanism*, 2022. URL: <https://www.h2global-stiftung.com/project/h2g-mechanism> [Stand: 21.11.2022].

**Hamacher 2014**

Hamacher, T.: *Wasserstoff als strategischer Sekundärenergieträger*, Berlin/Heidelberg 2014.

**Horizon 2020/Europäische Kommission 2021**

Horizon 2020/Europäische Kommission: *Waste to Hydrogen | Waste2H2 Project | Fact Sheet | Commission*, 2021. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/952593> [Stand: 21.11.2022].

**IKEM 2020**

IKEM: *Wasserstoff – Farbenlehre. Rechtswissenschaftliche und rechtspolitische Kurzstudie*, Berlin 2020.

**MERICs 2022**

Mercator Institute for China Studies: *China's Nascent Green Hydrogen Sector: How Policy, Research and Business are Forging a New Industry*, 2022.

**Nationaler Wasserstoffrat 2021**

Nationaler Wasserstoffrat: *Wasserstoff Aktionsplan Deutschland 2021-2025*, 2021.

**Nationaler Wasserstoffrat 2022**

Nationaler Wasserstoffrat: *Einordnung verschiedener Pfade der Herstellung von Wasserstoff („Farbenlehre“). Informationspapier*, 2022.

**Neugebauer 2022**

Neugebauer, R.: *Wasserstofftechnologien*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin, Heidelberg 2022.

**Neuman + Esser 2022**

Neuman + Esser: *Wasserstofftransport mit Pipelines*, 2022. URL: <https://www.neuman-esser.de/unternehmen/media/blog/wasserstofftransport-mit-pipelines/> [Stand: 09.11.2022].

**NOW-GmbH 2020**

NOW-GmbH: *Die deutsche H<sub>2</sub>-RCS-Roadmap 2025. RCS-Regulations, Codes & Standards: Regelwerke, Durchführungsbestimmungen & Normen im Bereich Wasserstoff (H<sub>2</sub>)*, 2020.

**Precedence Research 2022**

Precedence Research: *Electrolyzer Market Size, Trends, Growth, Report 2022-2030*, 2022. URL: <https://www.precedenceresearch.com/electrolyzer-market> [Stand: 28.10.2022].

**SA 2018**

Strategic Analysis: *Analysis of Advanced H2 Production & Delivery Pathways*, 2018.

**Schmidtchen/Wurster 2013**

Schmidtchen, U./Wurster, R.: *Sicherheit in der Anwendung von Wasserstoff*, Berlin/Heidelberg 2013.

**SCI4Climate.NRW et al. 2021**

SCI4Climate.NRW/Wuppertal-Institut/Fraunhofer UMSICHT/Institut der Deutschen Wirtschaft: *Wasserstoffimporte. Bewertung der Realisierbarkeit von Wasserstoffimporten gemäß den Zielvorgaben der Nationalen Wasserstoffstrategie bis zum Jahr 2030*, 2021.

**SPD et al. 2021**

SPD/Bündnis 90/Die Grünen/FDP: *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*, 2021.

**SWP 2022**

Stiftung Wissenschaft und Politik: *Elektrolyseure für die Wasserstoffrevolution. Herausforderungen, Abhängigkeiten und Lösungsansätze*, 2022.

**TÜV NORD 2022**

TÜV NORD: *Eigenschaften Sicherheit Gefahren – Wasserstoff*, 2022. URL: <https://www.tuev-nord.de/de/unternehmen/energie/wasserstoff/wasserstoff-eigenschaften-sicherheit-gefahren/> [Stand: 09.11.2022].

**TÜV SÜD 2022**

TÜV SÜD: *Wasserstoff | Sicherheit*, 2022. URL: <https://www.tuvsud.com/de-de/indust-re/wasserstoffbrennstoffzellen-info/wasserstoff/sicherheit-von-wasserstoff> [Stand: 09.11.2022].



### **Umweltbundesamt 2022**

Umweltbundesamt: *Ammoniak*, 2022. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/ammoniak#emittenten-quellen-fur-ammoniak-in-der-landwirtschaft> [Stand: 24.11.2022].

### **Wasserstoff Kompass 2022**

Wasserstoff Kompass: *Elektrolyse in Deutschland. Leistungen, Zielsetzungen und Bedarfe bis 2030*, 2022. URL: [https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user\\_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolysekapazitaeten\\_.pdf](https://www.wasserstoff-kompass.de/fileadmin/user_upload/img/news-und-media/dokumente/Elektrolysekapazitaeten_.pdf) [Stand: 26.07.2022].

### **WILO 2022**

WILO: *Fact-Sheet zur Vereinfachung von Genehmigungsverfahren*, 2022.

### **Zukunft Gas 2022**

Zukunft Gas: *Gas-Infrastruktur*, 2022. URL: <https://gas.info/energie-gas/gas-infrastruktur> [Stand: 23.11.2022].



## Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter [www.acatech.de](http://www.acatech.de)



#### Autorinnen und Autoren:

**Dr. Martin Bruder Müller**  
BASF SE  
Carl-Bosch-Strasse 38  
67056 Ludwigshafen

**Prof. Dr.-Ing. Reimund Neugebauer**  
Fraunhofer-Gesellschaft  
Postfach 20 07 33  
80007 München

**Dr. Reinhard Ploss**  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
Karolinenplatz 4  
80333 München

**Florian Süssenguth**  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
Karolinenplatz 4  
80333 München

**Dr. Anka Liepold**  
acatech – Deutsche Akademie der  
Technikwissenschaften  
Karolinenplatz 4  
80333 München

#### Reihenherausgeber:

##### acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2023

Geschäftsstelle  
Karolinenplatz 4  
80333 München  
T +49(0)89/52 03 09-0  
F +49(0)89/52 03 09-900

Hauptstadtbüro  
Pariser Platz 4a  
10117 Berlin  
T +49(0)30/2 06 30 96-0  
F +49(0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro  
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13  
1000 Brüssel | Belgien  
T +32(0)2/2 13 81-80  
F +32(0)2/2 13 81-89

info@acatech.de  
www.acatech.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums: Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

Vorstand i.S.v. §26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

#### Empfohlene Zitierweise:

Bruder Müller, M./ Neugebauer, R./ Ploss, R./ Süssenguth, F./ Liepold, A.: *Elektrolyseure: Schlüsseltechnologie für die Wasserstoffwirtschaft* (acatech IMPULS), München 2023. DOI: [https://doi.org/10.48669/aca\\_2023-17](https://doi.org/10.48669/aca_2023-17)

ISSN 2702-7627

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

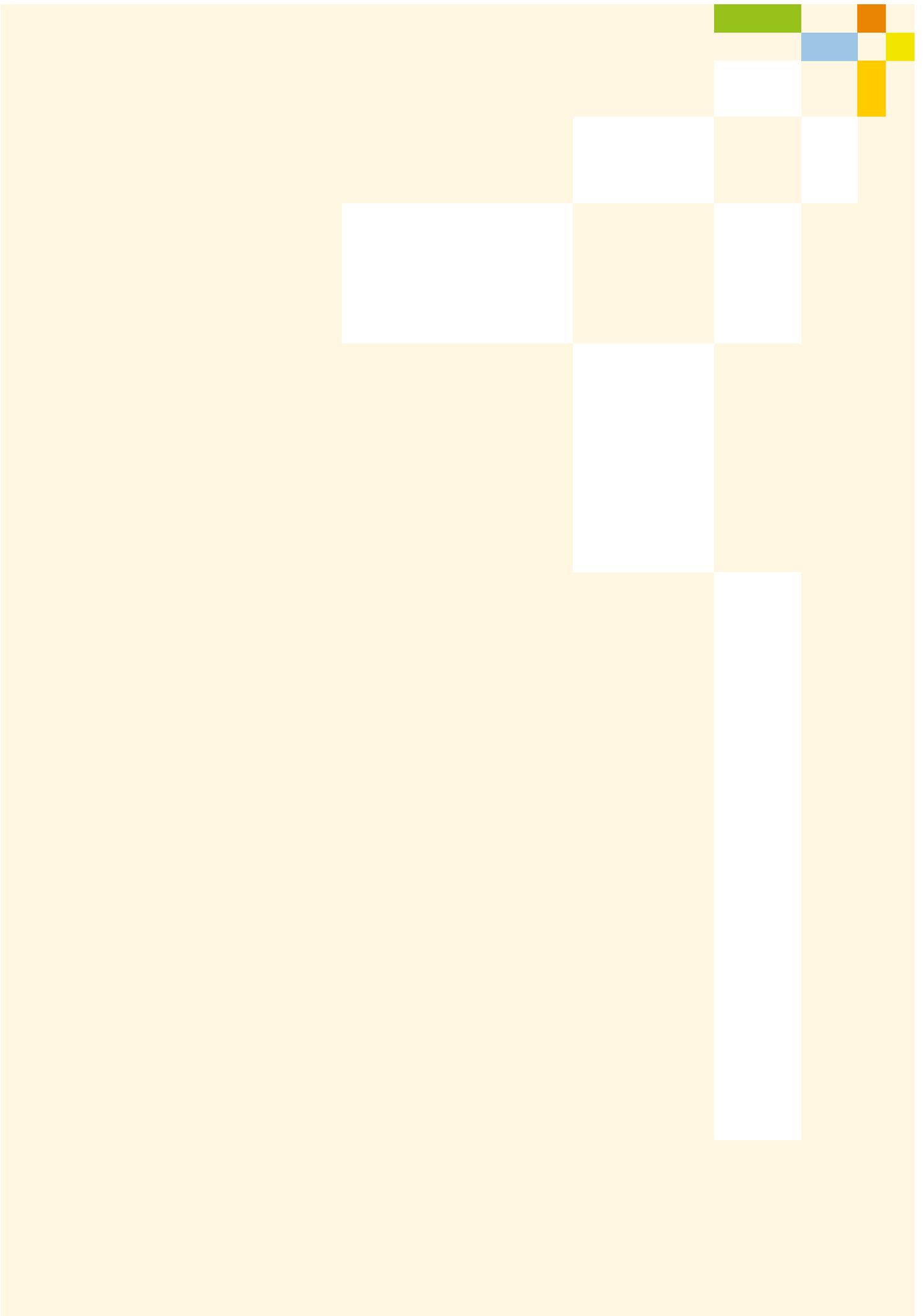
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

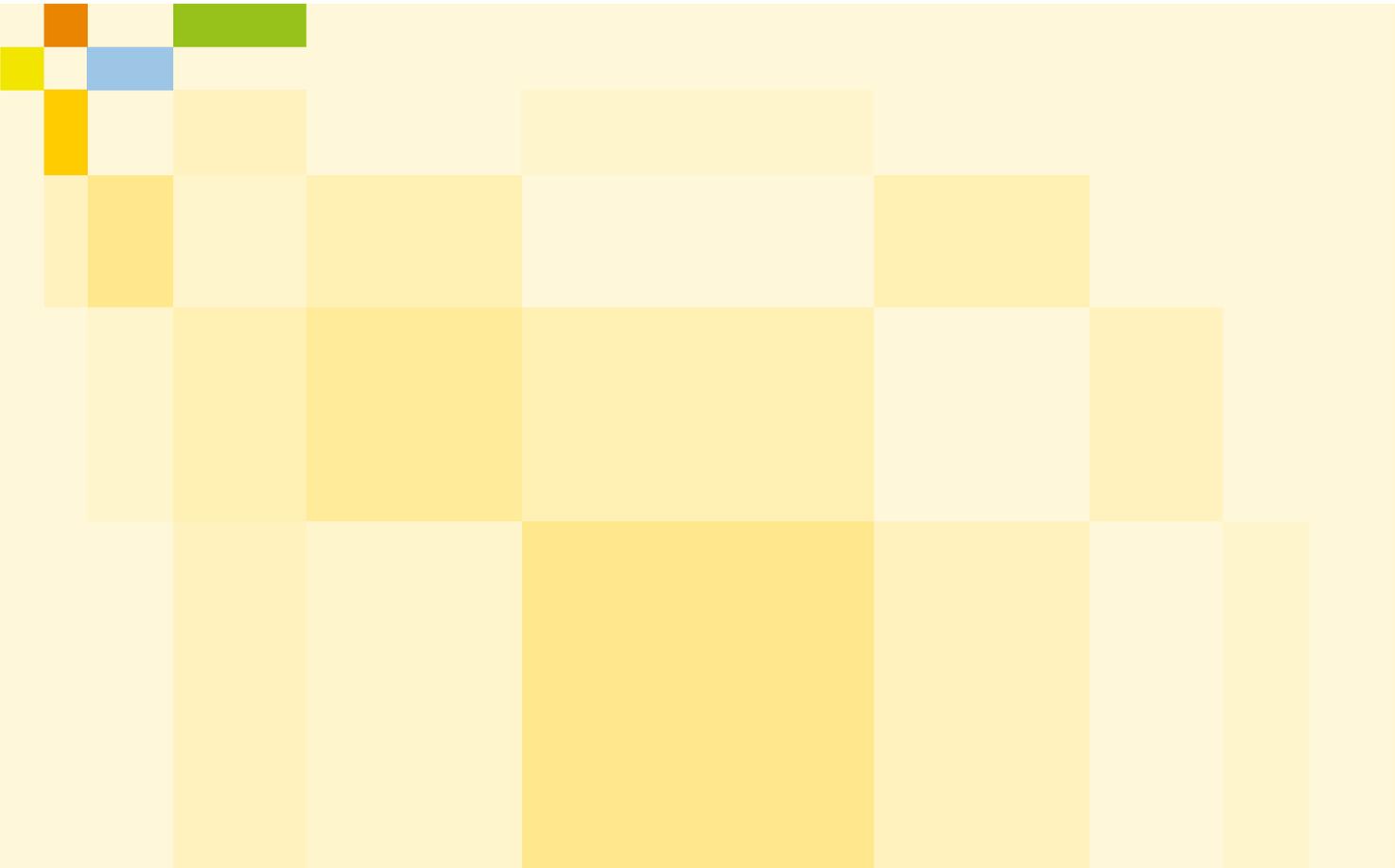
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2023

Koordination: Elisa Reker-Gluhic  
Lektorat: Lektorat Berlin  
Layout/Konzeption: Groothuis, Hamburg  
Titelfoto: shutterstock/petrmalinak  
Konvertierung und Satz: aweberdesign.de, Berlin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf [www.acatech.de](http://www.acatech.de)





Die Umstellung von fossilen auf regenerative Energieträger birgt ein enormes Potenzial – für den globalen Klimaschutz ebenso wie für die Wirtschaftsstandorte Deutschland und Europa. Grüner Wasserstoff wird dabei als gut transportabler Energieträger zu einer entscheidenden Grundlage für eine nachhaltige Chemie-, Zement- und Stahlproduktion und einem zentralen Baustein für eine erfolgreiche Energiewende.

Dieser IMPULS geht der Frage nach, wie die Produktion und der Einsatz von Elektrolyseuren in Deutschland jetzt gestärkt werden können, um eine Abwanderung heimischer Hersteller und Kompetenzen abzuwenden, den Markthochlauf der heimischen Wasserstoffwirtschaft zu ermöglichen und Deutschland als führenden Anbieter für Elektrolyseurtechnologie zu etablieren.