

Studie

Potenzial und Grundlagen für eine grüne Wasserstoff- Strategie für Rheinland-Pfalz

im Auftrag von

Bündnis 90 / Die Grünen

Landtag Rheinland-Pfalz

eine Studie der



Studie

Potenzial und Grundlagen für eine grüne Wasserstoff-Strategie für Rheinland-Pfalz

Auftraggeber:

| | |
|--|---|
| Bündnis 90 / Die Grünen Landtag Rheinland-Pfalz Kaiser-Friedrich-Str. 3 55116 Mainz | Parlamentarische Geschäftsführerin Pia Schellhammer Tel: 06131 / 208 3129 Pia.schellhammer@gruene.landtag.rlp.de |
|--|---|

Konzepterstellung:

| | |
|--|---|
| Transferstelle Bingen (TSB) Berlinstraße 107a 55411 Bingen | Telefon: 06721 / 98 424 0 tsb@tsb-energie.de |
|--|---|

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| TSB-Projektnummer: 361105 | Datum: 30. Oktober 2020 |
|----------------------------------|--------------------------------|

Projektleitung- und bearbeitung:

| | |
|----------------|--|
| Joachim Walter | Telefon: 06721 / 98 424 250 walter@tsb-energie.de |
| Nina Rauth | Telefon: 06721 / 98 424 255 rauth@tsb-energie.de |



Transferstelle für Rationelle und Regenerative Energienutzung • Berlinstr. 107a • 55411 Bingen

im

Institut für Innovation, Transfer und Beratung gGmbH

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|---|---|----|
| 1 | Einleitung | 4 |
| 2 | Anwendungen von grünem Wasserstoff in Rheinland-Pfalz | 9 |
| 3 | Bedarf & Potenzial an grünem Wasserstoff | 17 |
| 4 | Erzeugung von Wasserstoff – Kapazitäten und Kosten..... | 27 |
| 5 | Strukturelle Umsetzung | 34 |
| | Quellenverzeichnis | 35 |
| | Abbildungsverzeichnis | 40 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 41 |
| | Abkürzungsverzeichnis | 42 |
| | Anhang..... | 43 |

1 Einleitung

Die Landtagsfraktion von Bündnis 90/ DIE GRÜNEN beabsichtigt, die vom Landtag beschlossene Entwicklung einer Wasserstoffstrategie für Rheinland-Pfalz zu unterstützen. Dazu werden Grundlagendaten benötigt, die über Bedarf und Potenzial in Rheinland-Pfalz Auskunft geben. Ziel des vorliegenden Papiers ist daher die Abschätzung des Bedarfs, des Potenzials an Wasserstoff sowie der Klimawirkung eines Einstiegs in die Wasserstoffwirtschaft. Weiterhin werden interessante Anwendungen in den Sektoren Industrie, Mobilität, Strom und Wärme und die voraussichtlichen Kostenstrukturen aufgezeigt. Abschließend erfolgt eine Einordnung der strukturellen Umsetzung von Wasserstoffprojekten in Rheinland-Pfalz.

1.1 Bedeutung von Wasserstoff in der Energieversorgung der Zukunft

Das ausgesprochene Ziel der Bundesregierung ist die Etablierung von grünem Wasserstoff zur Dekarbonisierung und damit Unterstützung der Energiewende. Sie geht von der Entwicklung eines internationalen Marktes für Wasserstoff aus, an dem Deutschland einen wegweisenden Anteil haben kann. Damit käme Wasserstoff als Energieträger und chemischer Grundstoff eine wichtige Rolle in einer nachhaltigen Energiekreislaufwirtschaft zu.

Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien kann klimaneutral zum Einsatz kommen: (BMWi, 2020) (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

- Als **Energieträger** (z.B. in Brennstoffzellen, Gasturbinen etc.) kommt Wasserstoff auch dort zum Einsatz, wo eine direkte Stromnutzung nicht möglich ist. Auch die direkte Nutzung zur Prozess- und Raumwärmenutzung ist möglich.
- Als **Energiespeicher** kann Wasserstoff flexibel und ausgleichend Strom aus Erneuerbaren Energien in materieller Form zwischenspeichern und damit der Systemintegration der Erneuerbaren dienen.
- Als Element der **Sektorkopplung** trägt er - durch die Umwandlung von Strom zu grünem Wasserstoff bzw. seinen Folgeprodukten (Power-to-X) - zur Dekarbonisierung und damit Treibhausgasneutralität bei. Die Elektrolyse ist hierbei das zentrale Verfahren.
- Als chemischer **Grundstoff** (z.B. zur Ammoniak-Herstellung, in industriellen Prozessen oder zur CO₂-Umwandlung)

Dabei weist der Einsatz von Wasserstoff folgende **Vorteile** auf:

- keine bzw. geringe CO₂-Emissionen bei Nutzung von (grünem) Wasserstoff
- Erzeugung aus Erneuerbaren Energien
- Vielseitige Anwendungen, z.B. in Industrie, Wärmeversorgung, Mobilität
- Speicherung und Transport sind möglich

Die **Märkte** für Wasserstoffanwendungen liegen in der direkten Erzeugung in Deutschland, in der Industrie (Energieträger/Prozesse), in der Mobilität (Ergänzung zur Elektromobilität) sowie in Wärmeanwendungen. Besonders in den Sektoren Industrie und Verkehr wird Wasserstoff als entscheidend für das Gelingen der Energiewende gesehen. Im Gebäudebereich und der Rückverstromung kann Wasserstoff Beiträge leisten, sofern marktpolitische Anreize geschaffen werden. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

Wasserstoff wird eine steigende Relevanz in den nächsten Jahren vorausgesagt. Hierfür müssen jedoch die Voraussetzungen hinsichtlich des Markthochlaufs und der Unterstützung der Wertschöpfungskette geschaffen werden:



Abbildung 1-1: Wertschöpfungskette Wasserstoff (Quelle: TSB nach (BMWI, 2020))

1.2 „Grüner Wasserstoff“ – Definition und CO₂-Footprint

Wasserstoff kann anhand der Herstellung und den damit verbundenen CO₂-Emissionen (EMCEL, 2020) kategorisiert werden. Die Einteilung erfolgt hier mithilfe von Farben:

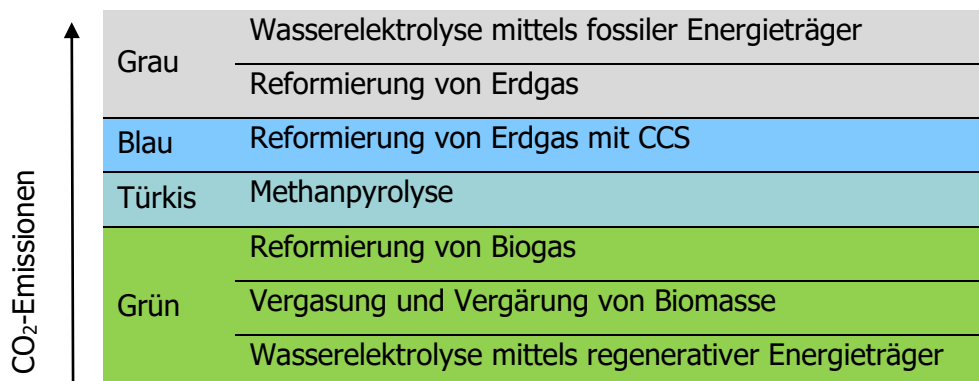


Abbildung 1-2 Unterscheidung von Wasserstoff anhand der Herstellung (nach (EMCEL, 2020))

Als **grüner Wasserstoff** wird jener bezeichnet, der mithilfe von regenerativer Energie erzeugt wurde. Er wird bilanziell als CO₂-neutral betrachtet. Die bevorzugte Methode ist die Wasserelektrolyse, wobei Wasser mit Strom in seine elementaren Bestandteile aufgespalten wird. Weiter werden die Verfahren der Vergasung und Vergärung von Biomasse sowie die Reformierung von Biogas angewandt.

Grauer Wasserstoff wird durch die Verwendung fossiler Energieträger bei der Produktion gekennzeichnet. So zählt auch Elektrolyse-Wasserstoff zur grauen Fraktion, sofern die Elektrolyse mit dem aktuellen deutschen Strommix betrieben wird und entsprechend mit CO₂-Emissionen belastet ist. Das gängigste Verfahren in Deutschland ist jedoch die Dampfreformierung, bei der Erdgas mittels Wasserdampf und Wärme in Wasserstoff und CO₂ umgewandelt wird.

Blauer Wasserstoff wird ebenso wie grauer Wasserstoff mittels fossiler Energieträger produziert. Das frei gewordene CO₂ wird jedoch unterirdisch durch CCS (Carbon Capture and Storage) gespeichert oder in der Industrie weiterverarbeitet. Er bildet die Schnittstelle von grauem zu grünem Wasserstoff.

Wird der Wasserstoff mittels Methanpyrolyse hergestellt, spricht man von **türkischem Wasserstoff**. Bei diesem thermochemischen Verfahren wird Methan in festen Kohlenstoff und Wasserstoff zerlegt. Auch hier kann die Herstellung als CO₂-neutral betrachtet werden, jedoch nur, wenn die Wärmeversorgung des Hochtemperaturreaktors durch -CO₂-neutrales Gas (Teil des Wasserstoffs nutzen) oder grünen Strom bereitgestellt wird.

Entsprechend der Herstellung und der Vorkettenemissionen von Erdgas ergeben sich folgende **Emissionswerte (CO₂-Footprints)** für die verschiedenen Wasserstoffarten¹:

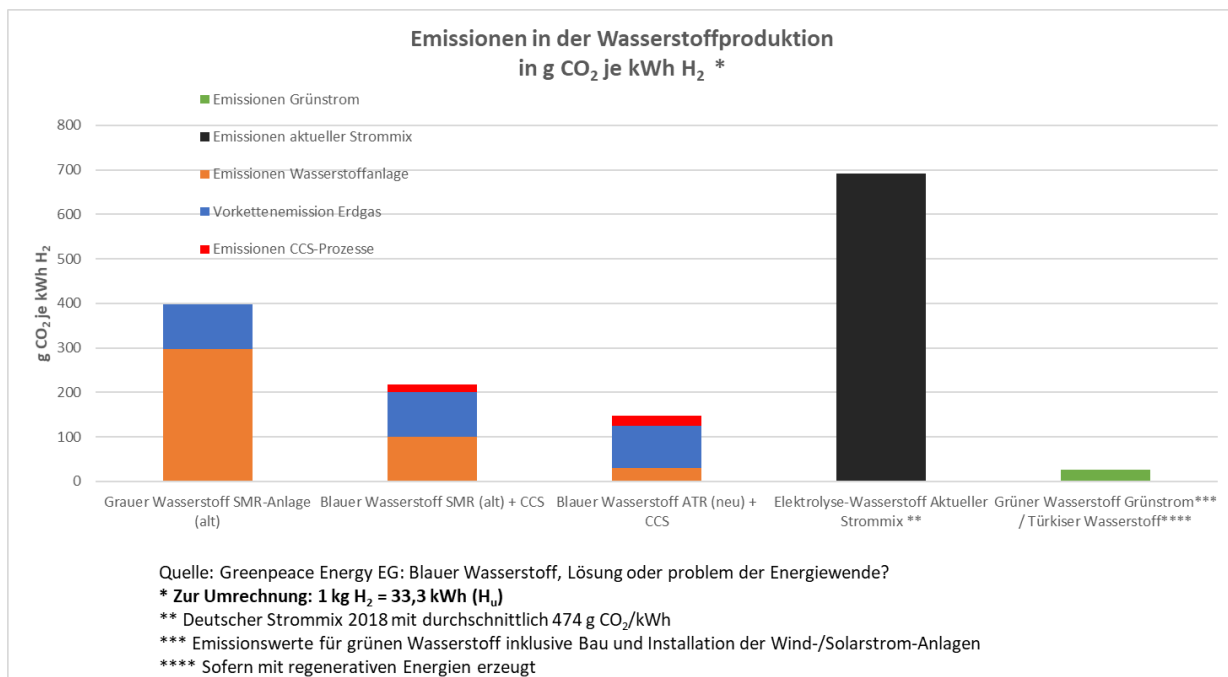


Abbildung 1-3: Emissionen der Wasserstoffproduktion (Greenpeace Energy EG, 2020) ²

¹ Detaillierte Informationen zu den Emissionen sind dem Anhang zu entnehmen.

² Weitere Quelle: das Wuppertal-Institut weist grünen Wasserstoff mit 47 g CO₂/kWh aus.

1.3 Nationale Wasserstoffstrategie

Die Bundesregierung hat die Voraussetzungen für das Erreichen der Klimaziele 2030 mit dem Klimaschutzprogramm 2030 geschaffen. Bis 2050 soll das Ziel der Treibhausgasneutralität erreicht sein. Eine wichtige Alternative zu fossilen Energieträgern stellt dabei Wasserstoff dar. Die Nationale Wasserstoffstrategie trägt der beabsichtigten Technologie und Marktentwicklung Rechnung:



Abbildung 1-4: Wasserstoffstrategie (BMWI, 2020)

Die **Ziele** der Nationalen Wasserstoffstrategie sind: (BMWI, 2020)

- Globale Verantwortung übernehmen – Dekarbonisierung/Klimaschutz fördern
- „Heimatmarkt“ in Deutschland entwickeln, Importen den Weg bereiten
- Wasserstoff als alternativen Energieträger etablieren
- Wasserstoff als Grundstoff für die Industrie nachhaltig machen
- Transport- und Verteilinfrastruktur weiterentwickeln
- Wissenschaft fördern
- Deutsche Wirtschaft stärken
- Internationale Märkte und Kooperationen etablieren
- Qualitätsinfrastruktur für Erzeugung, Transport, Speicherung und Verwendung ausbauen

Auf Basis dieser Ziele wird mit dem **Aktionsplan**, der 38 Maßnahmen in 6 Handlungsfeldern (Erzeugung, Infrastruktur, Anwendungen, Märkte etc.) umfasst, der Markthochlauf der Wasserstoff-Technologien vorangebracht. Bis 2023 werden dieser sowie die Grundlagen für einen funktionierenden Heimatmarkt angestoßen, bis 2030 erfolgt eine Stärkung und Ausweitung auf internationale Märkte.

Die Bundesregierung fördert die Entwicklung der Wasserstofftechnologien mit folgenden Programmen:

- **Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie** (NIP, 2016 – 2026, 1,4 Mrd. Euro): Fördergegenstand der Bundesregierung sind Elektrolyseanlagen zur Erzeugung von Wasserstoff für den Einsatz im Mobilitätsbereich, sofern der Betrieb mit erneuerbarem Strom erfolgt und der Wasserstoff im Mobilitätsbereich eingesetzt wird. Gemäß Artikel 41 AVGO können Elektrolyseanlagen mit bis zu 45 % der Investitionsausgaben gefördert werden. (BmVI ivm PtJ, 2020)
- **Nationales Dekarbonisierungsprogramm (Industrie):** „Die Maßnahme ist ein Förderprogramm im Bereich der Entwicklung, Demonstration und Markteinführung. Für eine möglichst weitgehende Emissionsminderung im Industriesektor ist es nötig, gerade auch prozessbedingte THG-Emissionen, die nach heutigem Stand der Technik nicht oder nur schwer vermeidbar sind, weitgehend oder ganz zu reduzieren. Zu diesem Zweck sollen **zentrale Projekte im Bereich der emissionsintensiven Industrien gefördert** werden. Diese sollen sowohl der anwendungsorientierten F&E als auch der Erprobung in industriellem Maßstab und breiten Markteinführung ausgereifter Technologien dienen und auch deren Wirtschaftlichkeit im Fokus haben. Das Förderprogramm soll insbesondere die möglichst weitgehende Minderung der THG-Emissionen bei der Produktion emissionsintensiver Güter, die Optimierung von Prozessketten, die Umstellung der Verfahren auf den Einsatz erneuerbarer Energieträger und Rohstoffe sowie die Substitution emissionsintensiver Güter und Technologien zur Umwandlung von Wasserstoff sowie Technologien zur Verwendung von CO₂ fördern.“ (Deutscher Bundestag, 2020)
- **Zukunftspaket** (7 Mrd. Euro für Markthochlauf, 2 Mrd. Euro für internationale Partnerschaften): Die Nationale Wasserstoffstrategie als Teil des Zukunftspakets der Bundesregierung sieht den zügigen Ausbau der industriellen Elektrolyse-Kapazitäten bis 2030 auf 5 GW vor. „Neben der Prüfung, ob die Wasserstoffproduktion über Ausschreibungen von Elektrolyseleistungen gefördert werden kann, soll der Umstieg von fossilen Energieträgern auf Wasserstoff insbesondere bei industriellen Prozessen in der Entwicklung und Prozessumstellung gefördert werden“ (Förderung anhand von Investitionszuschüssen in neue Anlagen). (Bundesfinanzministerium, 2020)
Nach Anwendung des Königsberger Schlüssels können aus den Fördermitteln des Bundes (7 Mrd. €) bis zu 350 Mio. € für Rheinland-Pfalz für die Wasserstoff-Transformation in den nächsten Jahren zur Verfügung stehen (entspricht knapp 5%).
- **Energieforschungsprogramm, Energie- & Klimafonds** (anwendungsorientierte Grundlagenforschung, 2020 - 2023): 310 Mio. Euro, Reallabore der Energiewende

2 Anwendungen von grünem Wasserstoff in Rheinland-Pfalz

Bis 2030 soll es einen Aufbau der Wasserstoffwirtschaft geben, jedoch keine Vollversorgung mit grünem Wasserstoff. Die Anwendungsgebiete stehen daher im Wettbewerb, so dass hier eine Priorisierung erfolgen muss. Kriterien hierfür sind hauptsächlich technische Voraussetzungen, Wirtschaftlichkeit sowie die Potenziale zur Emissionsminderung. Die Märkte bzw. Anwendungen für Wasserstoff liegen – neben der Erzeugung des Wasserstoffs selbst - nach (BMWI, 2020) in folgenden Bereichen:

In der **Industrie** kann Wasserstoff sowohl als Energieträger und als Reaktionspartner in Prozessen (z.B. Chemische Industrie) eingesetzt werden. Hier besteht speziell in RLP ein großes Potenzial.

Im **Mobilitätssektor** steckt ein großes Potenzial zur Anwendung von Wasserstoff, z.B. im öffentlichen Personennahverkehr, im Straßenfernlastverkehr, bei Nutzfahrzeugen und in der Logistik. Hier können Wasserstoffanwendungen die batterieelektrische Mobilität ergänzen, wenn diese an ihre Grenze stößt.

Im **Wärmemarkt** kann Wasserstoff in der Erzeugung von Prozesswärme und im Gebäudesektor zur Dekarbonisierung genutzt werden.



Abbildung 2-1: Anwendungsgebiete für Wasserstoff (Quelle: (Now GmbH, 2020))

Wasserstoff kann in den verschiedenen Sektoren zum Einsatz kommen:

- als Rohstoff für die chemische Industrie (besonders relevant für Rheinland-Pfalz),
- direkt als Energieträger bzw. Brennstoff (stationär in Prozessen, Kraftwerken, in Gebäuden oder für die Bereitstellung von Notstrom)
- oder als Speichermedium im Strom- und Wärmesektor (z.B. Einspeisung in Gasnetz),

bzw. als Bindeglied in der Sektorkopplung dienen, wie folgende Abbildung veranschaulicht:



Abbildung 2-2: Dekarbonisierung über den Stromsektor bzw. die Sektorkopplung mit Wasserstoff als Bindeglied (Quelle: (Zentrum Wasserstoff Bayern (H2.B), 2020))

Generell sind viele Anwendungen in den verschiedenen Sektoren denkbar. Insbesondere beim Markthochlauf müssen allerdings Priorisierungen anhand der vielversprechendsten Anwendungen vorgenommen werden (vgl. Kap. 2.5).

2.1 Industrie

Wichtige Industriezweige in Rheinland-Pfalz

Die rheinland-pfälzische Industrie weist eine andere Verteilung auf als die Deutschlands und legt den Schwerpunkt auf den Bereich der chemischen Industrie. Daher ergibt sich ein vergleichsweise höherer Bedarf beim Einsatz von Wasserstoff.

Umsatzstärkste Industriezweige in RLP sind: (Statistisches Landesamt RLP, 2019)

- Chemische Industrie (28,3%) (Bundesdurchschnitt 7,6%)
- Herstellung von Kraftwagen und -teilen (12,5%)
- Maschinenbau (10,5%)

- Pharmazeutische Industrie (8,4%)
- Gummi- und Kunststoffwarenindustrie (5,5%)

Anwendungsfelder

Die Industrie ist gekennzeichnet durch vielfältige energetische Prozesse, die teilweise nur bedingt den Einsatz Erneuerbarer Energien ermöglichen. Wasserstoff kann einen relevanten Beitrag zur Minderung der Emissionen leisten. Die größten Potenziale werden hierbei in der Stahl- und chemischen Industrie gesehen. Weiterhin kann eine Substitution von Erdgas erfolgen, z.B. bei der Erzeugung von Prozessdampf bzw. generell bei höheren Systemtemperaturen.

Tabelle 2-1: Potenziale zum Einsatz von Wasserstoff in der Industrie, Relevanz für RLP (Quelle: (dena, 2018), TSB)

| | Einsatz von Wasserstoff | Relevanz RLP |
|--|-------------------------|--------------|
| Chemie (z.B. BASF, Boehringer Ingelheim) | Hohes Potenzial | Hoch |
| Eisen und Stahl | Hohes Potenzial | Gering |
| Papierherstellung | Potenzial vorhanden | Gering |
| Steine und Erden | Potenzial vorhanden | Gering |
| Glas und Keramik | Geringes Potenzial | Gering |

Weitere Potenziale liegen in der Kunststoff- oder Lebensmittelindustrie sowie in der Metallverarbeitung.

Potenziale in der chemischen Industrie

Aktuell liegt der deutschlandweite Verbrauch von Wasserstoff bei rund 55 TWh. Hauptabnehmer ist die Industrie, die für die Grundstoffchemie (Herstellung von Ammoniak, Methanol etc.) und die Petrochemie (Herstellung konventioneller Kraftstoffe) etwas gleich große Mengen an Wasserstoff als Grundstoff benötigt. Eingesetzt wird zu über 90 % grauer Wasserstoff. 7% werden über Elektrolyseverfahren gewonnen. Zu beachten ist generell, dass ein Teil des Wasserstoffs als Nebenprodukt in den industriellen Verfahren anfällt und daher nicht durch grünen Strom ersetzbar ist. (BMWI, 2020) Nichtsdestotrotz ist davon auszugehen, dass bestehende Prozesse weitestgehend auf grünen Wasserstoff umgestellt werden können.

Langfristig ist hier ein Rückgang am Wasserstoffbedarf (zur stofflichen Nutzung) zu erwarten, insbesondere aufgrund der Abkehr vom Verbrennungsmotor in der Mobilität (Reduktionspotenzial von 10 – 15 Mt CO₂/a (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)). Im Gegenzug können neue Anwendungsfelder erschlossen werden.

Tabelle 2-2: Prognostizierter Wasserstoffbedarf in Deutschland 2015 bis 2050 [TWh H₂, Hu] (dena, 2016)

| Sektor | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ammoniakherstellung | 19,6 | 20,2 | 20 | 19,9 | 19,8 | 19,8 | 19,9 | 19,9 |
| Methanolherstellung | 12,7 | 12,6 | 12,5 | 12,4 | 12,4 | 12,3 | 12,2 | 12,1 |
| Raffinerien | 24,8 | 21,1 | 17,5 | 13,9 | 11 | 8,1 | 6,2 | 4,2 |
| Summe | 57,1 | 53,9 | 50 | 46,2 | 43,2 | 40,2 | 38,3 | 36,2 |

Anwendungen für grünen Wasserstoff:

- Ammoniaksynthese (zu beachten: CO₂ als Koppelprodukt des grauen Wasserstoffs wird aktuell zur Produktion von Harnstoff genutzt), Methanolsynthese, Chlor-Alkali-Elektrolyse
- Raffinerietechnik
- Power-to-Liquid (PtL): Produktion von Kraftstoffen aus H₂ und CO₂
- Chemisches Recycling von Abfällen

Nach (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) besteht ein **Forschungsbedarf** in den Bereichen:

- Kontinuierliche Versorgung und Speicherung von Wasserstoff
- Modularisierung und Flexibilisierung von Prozessen
- Untersuchung der Methanpyrolyse sowie von Verfahren zur Abtrennung von CO₂
- Ausbau des Wasserstoff-Pipeline-Netzes insbesondere entlang des Rheins
- Errichtung großskaliger Demonstrationsanlagen (industriennahe Forschungsvorhaben)
- Scale-ups von PtX-Prozessen sowie deren Integration in bestehende industrielle Infrastrukturen

Die Anwendungen von Wasserstoff in der chemischen Industrie sind für das Bundesland Rheinland-Pfalz von starkem Interesse. Ein Forschungs- und Entwicklungsbereich besteht hier sicher allen genannten Bereichen. Da die industriellen Prozesse jedoch sehr individuell sind, lässt sich aktuell hier nur schwer bewerten, wo größere Potenziale vorhanden sind. Hierfür sind Einzelfallbetrachtungen erforderlich, die zu Demonstrationsprojekten und anschließend zur Übertragung auf weitere Anwendungen führen.

2.2 Verkehr

Neben Anwendungen in der Industrie kommt dem Mobilitätssektor eine relevante Rolle beim Einsatz von Wasserstoff zu. Hier schreitet allerdings die batterieelektrische Entwicklung stark voran, so dass sich die Weiterentwicklung von Wasserstoffanwendungen kontrovers diskutiert wird. Die weitere Entwicklung wird hier stark von politischen Rahmenbedingungen, technologischen Entwicklungen und auch der Infrastruktur (Tankstellennetz) geprägt. (Fraunhofer IEE, 2020)

Die Wasserstoff-Nachfrage für den Straßenverkehr liegt nach (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) zwischen 4 und 220 TWh in 2030 bzw. 2050:

Tabelle 2-3: Wasserstoff-Nachfrage für den Straßenverkehr (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

| | Wasserstoffbedarf 2030 | Wasserstoffbedarf 2050 |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| PkW | Ca. 3 TWh | Ca. 80 TWh |
| LkW | Ca. 1 TWh | Ca. 140 TWh |
| Summe | Ca. 4 TWh | Ca. 220 TWh |

Aktuell sind nur wenige Modelle am Markt verfügbar. Der Ausbau des Tankstellennetzes soll bis 2030 bei 1.000 Stationen liegen. Aktuell verfügt Rheinland-Pfalz über lediglich zwei Wasserstoff-tankstellen, so dass hier ein großes Ausbaupotenzial besteht.

Anwendungsfelder

Als Konkurrenz zum Elektroantrieb sind Wasserstoff-Fahrzeuge interessant für lange Strecken (v.a. Lkw, ÖPNV). Relevante Umsetzungen können im größeren Maßstab bereits bis 2030 erfolgen. Flug- und Seeschiffverkehr weisen hohe Anforderungen an die Energiedichte auf, daher wird hier langfristig verstärkt PtL (synthetische Kraftstoffe mit H₂ als Zwischenprodukt) zum Einsatz kommen.

Forschungsbedarf

Es sind eine deutliche Weiterentwicklung von Brennstoffzellen-Antrieben (Industrialisierung) und der Aufbau eine Betankungs-Infrastruktur erforderlich. Weiterhin sind insbesondere die Möglichkeiten zur Speicherung und zum Transport weiter zu entwickeln, die Kosten für Brennstoffzellen zu reduzieren und deren Betriebsdauer zu erhöhen. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

Kritisch gesehen wird die Unsicherheit bzgl. der Kostenentwicklung (Brennstoffzelle, Tank, H₂-Herstellung) sowie im Vergleich zur Elektromobilität der geringere Wirkungsgrad. Bezogen auf die entsprechenden BSZ-Fahrzeuge weisen Pkw und Busse aktuell ein TRL³ von 8 – 9 auf.

³ TRL = Technology Readyness Level, vgl. Anhang)

2.3 Stromerzeugung / Versorgungssicherheit

Aufgrund der zentralen Lage Deutschlands und des damit guten Austausches an Strom mit den Nachbarländern, ist der Bedarf an Rückverstromung kein wichtiger Treiber für die Wasserstoffwirtschaft. Der Sektor kann sowohl weitgehend entwickelte Gasturbinen einsetzen als auch Brennstoffzellen, sofern diese durch die Entwicklung anderer Sektoren günstig verfügbar sind. Gasturbinen lassen aktuell nur eine Beimischung von Wasserstoff zu, die Hersteller haben sich jedoch dazu verpflichtet, anwendungsspezifisch bis 2030 auch 100% Wasserstoff als Brennstoff zu ermöglichen. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

2.4 Gebäude

„Der Gebäudesektor generiert kurz und mittelfristig keinen relevanten Wasserstoffbedarf. Langfristig kann es unter bestimmten Rahmenbedingungen (bei langsamem Ausbau von Windenergieanlagen sowie eingeschränkter Verfügbarkeit von CO₂-neutralem Stromimport) zu einem steigenden Bedarf an klimaneutralem Wasserstoff im Gebäudesektor kommen.“ (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) Hierdurch kann eine Substitution von Erdgas erfolgen.

Mittels Luft- und Erdwärmepumpen können langfristig bis zu 80% der Gebäude dezentral mit Wärme versorgt werden, was sich effizienter gestaltet als der Einsatz von Wasserstoff. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Klimaziele im Gebäudesektor eine Reduktion der Emissionen um 66% bis 2030 fordern, wofür die Wasserstofftechnologie zu spät kommt. (Fraunhofer IEE, 2020).

Grundsätzlich wird zwischen drei Ansätzen in der Wasserstoffnutzung in der Gebäudeenergieversorgung unterschieden:

- Zum einen bietet sich die leitungsgebundene Wasserstoffversorgung für eine dezentrale Strom- und Wärmeversorgung als reines Wasserstoffnetz an.
- Zum zweiten gibt es die Möglichkeit, Wasserstoff in das Erdgasnetz einzuspeisen. Großer Vorteil ist, dass vorhandene Infrastruktur genutzt werden kann. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) Infrage für eine solche Beimischung kommt durch Elektrolyse erzeugter Wasserstoff sowie synthetisch erzeugtes Methan. Die Menge an eben genanntem Methan ist nicht begrenzt, für Wasserstoff liegt die Mengengrenze zum Beimischen bei bis zu 10 Vol.-%. Um diesen Anteil auf 20 Vol.-% zu erhöhen, wie es der Deutsche Verband des Gas- und Wasserfachs (DVGW) erprobt, bedarf es Umrüstungen von Werkstoffen, Heizkesseln oder auch Fahrzeugtanks. (Deutscher Bundestag, 2019) Diese 20 Vol.-% entsprechen jedoch nur einem energetischen Anteil von etwa 7 – 8 %, der Beitrag zum Klimaschutz ist folglich eher gering. (Fraunhofer IEE, 2020) (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

- Eine dritte, jedoch sehr teure und meist sehr ineffiziente Variante ist die Nutzung dezentraler Wasserstoffsysteme. Diese ermöglichen mittels erneuerbarem Strom und Elektrolyseur die Energieautarkie oder Energiespeicherung. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

Die Menge an Erneuerbaren Energien zur **Bereitstellung von Niedrigtemperaturwärme** mit Wasserstoff steigert den Bedarf gegenüber einer Wärmepumpe um 500 – 600 %. Grund dafür sind hohe Verluste bei Umwandlungs- und Transportverluste. Mit effizienten Wärmepumpen lassen sich im Gebäudesektor v.a. sanierte Gebäude effizient versorgen, was die Nutzungskonkurrenz zum Wasserstoffbedarf in anderen Sektoren senkt und den allgemein notwendigen Import an Wasserstoff mindert. Der Strombedarf für diese Wärmepumpen kann auch kosteneffizient fast ausschließlich aus nationalen regenerativen Energiequellen gedeckt werden. Bis zu 80 % des Energiebedarfs in Gebäuden kann mit Hilfe moderner Luft- und Erdwärmepumpen gedeckt werden. (Fraunhofer IEE, 2020)

2.5 Empfehlungen für die Priorisierung

In Anlehnung an die ausgewerteten Studien ((Fraunhofer IEE, 2020), (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) etc.) und der Bedeutung für Rheinland-Pfalz ergibt sich hinsichtlich Effizienz und Potenzial folgendes Ranking bei der Nutzung von Wasserstoff:

1. Substitution von grauem Wasserstoff (Erdgasreformation)

Insbesondere in der chemischen Industrie ergibt sich durch die Substitution der Erdgasreformation durch grünen Wasserstoff das höchste Potenzial, Emissionen zu reduzieren.

2. Wasserstoff-Direktnutzung in der Industrie

Die direkte Nutzung von grünem Wasserstoff in industriellen Prozessen weist ebenfalls eine hohe Effizienz auf (z.B. Bereitstellung von Prozesswärme)

3. Verkehr

Der Einsatz von Wasserstoff in der Mobilität wird stark diskutiert. Hier hängt das Potenzial in der Zukunft stark von der Entwicklung der Elektromobilität als Konkurrenztechnologie ab. Der Einsatz von Wasserstoff ist jedoch besonders in Bereichen, in denen eine hohe Energiedichte notwendig ist (Langstrecken, ÖPNV, Lkw), von Interesse.

4. Stromerzeugung / Wasserstoff-Direktnutzung in Kraftwerken, KWK-Anlagen & Heizwerken

Als untergeordnete Option besteht weiterhin die Möglichkeit, Wasserstoff in dezentralen Kraftwerken bzw. KWK-Anlagen in der Rückverstromung einzusetzen. Zu beachten ist

jedoch, dass das Potenzial hier eher gering ausfällt und erhebliche Umwandlungsverluste gegeben sind. Weiterhin ist aktuell nur eine Beimischung von 10% - 20% ins Erdgasnetz möglich. Hier kann durch das vorhandene Erdgasnetz eine gute Speicherung des Wasserstoffs sowie eine flexible Nutzung erfolgen.

Durch die Nutzung von Wasserstoff können Erdgas substituiert und somit entsprechende Emissionen reduziert werden. Wasserstoff kann also hier – ergänzend zur direkten Nutzung Erneuerbarer Energien - einen kleinen Beitrag zur Dekarbonisierung der Stromerzeugung leisten. Die Rückverstromung wird nicht als Hauptanwendung angesehen und aufgrund des hohen Wasserstoffbedarfs in den anderen Feldern eher in Einzelfällen Anwendung finden.

5. Gebäude / Niedertemperaturwärme

Der Bereitstellung von Niedertemperaturwärme in der Gebäudeenergieversorgung kommt insbesondere durch effizientere konkurrierende Systeme wie Wärmepumpen nur eine geringe Bedeutung zu.

3 Bedarf & Potenzial an grünem Wasserstoff

Die für die Energiewende voraussichtlich benötigten Mengen an Wasserstoff werden nur anteilig in Deutschland bzw. in Rheinland-Pfalz erzeugt werden können. Hier ist auch zukünftig von einem Import an Energie bzw. Wasserstoff auszugehen. (BMWI, 2020)

3.1 Bedarf an Wasserstoff in Deutschland

„Die Bundesregierung sieht bis **2030** einen Wasserstoffbedarf von ca. **90 bis 110 TWh**. Um einen Teil dieses Bedarfs zu decken, sollen bis zum Jahr 2030 in Deutschland Erzeugungsanlagen von bis zu 5 GW Gesamtleistung ... entstehen. Dies entspricht einer grünen Wasserstoffproduktion von bis zu 14 TWh und einer benötigten Strommenge von bis zu 20 TWh.“ Bis 2035 (bzw. spätestens bis 2040) sollen nach Möglichkeit weitere 5 GW zugebaut werden. (BMWI, 2020) Mit den geplanten Markthochlauf wird ein Anstieg des Wasserstoffbedarfs v.a. in der Industrie und im geringen Maße beim Verkehr gesehen.

Die veröffentlichten Studien fokussieren ihre Szenarien hauptsächlich auf die **Langzeitbe- trachtung bis 2050**. Hier gibt es zahlreiche, teilweise auch sehr unterschiedliche Einschätzungen.

Bei der Abschätzung des Wasserstoffbedarfs müssen zusätzlich zur direkten Nutzung von H₂ auch nachgelagerte Prozesse bzw. die aufbauende Synthese zu PtG (Methan) und PtL (Flüssigerdgas, synthetische Kraftstoffe) berücksichtigt werden. „Flüssigbrennstoffe können zur Deckung der Endenergienachfrage aus Gebäude, Industrie und Verkehr eingesetzt werden. Des Weiteren können synthetische Gase zur Speicherung fluktuierenden EE-Stroms durch Rückverstromung in Gaskraftwerken im Stromsektor genutzt werden.“ (dena, 2018)

| Studie | Szenario | Beschreibung | Wasserstoff-Nachfrage 2050 | Nachfrage PtCH ₄ und PtL in 2050 |
|-------------|-------------------|--|--|---|
| NOW (2018a) | S85 S90 S95 | 80-95-%-CO ₂ -Reduktionsziel in 2050, Stromimport generell möglich sowie Import synthetischer Kraftstoffe ab 2025 | S85: 402 TWh S90: 522 TWh S95: 433 TWh | S85: 126 TWh gesamt S90: 230 TWh gesamt S95: 645 TWh gesamt |
| Dena (2018) | EL95 TM95 | EL95: Elektrifizierungsszenario mit 95-%-Reduktion TM95: Technologiemi- x-Szenario mit 95-%-Reduktion | TM80: 169 TWh H ₂ TM95: 169 TWh H ₂ | EL95: 321 TWh PtCH ₄ und 43 TWh PtL TM95: 630 TWh PtCH ₄ und 108 TWh PtL |
| BDI (2018) | 95-%-Pfad | 95-%-Reduktion | 25 TWh | 383 TWh PtCH ₄ PtL |

Abbildung 3-1: Auflistung der Szenarien, mit Kurzbeschreibungen sowie Angaben zu PtCH₄ und PtL-Nachfrage in Deutschland in 2050 (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

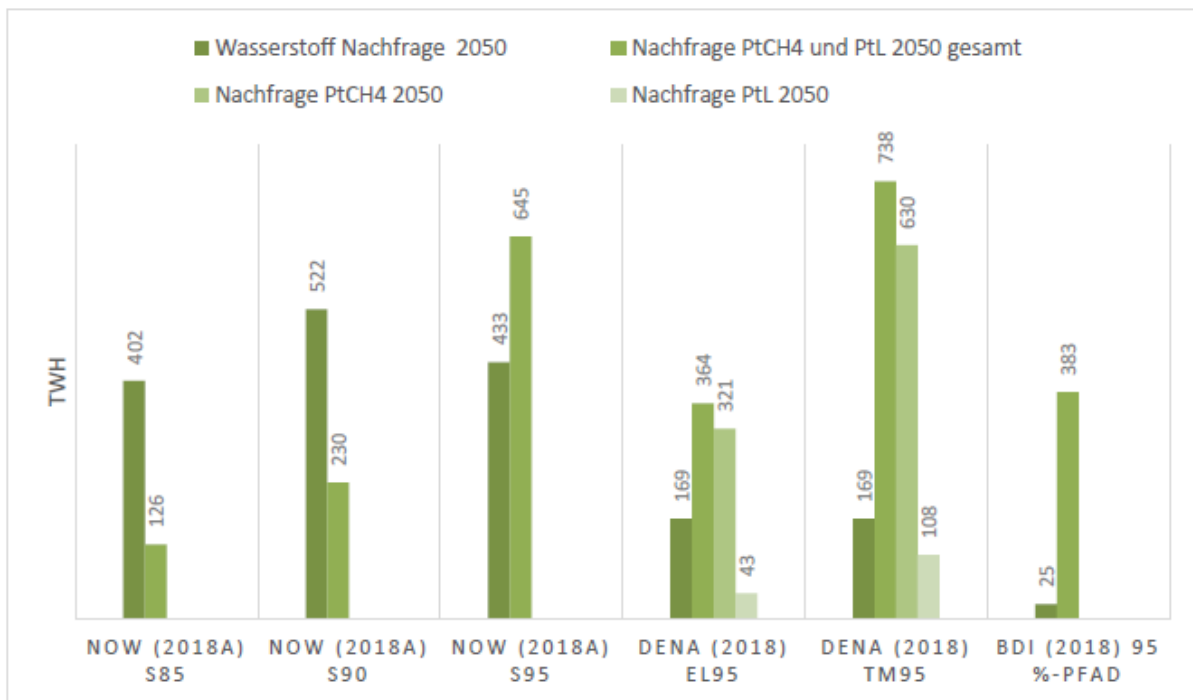


Abbildung 3-2: Wasserstoff-, PtCH4- und PtL-Nachfrage in Deutschland in 2050 (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

Die Wasserstoff-Roadmap (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) geht für 2050 von einem Szenario aus, in welchem größere Anteile an stofflichen Energieträgern (Wasserstoff, synthetisches Methan und synthetische Flüssigkraftstoffe) eingesetzt werden („Hohes Szenario“). Beim „niedrigen Szenario“ wird dagegen von einer weitestgehenden Elektrifizierung aller Sektoren ausgegangen.

Die dargestellten Mengen an Wasserstoff beinhalten dabei die Direktnutzung von Wasserstoff (z.B. in Brennstoffzellen-Fahrzeugen oder Niedertemperaturwärme) sowie die Weiterverarbeitung zu synthetischen Brenn- und Kraftstoffen.

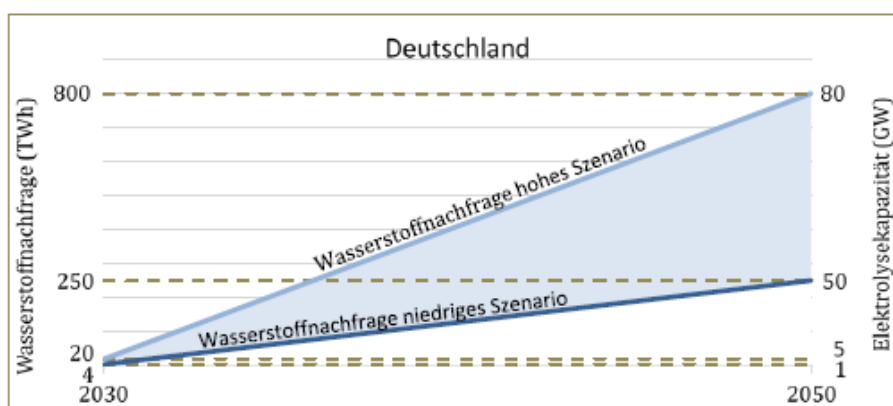
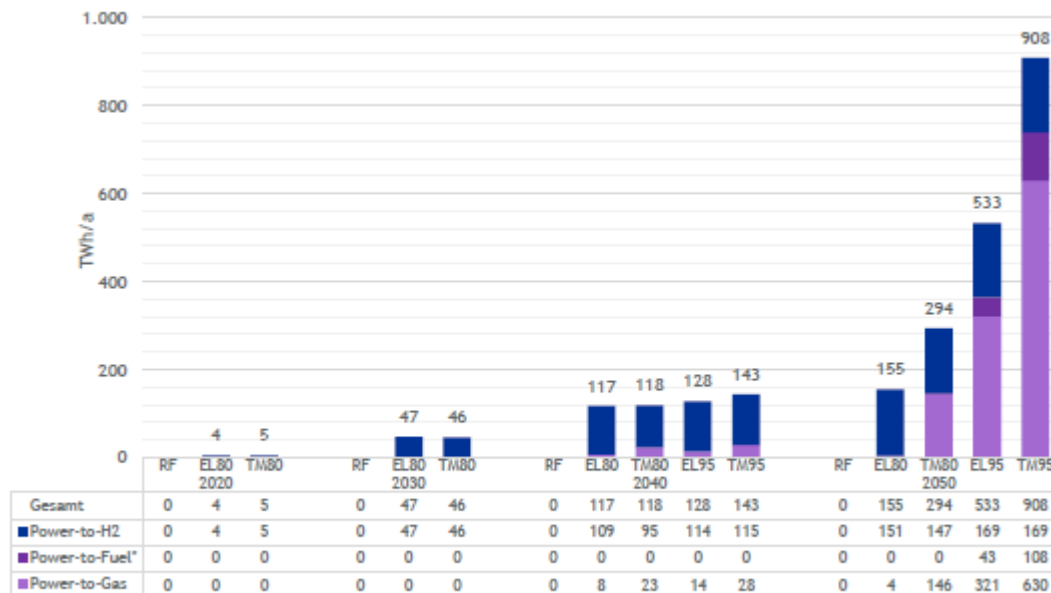


Abbildung 3-3: Plausible Bandbreiten für die Wasserstoffnachfrage und Elektrolysekapazitäten für die Jahre 2030 und 2050 (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

Die detailliertesten Werte zum Bedarf an Wasserstoff liefert (dena, 2018). Hier werden verschiedene Szenarien berücksichtigt. Der **Gesamtbedarf an Power-to-X** wird entsprechend folgender Abbildung für die Jahre 2020 bis 2050 aufgeteilt auf die Energieträger Power-to-H₂, Power-to-Fuel und Power-to-Gas:



*Power-to-Fuel umfasst synthetischen Heizöl, Schweröl, Diesel, Benzin und Kerosin.

Abbildung 3-4: Szenarienvergleich – PtX nach Energieträger für die Jahre 2020 – 2050 (dena, 2018)

Der erzeugte Wasserstoff findet in den Szenarien hauptsächlich Einsatz in der Industrie, im Verkehr und als Beimischung ins Gasnetz.

In 2030 trägt aus Elektrolyse erzeugter Wasserstoff bereits mit 45 TWh zur Bedarfsdeckung bei. Es ist davon auszugehen, dass der Wasserstoff hierbei in erster Linie in der Industrie (Substitution der Erdgasreformierung) zum Einsatz kommt (Bedarf in 2030 ca. 46 TWh/a, vgl. Kap. 2.1).

3.2 Ableitung des Wasserstoffbedarfs auf das Land Rheinland-Pfalz

Die ausgewiesenen Bedarfszahlen des Szenarios TM95 aus (dena, 2018) wurden über Einwohnerzahlen und industrielle Schwerpunkte auf Rheinland-Pfalz übertragen. Dabei wurden zunächst der Wasserstoffbedarf des Landes Nordrhein-Westfalen als Industrie-Hot-Spot sowie einwohnerstarkes Bundesland vom Bedarf in Deutschland vom Gesamtbedarf abgezogen. In der Differenzbetrachtung wurde dann über einen Faktor der Übertrag auf das Land Rheinland-Pfalz vorgenommen anhand der Einwohnerzahlen und dem starken Anteil der chemischen Industrie.

Tabelle 3-1: Grundlagen zur Abschätzung des PtX-Bedarfs in RLP

| | |
|---|--|
| Wasserstoffbedarf NRW zu Dtl. | 20 – 30% (hier Annahme 25%) (Michalski, 2019) |
| Einwohnerzahlen 2019 | |
| Deutschland | 83,02 Mio. |
| Nordrhein-Westfalen | 17,93 Mio. |
| Rheinland-Pfalz | 4,09 Mio. |
| Umsatz Verarbeitendes Gewerbe 2019 | (Statistisches Landesamt RLP, 2019) |
| Deutschland | 1.948.035 Mio. € |
| Nordrhein-Westfalen | 357.840 Mio. € |
| Rheinland-Pfalz | 105.856 Mio. € |
| Chemische Industrie | (Statistisches Landesamt RLP, 2019) |
| Anteil Deutschland | 7,6% |
| Anteil Rheinland-Pfalz | 28,3% |

Der Gesamtbedarf an synthetischen Brennstoff im Technologiemixszenario im Jahr 2050 von 908 TWh/a wird dabei auf vier Sektoren verteilt. **Bei Übertragung auf das Land Rheinland-Pfalz ergibt einen PtX-Bedarf von rund 47 TWh/a sowie ein direkter Wasserstoffbedarf von 8 TWh im Jahr 2050** (Anteil von 18,5% entsprechend (dena, 2018)). Dabei entfallen ca. 4 TWh/a auf den Sektor Industrie und hier ca. 2,9 TWh/a auf die stoffliche Nutzung (vgl. hierzu 2.1) und 1,1 TWh/a auf die energetische Nutzung.

Tabelle 3-2: Übertragung des PtX-Bedarfs im Jahr 2050

| | Bedarf PtX Dtl | Bedarf PtX Dtl abzgl. NRW | Faktor | Bedarf PtX RLP | Bedarf H₂ RLP |
|------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------------------|
| | TWh/a | TWh/a | | TWh/a | TWh/a |
| Industrie | 327 | 245 | 8% | 20 | 4 |
| Gebäude | 151 | 113 | 6% | 7 | 1 |
| Verkehr | 262 | 197 | 6% | 12 | 2 |
| Energie | 169 | 127 | 6% | 8 | 1 |
| Summe | 908 | 682 | | 47 | 8 |

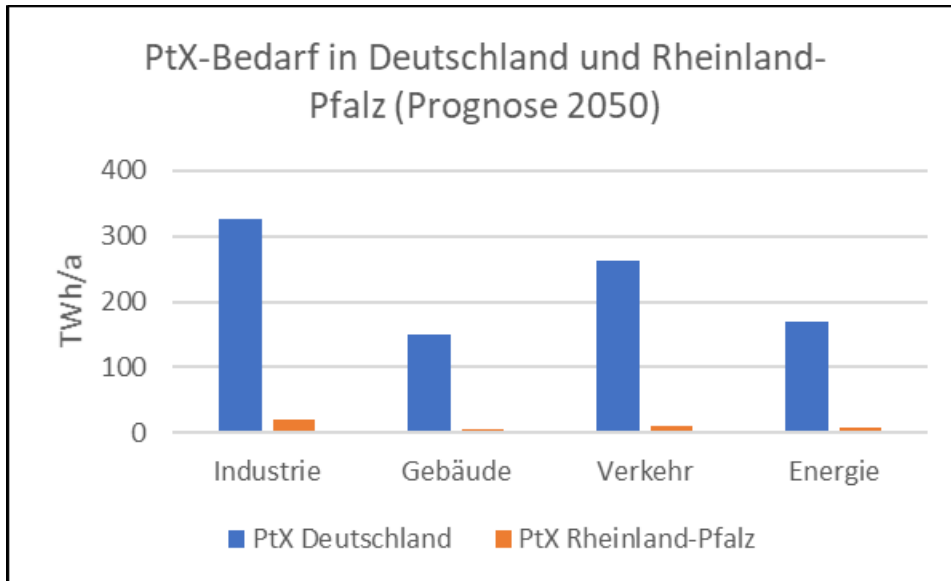


Abbildung 3-5: PtX-Bedarf in Deutschland und Rheinland-Pfalz (Prognose 2050)

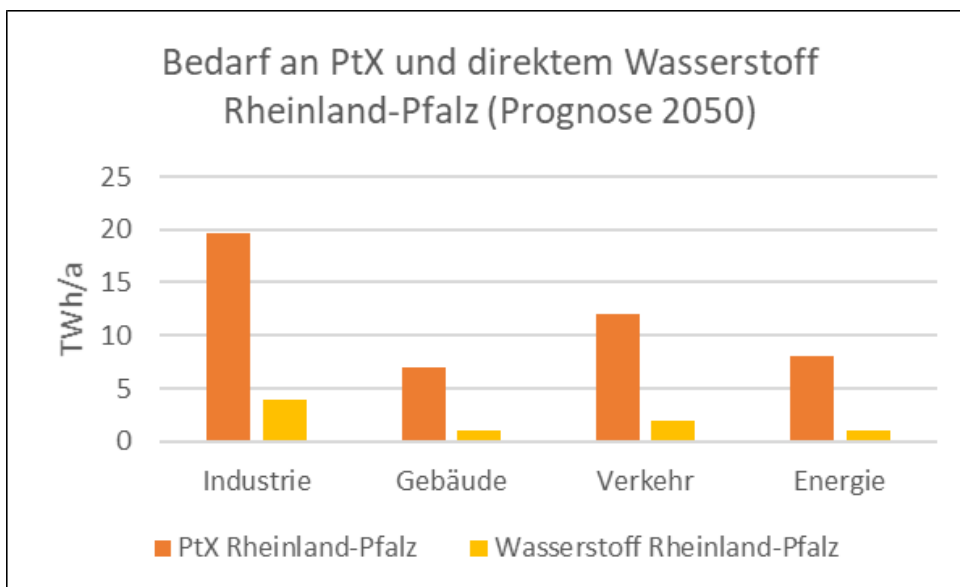


Abbildung 3-6: Bedarf an PtX und direktem Wasserstoff in Rheinland-Pfalz (Prognose 2050)

Abschätzung für 2030

Bei Übertrag des Wasserstoffbedarfs auf 2030 ergäbe sich für Deutschland ein Wasserstoff-Bedarf von 46 TWh/a (vgl. Abbildung 3-4) bzw. für RLP ca. 2,4 TWh/a. Es wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um direkt genutzten Wasserstoff handelt, PtL und PtG spielen noch keine relevante Rolle.

3.3 Diskussion Wasserstoffbedarf Industrieunternehmen

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Wasserstoffmengen basieren auf möglichen bundesweiten Szenarien für die Zukunft. Die Bereitstellung von Prozess- oder auch Gebäudeenergie wird sich zukünftig verlagern und es wird zu Substitutionen der fossilen Energieträger hauptsächlich zu Erneuerbaren Strom oder Wasserstoff und entsprechenden Umstellungen in den betreffenden Anlagen kommen. In welchem Maße Wasserstoff zum Einsatz kommen wird, hängt neben den wirtschaftlichen und regulatorischen auch von den technologischen Rahmenbedingungen ab. Ziel bleibt hierbei die Reduzierung von Emissionen auf möglichst wirtschaftlichem Weg. Vor diesem Hintergrund weisen die verschiedenen Szenarien, je nach Schwerpunktsetzung, sehr unterschiedliche Ergebnisse für den voraussichtlichen Wasserstoffbedarf in Deutschland auf.

Anhand der bundesweiten Werte erfolgte eine **Top-Down-Abschätzung** auf Rheinland-Pfalz. Dabei wurde Nordrhein-Westfalen als dicht bewohntes und industrielles Zentrum ausgenommen (hier konnte auch eine Studie herangezogen werden, die einen Wasserstoffbedarf angibt) und die Zahlen auf Rheinland-Pfalz heruntergebrochen. Dementsprechend wurden hier keine einzelnen Industrieunternehmen (BASF, Daimler, Boehringer Ingelheim etc.) betrachtet, die natürlich in der allgemeinen Betrachtung der Studien nicht explizit erfasst werden konnten.

Erforderlich hierfür wäre eine **Bottom-Up-Analyse**, welche ausgehend vom Bedarf einzelner Unternehmen/Branchen auf einen Gesamtbedarf für das Land hochrechnet. Hierfür liegen nach aktuellem Stand keine ausreichenden und aussagekräftigen Zahlen vor. Daher wird in den nachfolgenden Kapiteln von den in Kapitel 3.2 dargestellten Werten ausgegangen.

Nachfolgende Beispiele aus der BASF zeigen, dass die Industrie auf dem Weg weg von fossilen Energieträgern hin zu Erneuerbarem Strom und der Substitution von emissionsbelasteten Prozessen ist. Dabei werden Erdgas und Mineralöl nicht zu 100% durch Wasserstoff bzw. Power-To-X ersetzt werden. Auch die Umstellung auf Erneuerbaren Strom spielt hier eine wesentliche Rolle. Die industriellen Prozesse sind vielfältig und Umstellungen werden derzeit noch nicht flächendeckend geprüft oder erprobt.

Der im Rahmen der Top-Down-Analyse ausgewiesene Bedarf an Power-To-X von 20 TWh/a bzw. von direktem Wasserstoff von 4 TWh/a steht dabei nicht im Widerspruch zu einer Bottom-Up-Analyse. Durch die großen Industrieunternehmen, v.a. die BASF AG, die nicht repräsentativ für das Bundesgebiet ist, ergibt sich jedoch eine Verzerrung. So kann voraussichtlich davon ausgegangen werden, dass der Wasserstoffbedarf höher liegen wird. Es kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass der gesamte Bedarf an fossilen Brennstoffen der BASF AG (16 TWh/a) zukünftig in Form von Wasserstoff besteht.

In Summe liegt der Bedarf an Erdgas und Mineralöl in der rheinland-pfälzischen Industrie bei etwa 71 TWh/a. (Statistisches Landesamt RLP, 2020) Zu den umsatzstärksten Unternehmen in RLP gehören die BASF AG mit 59 Mrd. € in 2019 (BASF, 2020), die Daimler AG mit dem Standort Wörth mit 40 Mrd. €. (Daimler, 2020) und Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG

mit 19 Mrd. € (Boehringer Ingelheim, 2020). Die BASF AG wies im Jahr 2019 einen Strombedarf von 6,17 TWh auf, der Bedarf an fossilen Brennstoffen lag bei 16,36 TWh. (BASF SE, 2020) Das Daimler Werk in Wörth hatte im Jahr 2018 einen Erdgasverbrauch von etwa 0,187 TWh. Der Gesamtenergieverbrauch ist mit 1,585 TWh/a angegeben. (Daimler, 2020)

Zu beachten ist hier, dass neben der energetischen auch eine **stoffliche Nutzung der Energieträger** erfolgt (z.B. Erdgasreformierung in der chemischen Industrie). Hier ist aktuell die BASF AG bereits sehr aktiv in der Entwicklung alternativer Prozesse zur Wasserstofferzeugung aus Erdgas mittels Methanpyrolyse:

Im Rahmen des Carbon Managements werden an der BASF CO₂-arme Produktionsverfahren entwickelt. Die Strategie beinhaltet ein CO₂-freies Wachstum bis zum Jahr 2030. Die BASF hat bereits ein Forschungsprogramm zur Senkung der CO₂-Emissionen um bis zu 90% angestoßen. Wasserstoff wird in vielen Prozessen der BASF bereits als Reaktionspartner benötigt. Deshalb wird mit Kooperationspartnern mit der Methanpyrolyse eine neue Prozesstechnologie zur Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas entwickelt. Das anfallende Kohlenstoffprodukt kann in der Stahl- oder Aluminiumproduktion eingesetzt werden.

Weiterhin wird bei der BASF erprobt, ob die Beheizung der Steamcracker (bisher mit Erdgas beheizt) zukünftig über Erneuerbaren Strom erfolgen kann. (BASF, 2020) (BASF, 2019)

3.4 Strombedarf und Potenzial an grünem Wasserstoff

Der Bedarf an Wasserstoff für alle PtX-Anwendungen wurde mit 47 TWh/a in 2030 bzw. für direkt genutzten Wasserstoff mit 8 TWh/a abgeschätzt. Diese Mengen sind teilweise in Rheinland-Pfalz, jedoch zu großen Teilen voraussichtlich jedoch zu importieren (hauptsächlich aus Nordafrika (PV-Strom) oder Großbritannien, Spanien, Portugal etc. (Wind-Strom) aufgrund der günstigeren Produktionskosten). Nach (Fraunhofer IEE, 2020) lassen sich in Deutschland 50 bis 150 TWh/a an grünem Wasserstoff erzeugen, (dena, 2018) schätzt für 2050 130 bis 164 TWh/a an synthetischen Brennstoffen ab.

Wie groß die in Deutschland und auch in Rheinland-Pfalz erzeugten Wasserstoffmengen sein werden, hängt von den gesetzlichen, wirtschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen ab. Hierfür sind jetzt und in den nächsten Jahren die Weichen zu stellen. In Deutschland und damit in Rheinland-Pfalz sollte nach (BMWI, 2020) ein Heimatmarkt zur Erzeugung von Wasserstoff etabliert werden, der die inländische Produktion und Nutzung sowie die verstärkte Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energien beinhaltet.

Das Land Rheinland-Pfalz hat sich bilanziell zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 den Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien zu decken. (MUEEF.RLP) Allgemein gilt das Ziel in Rheinland-Pfalz, den Ausstieg aus der Atomkraft umzusetzen und die Energiewende mit dem Schwerpunkt Ausbau erneuerbarer Energien, Steigerung der Energieeffizienz und mehr Energieeinsparung voran zu treiben. (MUEEF.RLP, 2018)

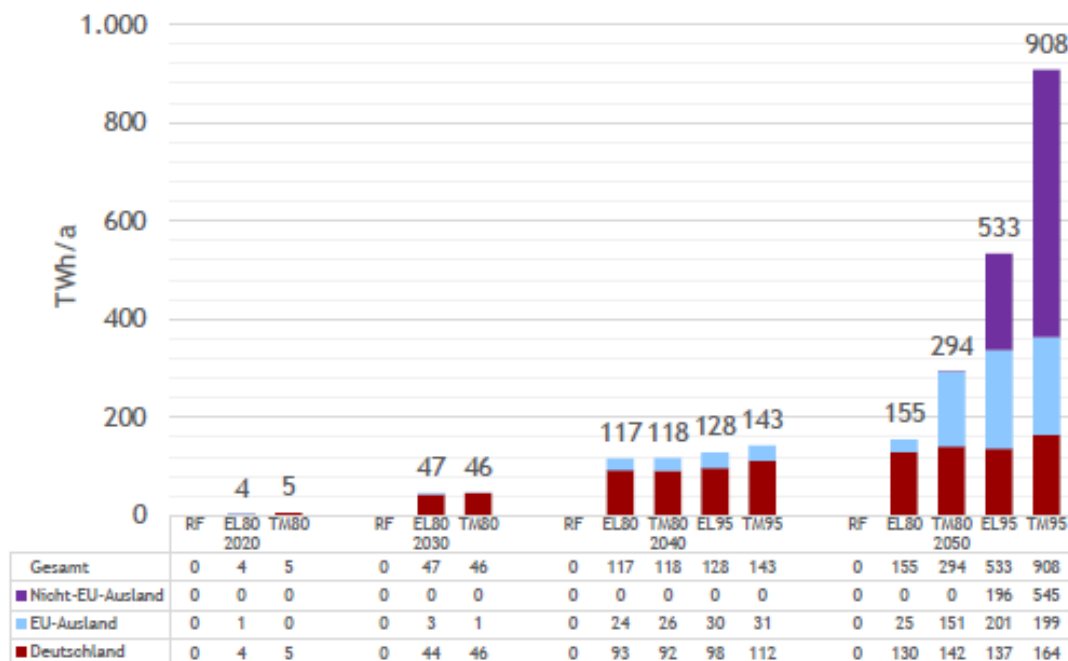


Abbildung 3-7: Szenarienvergleich – PtX nach Herkunft (dena, 2018)

Die Szenarien zeigen, dass etwa 18% bis 26% der Gesamtmenge in Deutschland produziert werden kann. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um den direkt genutzten Wasserstoff (dena, 2018).

Bezogen auf Rheinland-Pfalz kann damit ein Anteil von etwa **8 TWh/a an Wasserstoff für 2050** angestrebt werden. Zur Erzeugung dieser Menge bei einem Wirkungsgrad von 70 % werden ca. **11,4 TWh/a an Erneuerbarem Strom** benötigt. Die technischen Potenziale hierfür sind vorhanden.

Zum Vergleich: In 2017 lag der Anteil Erneuerbarer Energieträger an der heimischen Stromerzeugung bei knapp 10 TWh/a bei einem Gesamtstromverbrauch von 29,1 TWh/a. (Statistisches Landesamt RLP, 2020) Um die Ziele einer klimaneutralen Energieversorgung umzusetzen, müsste der gesamte Strombedarf und zusätzlich der grüne Wasserstoff aus erneuerbaren Energien erzeugt werden.

Für Rheinland-Pfalz ist bei einem Bedarf in 2050 von etwa 8 TWh/a Wasserstofferzeugung und durchschnittlich etwa 2.600 Volllaststunden eine Elektrolyse-Kapazität von etwa 3,1 GW erforderlich. Bis 2030 sollten davon bereits etwa 25% bzw. ca. 800 MW installiert sein (vgl. Kap.4.4). Ausgehend von einem Volumen von etwa 800 MW in Rheinland-Pfalz, sollten rund 8-10 Projekte angestrebt werden (Annahme jeweils ca. 100 MW Elektrolyseleistung).

Zur Erzeugung des Wasserstoffs wird in 2050 eine Elektrolyseleistung von etwa 3,1 GW erforderlich sein. Bei einem Wirkungsgrad von 70% entspricht dies einer Leistung an regenerativen Stromerzeugern von etwa 4,4 GW. Zum Vergleich: in 2019 lag die installierte Leistung von Photovoltaikanlagen bei 2,1 GWp und 3,6 GW an Windstrom. (Energieagentur RLP GmbH, 2020) Die reine Wasserstofferzeugung könnte damit mit Erneuerbarem Strom bilanziell gedeckt werden, für die Deckung des restlichen Strombedarfs ist aber ein weiterer Zubau an Erneuerbaren Energien erforderlich.

3.5 Klimawirkung für Rheinland-Pfalz

Mit dem Einstieg in die Wasserstofftechnologien werden andere fossile Energieträger verdrängt. Um die Klimawirkung für Rheinland-Pfalz abzuschätzen, wurde davon ausgegangen, dass hier eine Substitution von Erdgas (v.a. in der Industrie) erfolgt. Natürlich wird es in industriellen Prozessen als auch im Verkehr etc. auch zum Ersatz anderer Energieträger kommen, der Umfang ist heute jedoch noch nicht abzuschätzen.

Bei Substitution von Erdgas durch grünen Wasserstoff reduzieren sich die CO₂-Emissionen von 250 g/kWh (nach GEMIS inkl. Vorketten (IINAS GmbH, 2020)) auf etwa 26 g kWh (Greenpeace Energy EG, 2020). Damit würden in 2030 in RLP bei einer Wasserstofferzeugung von 2,4 TWh (vgl. Kap. 3.2) ca. 537.600 t CO₂/a eingespart. In 2050 werden bei einer Erzeugung von 8 TWh/a ca. 1,8 Mt CO₂/a eingespart.

Tabelle 3-3: Emissionseinsparung beim Einsatz von Wasserstoff 2030

| | Erdgas | Wasserstoff | |
|----------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| Energiebedarf | 2,4 | 2,4 | TWh/a |
| CO₂-Emissionen | 600.000 | 62.400 | t CO ₂ /a |
| Einsparung Emissionen | | 537.600 | t CO ₂ /a |

Tabelle 3-4: Emissionseinsparung beim Einsatz von Wasserstoff 2050

| | Erdgas | Wasserstoff | |
|----------------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| Energiebedarf | 8 | 8 | TWh/a |
| CO₂-Emissionen | 2.000.000 | 208.000 | t CO ₂ /a |
| Einsparung Emissionen | | 1.792.000 | t CO ₂ /a |

4 Erzeugung von Wasserstoff – Kapazitäten und Kosten

Unter dem Gesichtspunkt des Klimaschutzes kommt zukünftig der Wasserelektrolyse eine zentrale Rolle zu. Wasserstoff wird aktuell hauptsächlich in der Industrie eingesetzt. Die Herstellung erfolgt stationär über die Reformierung fossiler Quellen (hauptsächlich Erdgas).

Die bislang stationäre Wasserelektrolyse wird zu einer entscheidenden industriepolitischen Komponente durch die Erzeugung des Wasserstoffs sowie zur Flexibilisierung im Stromnetz, aber auch für den Export. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) Auch bei den erforderlichen Importen wird es unerlässlich sein, umfangreiche Elektrolysekapazitäten in Deutschland aufzubauen.

Vielversprechende Elektrolyse-Verfahren sind:

- Alkalische Wasserelektrolyse mit flüssiger Kalilauge: Betrieb bei 50-80°C, ausgereiftes Verfahren, TRL⁴ 9
- Saure Membran- bzw. PEM-Elektrolyse⁵: Betrieb bei 50-80°C, bisher Nischenanwendungen, gut geeignet für die Kopplung mit EE, TRL³ 6-8
- Hochtemperatur- bzw. Dampfelektrolyse: Betrieb bei ca. 800 °C, TRL³ 4-6, geeignet für Kopplung mit industriellen Prozessen

Alternative CO₂-arme Verfahren wie die Reformierung (mit anschließender Abtrennung von CO₂) sowie die Methanpyrolyse werden neben der Elektrolyse eine Rolle spielen. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019). Die Methanpyrolyse wird von der BASF vorangetrieben, ein großtechnischer Einsatz vor 2030 scheint derzeit jedoch noch nicht in Aussicht.

4.1 Erforderliche Maßnahmen

Die technologische Basis zur Herstellung von Wasserstoff existiert, allerdings besteht noch ein deutlicher Forschungs- und damit Förderungsbedarf, um die Kosten zu reduzieren und die Technologie konkurrenzfähig zu machen. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

Um die Elektrolyse-Kapazitäten zur Verfügung zu stellen, sind vielseitige technologische, marktwirtschaftliche und regulatorische Maßnahmen erforderlich:

- Kostensenkung auf unter 500 € pro kW Elektrolyseurleistung erforderlich
- F&E (angepasste Zellmaterialien zur Erhöhung der Leistungsdichte, Effizienz und Lebensdauer, Senkung des spezifischen Bedarfs kritischer Materialien, Optimierung des Energiebedarfs bei flexibler und dynamischer Betriebsweise),
- Skaleneffekte, Automatisierung in der Produktion

⁴ TRL = Technology Readiness Level, vgl. Anhang

⁵ PEM: Proton Exchange Membran

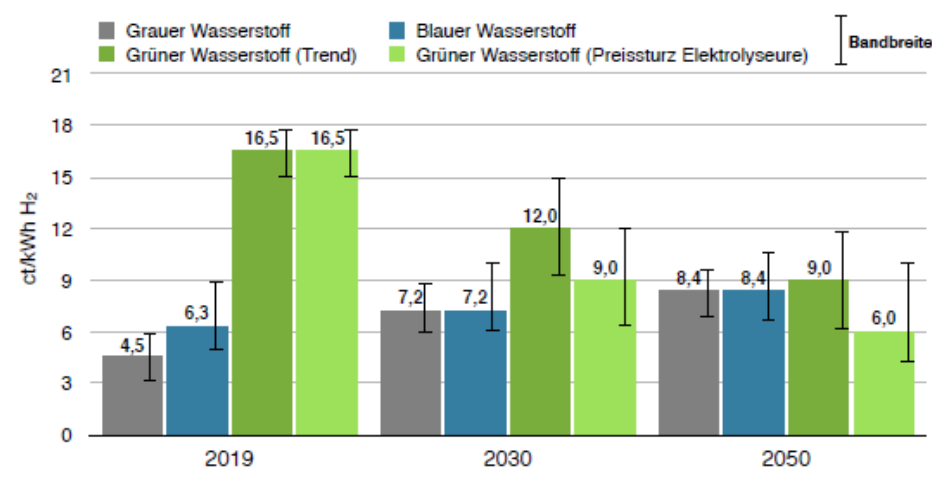
- Etablierung von Zulieferketten, Aufbau einer wettbewerbsfähigen Elektrolyse-Industrie
- Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen für die Installation und den Strombezug von Elektrolyseuren, Schaffung von Instrumenten zur Nachfrage-Erhöhung nach grünem Wasserstoff, Umsetzung der Erneuerbare Energien Richtlinie (RED II) in nationales Recht

4.2 Kostenstrukturen

Die Wasserstoffelektrolyse weist schon heute eine Kostendegression auf. Für die Wirtschaftlichkeit sind jedoch neben den Investitionen die Betriebs- und Verbrauchskosten und hier die Stromkosten nicht weniger entscheidend. (Fraunhofer IEE, 2020) Die Belastung von Strom mit Abgaben und Steuern begrenzt aus betriebswirtschaftlicher Sicht aktuell den Einsatz von grünem Wasserstoff. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) Nach Einschätzung von (dena, 2018) könnte die elektrolysebasierte Wasserstoffherstellung um etwa ein Drittel günstiger werden, würden Elektrolyseure nicht mehr als Letztverbraucher beim Strom gelten und damit von der EEG-Umlage befreit. Damit würden die Verfahren besonders für Industrie und Verkehr interessanter.

„Wasserelektrolyseure werden großmaßstäblich in Regionen ihren Einsatz finden, in denen die Stromgestehungskosten durch PV- und Windanlagen bei unter 3 Ct/kWh liegen und darüber hinaus die Volllaststundenzahl solcher Anlagenparks über 4000 h/Jahr beträgt.“ (Fraunhofer ISI/ISE, 2019). Für weniger ertragreiche Standorte, u.a. auch in Rheinland-Pfalz, ergeben sich geringere Auslastungen bzw. höhere spezifische Kosten.

Aktuell zeigt sich, dass grauer Wasserstoff noch am kostengünstigsten ist, langfristig wird grüner Wasserstoff jedoch die günstigste Alternative sein.



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis der Fachliteratur in Kap. 2
 Annahmen für 2030: CO₂ Preis 100 €/t; Erdgaspreis stabil;
 Annahmen für 2050: wie 2030 plus Carbon Import Tax von 100 €/t CO₂
 *Zur Umrechnung: 1 €/kg H₂ = 3,0 ct/kWh H₂

Abbildung 4-1: Produktion von Wasserstoff – Kosten & Trends (Greenpeacy Energy EG, 2020)

Investitionskosten

Durch die aktuellen technologischen Entwicklungen sowie das Upscaling werden in den nächsten Jahrzehnten große Kostensenkungen erwartet. Die größten heute arbeitenden Elektrolyseure haben eine Kapazität von 10 MW, aber weitaus größere Anlagen mit 100 - 250 MW sind bereits in der Planung.

Angaben zu den Kosten für die Elektrolyseure werden in den verschiedenen Studien ausgewiesen, weisen jedoch insbesondere in der Schätzung für 2030 bzw. 2050 größere Schwankungen auf. Durchschnittlich liegen hier die Kosten aktuell bei etwa 1.000 €/kW. Einige Studien schätzen eine Kostensenkung der Elektrolyseure bis 2030 auf etwa 500 – 700 €/kW und bis 2050 auf weniger als 250 €/kW. (Greenpeace Energy EG, 2020). Die Kosten für Rheinland-Pfalz liegen in Summe bei etwa 1,5 Mrd. € bis 2050 (vgl. Kap. 4.4).

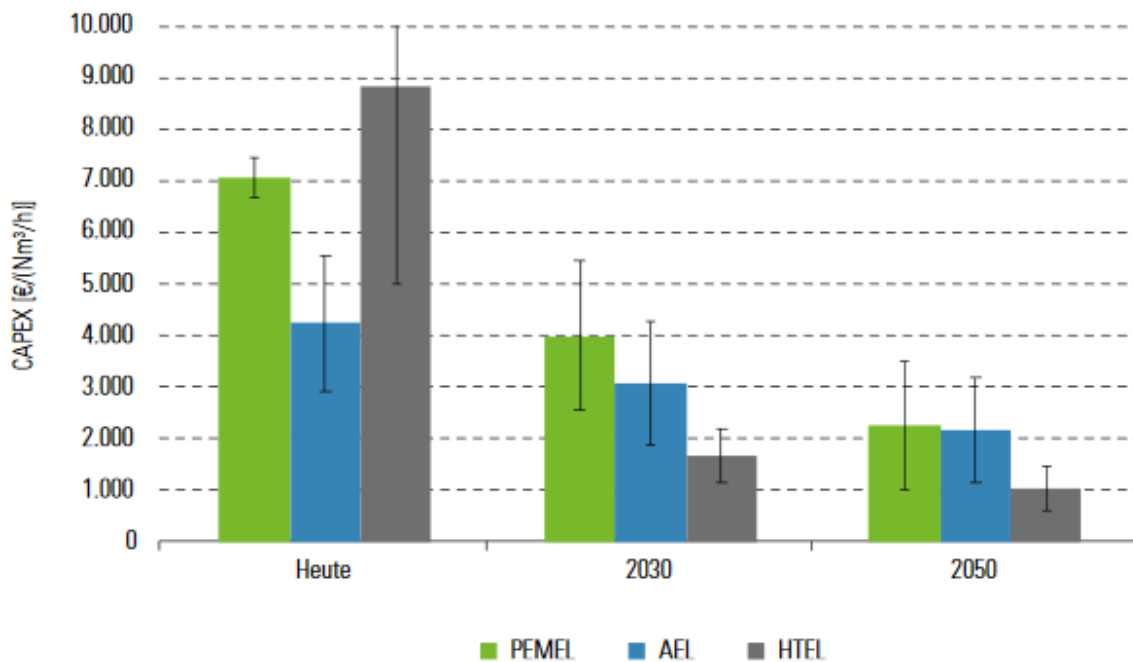


Abbildung 4-2: Investitionen für die Wasserstoffelektrolyse bei verschiedenen Verfahren (Greenpeace Energy EG, 2020)

4.3 Erforderliche Kapazitäten in Deutschland

Unter Berücksichtigung des Bedarfs an Wasserstoff für die nachgelagerte Erzeugung von PtCH₄ und PtL sowie der Importe⁶ wurden die erforderlichen Kapazitäten in verschiedenen Studien abgeschätzt:

- IEK2050-Studie: 65 – 110 GW (Jahr 2050)
- Dena: 16 GW (Jahr 2030), 53 – 63 GW (Jahr 2050)

„Damit der Markthochlauf gelingt, müssen jetzt zweistellige MW-Elektrolyseure installiert und bis Ende der 20er-Jahre bereits Zuwachsraten von etwa 1 GW pro Jahr erreicht werden.“
(Fraunhofer ISI/ISE, 2019)

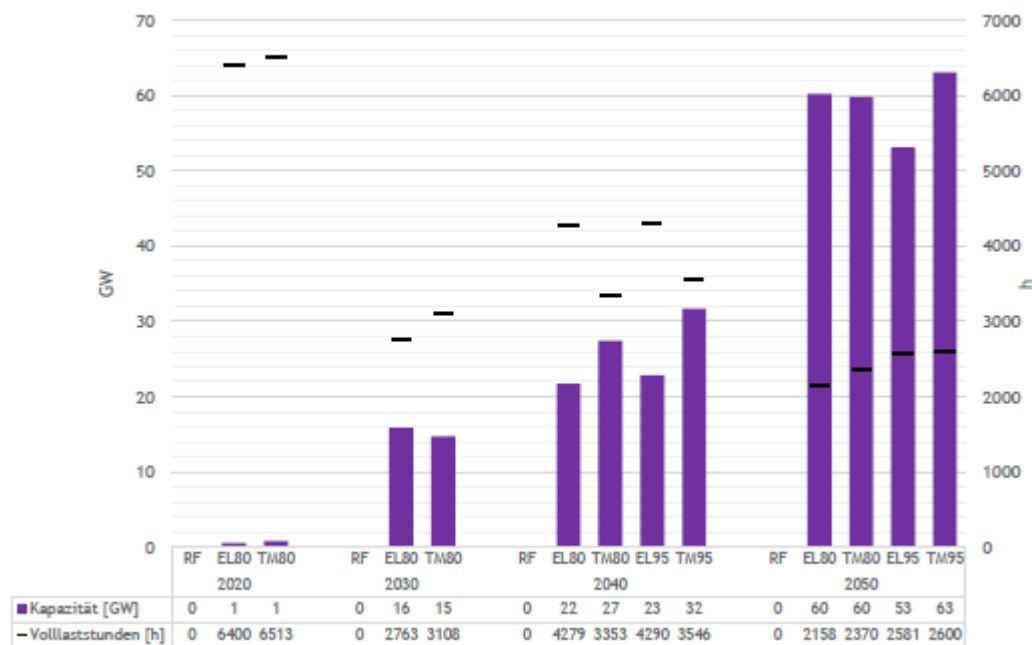


Abbildung 4-3: Szenarienvergleich – Elektrolyse-Kapazitäten und Volllaststunden in Deutschland von 2020 – 2050 (dena, 2018)

Die Produktion von Elektrolyseuren in Deutschland wird sich nach (Now GmbH, 2018) auf wenige Hersteller beschränken (ca. 5 - 10 Hersteller, die bis 2025 etwa je 20 bis 50 MW jährliche Elektrolyseleistung herstellen). Nachfolgende Tabelle zeigt aktuelle Projekte der Elektrolyseurhersteller in Deutschland:

⁶ Sollte auf Importe vollständig verzichtet werden, müssten bis 2030 ca. 7 - 71 GW und für 2050 137 - 275 GW installiert werden. Eine leistungsfähige Hersteller- und Zuliefererindustrie müsste dann bereits in den nächsten Jahren 1-5 GW jährlich erzeugen.

Tabelle 4-1: Projekte der Elektrolyseurhersteller in Deutschland

| Hersteller Elektrolyseur | Ort | Projekt | Kapazität | Quelle |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| REFHYNE | Wesseling, Deutschland | Baubeginn weltweit größter Wasserstoff-Elektrolyse | 1300 t H ₂ /a 100 MW | (REFHYNE, 2019) |
| Open Grid Europe Amprion | Deutschland | Großtechnisches PtX-Projekt | 100 MW | (Hybridge, 2020) |
| Get-h2 | Lingen, Deutschland | H2-Infrastruktur | >100 MW | (get-h2, 2020) |
| H-TEC Systems | Windpark Ellhöft, Deutschland | Grüner Wasserstoff aus Wind zur Vermarktung im Verkehrssektor | | (h-tec, 2020) |
| Linde AG Siemens AG | Energiepark Mainz, Deutschland (RLP) | Power to Gas Anlage für Nutzung überschüssigen Windstroms | | (Energiepark Mainz, 2020) |
| Thyssengas | Diele Ostfriesland, Deutschland | Power to Gas | 100 MW 20.000 m ³ H ₂ /h in der Endstufe | (Element Eins, 2020) (Thyssengas, 2020) |
| AREVA H₂GEN | Köln, Deutschland | -Tankstellen -Energie-Rückgewinnung für stand alone Anlagen -Speicherprojekte für EE (PtG) | 11-136 kg H ₂ /Tag Mehrere MW | (AREVA H2Gen, 2020) |

4.4 Wasserstofferzeugung in Rheinland-Pfalz

Für Rheinland-Pfalz ist bei einem Bedarf in 2050 von etwa 8 TWh/a Wasserstofferzeugung (vgl. hierzu Kap. 3.4: entspricht der Wasserstoffmenge, die vor Ort erzeugt werden kann; Importe kommen hinzu) und durchschnittlich 2.600 Volllaststunden eine Elektrolyse-Kapazität von etwa 3,1 GW erforderlich. Bis 2030 sollten davon bereits etwa 25% bzw. ca. 800 MW installiert sein.

Anhand der zu erwartenden Kostenentwicklung ist bis 2030 mit einem Investitionsvolumen von rund 720 Mio. € zu rechnen, bis 2050 mit in Summe ca. 1,5 Mrd.€.

Tabelle 4-2: Abschätzung Kapazitäten und Kosten für Elektrolyseure

| | 2020 - 2030 | 2030 - 2040 | 2040 - 2050 | |
|--------------------------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|
| Anteil Kapazität ⁷ | 25% | 51% | 100% | |
| Kapazität zum Dekadenende | 800 | 1.600 | 3.100 | MW |
| Zubau in Dekade | 800 | 800 | 1.500 | MW |
| Investitionskosten | 900 | 600 | 250 | €/kW |
| | 720 | 480 | 375 | Mio. € |
| | Summe 2020 – 2050: | | 1,5 | Mrd. € |

Um Rheinland-Pfalz möglichst flächendeckend mit Wasserstoff zu versorgen und den Weg in die Wasserstoffwirtschaft zu ermöglichen, müssen sowohl mehrere industrielle Anlagen (hier im größeren Maßstab von mindestens 100 MW pro Anlage) als auch (kommunale) Projekte für Anwendungen in Verkehr (Wasserstofftankstellen) oder weiteren dezentralen Anlagen in die Umsetzung kommen.

Aktuell werden bereits im Energiepark Mainz, in Pirmasens-Winzeln und in Alzey **PtX-Anlagen** betrieben bzw. geplant (Anlagengröße 1-10 MW). (DVGW, 2020)

Kläranlagen lassen Umweltschutz und Klimaschutz in einer Win-Win-Situation agieren. Der Vorteil der Wasserstofferzeugung liegt hier in der gleichzeitigen Bereitstellung von Sauerstoff, welcher prozessintern (z.B. im Belebungsbecken) eingesetzt werden kann. Hauptsächlich in großen Städten wie z.B. Mainz, Trier, Ludwigshafen oder Koblenz, in denen die Kläranlagen über eine Verbrennungsanlage oder regenerativen Überschussstrom verfügen und auch Abnehmer für den grünen Wasserstoff vorhanden sind, bietet sich die Prüfung der Umsetzungsmöglichkeiten an. (Jentsch, 2019)

⁷ Abschätzung anhand Kapazitätenentwicklung entsprechend Abbildung 4-3

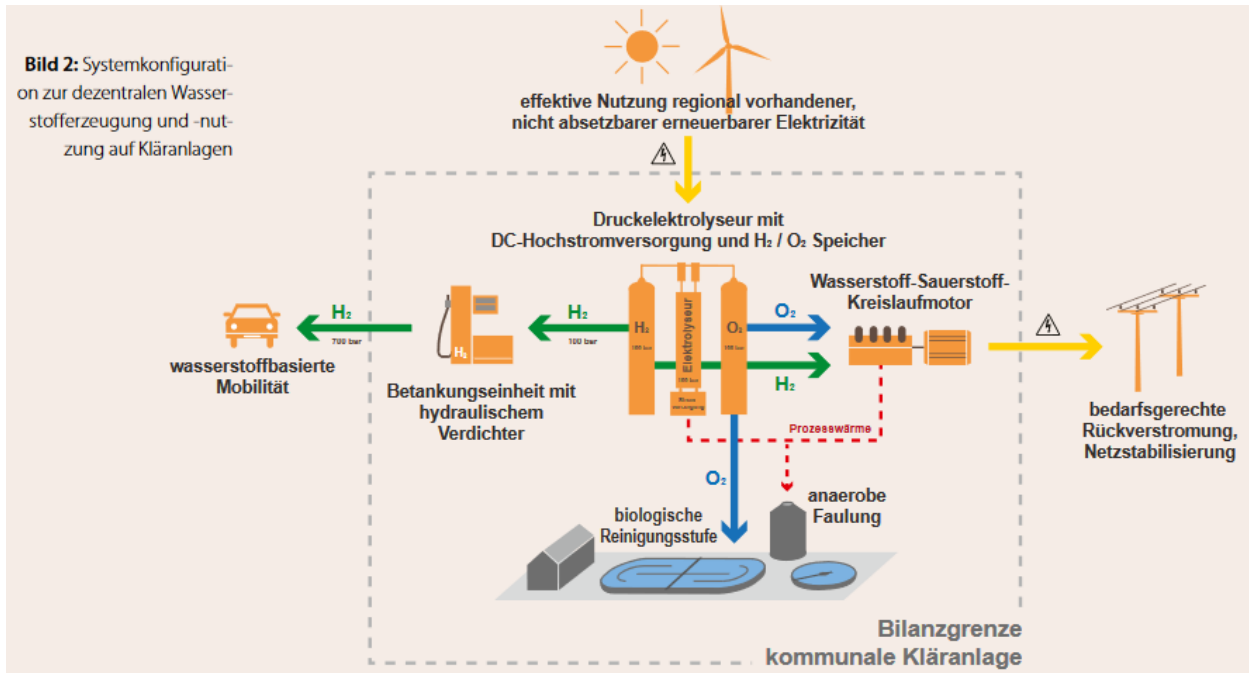


Abbildung 4-4: Systemkonfiguration zur dezentralen Wasserstoffherzeugung und -nutzung auf Kläranlagen (Jentsch, 2019)

Ein Beispiel bietet das Klärwerk der Stadt Mainz. Überschussstrom aus der Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage oder anderen regenerativen Energien soll über einen Elektrolyseur zu grünem Wasserstoff umgewandelt werden, welcher ins Erdgasnetz eingespeist oder in der Mobilität eingesetzt werden soll. Aus dem Sauerstoff soll Ozon zum Betrieb der vierten neuen Reinigungsstufe der Kläranlage erzeugt werden. (MUEEF, 2020)

Aktuell wird in Rheinland-Pfalz weiterhin im Rahmen des „**SmartQuart – Wasserstoffquartier Hy-Zell Kaisersesch**“ mit Wasserstoff geplant. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderte „Reallabor der Energiewende“ zielt darauf, den „Einsatz fossiler Energieträger (Gas, Kohle und Öl) in den Projektquartieren weitgehend überflüssig zu machen. Es soll zeigen, dass eine klimaneutrale Energieversorgung sowohl technisch als auch wirtschaftlich umsetzbar ist.“ (Verbandsgemeinde Kaisersesch, 2020)

In Kaisersesch wird der Wasserstoff mit dem lokal erzeugten Strom (aus Windkraft und Solarenergie) zur Produktion des Wasserstoffs genutzt. Dieser sogenannte grüne Wasserstoff wird dabei über einen Elektrolyseur produziert und mit einem LOHC (liquid organic hydrogen carrier = flüssiger organischer Wasserstoffträger) sicher speicherbar gemacht. Dadurch ist der Wasserstoff nicht brennbar und kann gefahrlos transportiert werden. Der grüne Wasserstoff kann von Unternehmen genutzt werden. Ziel ist auch, die Linie 713 zwischen Cochem und Kaisersesch mit einem durch Wasserstoff betriebenen Bus (ÖPNV) zu bedienen. Der Überschuss des Wasserstoffs soll gespeichert und transportierbar gemacht werden. So erscheint es nicht unrealistisch, wenn auch Zugstrecken der Region, wie von Andernach nach Kaisersesch, in Zukunft mit Brennstoffzellenzügen befahren werden.“ (Verbandsgemeinde Kaisersesch, 2020)

5 Strukturelle Umsetzung

Die Umsetzung von Wasserstoffprojekten unterteilt sich zum einen in die **Erzeugung** von grünem Wasserstoff. Hier sind verschiedene Hersteller im Begriff, zunehmend auch größere Elektrolyseure (Größenordnung 100 MW) zu entwickeln. (Greenpeace Energy EG, 2020) Die Anzahl der Hersteller wird voraussichtlich begrenzt sein, Kooperationen (auch mit Anwendern aus der Industrie) aber in jedem Fall sinnvoll.

Zum anderen ist anwenderseitig v.a. der **Industriesektor** interessant für Umsetzung. Wie bereits erläutert, sollte grüner Wasserstoff primär grauen Wasserstoff ersetzen (stoffliche Nutzung) bzw. in industriellen Prozessen zur Anwendung kommen. Die Bundesregierung fördert Maßnahmen insbesondere durch das Nationale Dekarbonisierungsprogramm. Mögliche Partner bei der Umsetzung sind daher in Rheinland-Pfalz die ansässigen Industrieunternehmen wie BASF AG, Daimler AG, Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG, Schott AG etc. Dabei ist zu beachten, dass die erforderliche Infrastruktur und die Nutzung von Wasserstoff in der Großindustrie teilweise bereits vorhanden ist bzw. effizienter erschlossen werden kann als in KMU. Die Errichtung großskaliger Demonstrationsvorhaben mit Aspekten des Upscalings und der Integration in bestehende industrielle Infrastrukturen sollte adressiert werden. (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) In den kommenden Jahren erwartete die IEA (International Energy Agency) bisher allerdings nur wenige größere Projektstarts in der Industrie. (Greenpeace Energy EG, 2020) Hier lohnt es sich anzusetzen und die industrielle Entwicklung voranzutreiben.

Um Wasserstoff flächendeckend in die Umsetzung zu bringen, muss der Fokus neben der Industrie auch auf Anwendungen in **Verkehr und dezentralen Energieanlagen** liegen. Hier spielen in erster Linie die rheinland-pfälzischen Standorte mit höherem Ertrag aus Erneuerbaren Energien eine Rolle, an denen eine direkte Wasserstofferzeugung aufgebaut werden kann. Da die Anlagen im Vergleich zur Industrie eher im kleineren Leistungsbereich liegen werden, gilt es hier besonders Synergien (z.B. direkte Nutzung des „Nebenprodukts“ Sauerstoff in Kläranlagen) und weitere Standortvorteile (Transport-, Speichermöglichkeiten, direkte Wasserstoffnutzung in dezentralen Anlagen bzw. im ÖPNV etc.) zu nutzen um eine möglichst wirtschaftliche Umsetzung zu ermöglichen.

Die Rolle von lokalen Energieversorgern und Akteuren kann hier v.a. in den regionalen oder industriellen Anwendungen, im Verkehrssektor, der Wasserstoffnutzung in dezentralen Anlagen sowie in der Beimischung von Wasserstoff ins Erdgasnetz liegen.

Rheinland-Pfalz wird nur einen Teil der Wasserstofferzeugung selbst umsetzen können. Umfangreiche Mengen müssen importiert werden. Hierfür ist – angegliedert an die Elektrolyse-Standorte - die Infrastruktur auszubauen, insbesondere entlang des Rheins, über den der zentrale Transport und die Verteilung des Wasserstoffs erfolgen wird. Im Verkehrssektor wird Wasserstoff ebenfalls Anwendung finden, so dass auch hier ein Wasserstoff-Tankstellennetz entstehen muss.

Quellenverzeichnis

- Air Liquide. (2020). *Warum ist Wasserstoff so besonders?* Abgerufen am 22. April 2020 von Air Liquide: <https://industrie.airliquide.de/warum-ist-wasserstoff-so-besonders>
- AREVA H2Gen. (2020). *H2 Energy*. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von <https://www.arevah2gen.com/de/h2-energie>
- BAFA. (2019). Merkblatt zu den CO2-Faktoren. Von https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_merkblatt_co2.pdf abgerufen
- BASF. (28. Februar 2020). *Energie und Klimaschutz*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von <https://bericht.basf.com/2019/de/konzernlagebericht/verantwortung-entlang-der-wertschoepfungskette/sicherheit-gesundheit-und-umweltschutz/energie-und-klimaschutz.html>
- BASF. (31. Oktober 2019). *Innovationen für eine klimaschonende Chemieproduktion*. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2019/01/p-19-103.html>
- BASF. (2020). *Innovationen für eine klimaschonende Chemieproduktion*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/innovations-for-a-climate-friendly-chemical-production.html>
- BASF. (28. Februar 2020). *Umsatz*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von <https://bericht.basf.com/2019/de/konzernlagebericht/geschaeftsjahr-der-basf-gruppe/ertragslage/umsatz.html>
- BASF SE. (2020). *Standort Ludwigshafen 2019 in Zahlen*. Ludwigshafen: BASF SE. Von <file:///C:/Users/rauth/AppData/Local/Temp/Standort-in-Zahlen19-DE.pdf> abgerufen
- BMU. (November 2016). *Klimaschutzplan 2050*. Abgerufen am Oktober 2020 von https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf
- BmVI ivm PtJ. (9. Juli 2020). *Bekanntmachung der Förderrichtlinie für Maßnahmen der Marktaktivierung im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie Phase 2 (Schwerpunkt Nachhaltige Mobilität) als Teil des Regierungsprogramms Wasserstoff- und*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von https://www.ptj.de/lw_resource/datapool/systemfiles/cbox/2851/live/lw_bekdoc/bmvi_nip2_foer_derrichtlinie_marktaktivierung_juli2020.pdf
- BMWI. (Juni 2020). *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. Berlin. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html> abgerufen
- BMWI. (22. September 2020). *Wasserstoffstrategie - Deutschland baut Heimatmarkt für Wasserstoff auf!* Von <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/wasserstoffstrategie-deutschland-baut-heimatmarkt-fuer-wasserstoff-auf.html> abgerufen
- Boehringer Ingelheim. (2020). *Zahlen und Fakten 2019*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von <https://www.boehringer-ingelheim.de/unternehmensprofil/unser-unternehmen/zahlen-und-fakten>

- Bukold, D. S. (Januar 2020). *greenpeace-energy.de*. Abgerufen am September 2020 von <https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf>
- Bundesfinanzministerium. (28. 10 2020). *Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken*. Von <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunktepapier.pdf> abgerufen
- BUND-RLP. (Januar 2018). *Energiewende Rheinland-Pfalz; neuer fahrplan*. Von https://www.bund-rlp.de/fileadmin/rlp/Mensch_und_Umwelt/Energiewende/BUND_fahrplan_energiewende_2018.pdf abgerufen
- Daimler. (2020). *Aktualisierte Umwelterklärung 2019*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.daimler.com/dokumente/nachhaltigkeit/produktion/2019-07-03-uwe-untertuerkheim-2019.pdf>
- Daimler. (2020). *Geschäftsbericht 2019*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von <https://geschaeftsbericht.daimler.com/gb2019/geschaeftsfelder/daimler-trucks#>
- dena. (2016). Potenzialatlas Power-to-Gas. Berlin. Abgerufen am 30. September 2020 von <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/potenzialatlas-power-to-gas/>
- dena. (Juli 2018). Leitstudie Integrierte Energiewende. Berlin. Von https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf abgerufen
- Deutscher Bundestag. (7. Juni 2019). *Grenzwerte für Wasserstoff (H2) in der Erdgasinfrastruktur (Sachstandsbericht)*. Abgerufen am September 2020 von <https://www.bundestag.de/resource/blob/646488/a89bbd41acf3b90f8a5fbfbc8616df4/WD-8-066-19-pdf-data.pdf>
- Deutscher Bundestag. (28. 10 2020). *Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050*. Von <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/139/1913900.pdf> abgerufen
- DIHK. (Juni 2020). *Wasserstoff DIHK-Faktenpapier*. Abgerufen am Oktober 2020 von <https://www.dihk.de/resource/blob/24872/fd2c89df9484cf912199041a9587a3d6/dihk-faktenpapier-wasserstoff-data.pdf>
- DVGW. (November 2016). *Untersuchungen zur Einspeisung von Wasserstoff in ein Erdgasnetz*. Abgerufen am September 2020 von https://www.dvgw-ebi.de/download/ewp_1116_50-59_Kroeger.pdf
- DVGW. (05. Oktober 2020). *Interaktive Power to Gas Karte Deutschland*. Von <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/power-to-gas/> abgerufen
- Element Eins. (2020). Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.element-eins.eu/ziele.html>
- EMCEL. (16. März 2020). *Was bedeuten die Farben von Wasserstoff?* Abgerufen am 21. April 2020 von Ingenieurbüro für Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie und Elektromobilität: <https://emcel.com/de/farben-von-wasserstoff/>

- Energieagentur RLP GmbH. (06. Oktober 2020). *Erneuerbare Energien - Solarenergie / Windenergie*. Von <https://www.energieagentur.rlp.de/themen/erneuerbare-energien> abgerufen
- Energieatlas.RLP. (2020). Abgerufen am Oktober 2020 von <https://www.energieatlas.rlp.de/earp/daten/strom/stromverbrauch>
- Energiepark Mainz. (2020). *Energiepark*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.energiepark-mainz.de/projekt/energiepark/>
- EnergyBrainpool. (September 2019). Erneuerbar in allen Sektoren. Berlin. Von https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/190925_EnergyBrainpool_Erneuerbar-in-allen-Sektoren.pdf abgerufen
- Fraunhofer IEE. (Mai 2020). Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem: Fokus Gebäudewärme.
- Fraunhofer IMWS. (2020). *Sauberes Wasser und sauberer Strom*. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von <https://www.imws.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder/photovoltaik/highlights/wasserstoff-elektrolyse-klaeranlage.html>
- Fraunhofer ISI/ISE. (Oktober 2019). Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland. Karlsruhe und Freiburg. Von <https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/ueber-fraunhofer/wissenschaftspolitik/Positionen/Fraunhofer-Wasserstoff-Roadmap.pdf> abgerufen
- get-h2. (2020). *GET H2 Nukleus*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.get-h2.de/projekt-nukleus/>
- Greenpeace Energy EG. (Januar 2020). *Kurzstudie Blauer Wasserstoff - Perspektiven und Grenzen eines neuen Technologiepfades*. Von <https://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/publikationen/Studien/blauer-wasserstoff-studie-2020.pdf> abgerufen
- Greenpeacy Energy EG. (Januar 2020). Blauer Wasserstoff - Lösung oder Problem der Energiewende?
- h-tec. (2020). *Windpark Ellhöft*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.h-tec.com/anwendungen/windpark-ellhoeft/>
- Hybridge. (2020). Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://www.hybridge.net/Konzept/>
- IINAS GmbH. (28. 10 2020). *GEMIS - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme*. Von <http://iinas.org/gemis-de.html> abgerufen
- Jentsch, B. (Juni 2019). *Dezentrale Umsetzung der Ener-gie- und Verkehrswende mit Wasserstoffsystemen auf Kläranlagen*. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von https://www.gwf-gas.de/fileadmin/GWFGasEnergie/gwf_gas_Ausgaben/gwf_gas_2019/gwf_gas_6_2019/GE_06_2019_fb_Jentsch.pdf
- Landtag RLP. (26. Juni 2020). *Kleine Anfrage – Drucksache 17/12208*. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von Wasserstoffstrategie für Rheinland-Pfalz – neue Pläne der Bundesregierung: <https://www.gruene-fraktion-rlp.de/wp-content/uploads/2020/06/12408-17.pdf>
- Michalski, J. (Mai 2019). Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Von https://www.wirtschaft.nrw/sites/default/files/asset/document/bericht_wasserstoffstudie_nrw-2019-04-09_komp.pdf abgerufen

- MUEEF. (19. August 2020). *Höfken zur Kläranlage Mainz: „Energiewende und Schadstoffreduzierung können künftig Hand in Hand gehen“*. Abgerufen am 12. Oktober 2020 von https://mueef.rlp.de/de/pressemeldungen/detail/news/News/detail/hoeffken-zur-klaeanlage-mainz-energiewende-und-schadstoffreduzierung-koennen-kuenftig-hand-in-hand-geh/?no_cache=1
- MUEEF.RLP. (2018). *12. Energiebericht Rheinland-Pfalz*. Abgerufen am Oktober 2020 von https://mueef.rlp.de/fileadmin/mulewf/Themen/Energie_und_Strahlenschutz/Energie/12._Energiebericht_Rheinland-Pfalz_-_02.07.2018.pdf
- MUEEF.RLP. (kein Datum). *Energiebericht*. Abgerufen am Oktober 2020 von <https://mueef.rlp.de/de/themen/energie-und-strahlenschutz/energiebericht/>
- MUEEF.RLP. (2020). *13. Energiebericht Rheinland-Pfalz*. Abgerufen am Oktober 2020 von https://mueef.rlp.de/fileadmin/mulewf/Themen/Energie_und_Strahlenschutz/Energie/13._Energiebericht_Rheinland-Pfalz.pdf
- Neumann, D. p. (12. Januar 2020). *Wasserstoff – woher und wie viel? Grün oder grau? Zentral oder dezentral? Das sind hier die Fragen*. Abgerufen am September 2020 von <https://www.energie-klimaschutz.de/wasserstoff-woher-wieviel-gruen-grau-zentral-dezentral/>
- Now GmbH. (2018). *Studie IndWEDe: Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland: Chancen und Herausforderungen für nachhaltigen Wasserstoff für Verkehr, Strom und Wärme*. Berlin. Von https://www.now-gmbh.de/content/service/3-publikationen/1-nip-wasserstoff-und-brennstoffzellentechnologie/indwede-studie_v04.1.pdf abgerufen
- Now GmbH. (24. September 2020). *Energie für immer*. Von <http://energie-für-immer.de/#!wasserstoff> abgerufen
- REFHYNE. (28. Juni 2019). *Shell Rheinland Raffinerie: Baubeginn der weltweit größten Wasserstoff-Elektrolyse*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://refhyne.eu/de/shell-rheinland-raffinerie-baubeginn-der-weltweit-groesten-wasserstoff-elektrolyse-2/>
- Scholz, R. (2016). *BMVI-Studie. Ergebnisbericht: Wasserstoff-Infrastruktur für die Schiene*. NOW GmbH. Abgerufen am 17. April 2020 von https://www.now-gmbh.de/content/1-aktuelles/1-presse/20160701-bmvi-studie-untersucht-wirtschaftliche-rechtliche-und-technische-voraussetzungen-fuer-den-einsatz-von-brennstoffzellentriebwagen-im-zugverkehr/h2-schiene_ergebnisbericht_online.pdf
- Statista. (2020). *Umsatz des Pharmaunternehmens AbbVie nach Ländern im Jahr 2019*. Abgerufen am 22. Oktober 2020 von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/547332/umfrage/umsatz-des-pharmaunternehmens-abbvie-nach-laendern/>
- Statistisches Landesamt. (11. November 2019). *Energieverbrauch der Industrie leicht gesunken*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von https://www.statistik.rlp.de/no_cache/de/einzelansicht/news/detail/News/2840/
- Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz. (Juni 2020). *Rheinland-Pfalz heute*. Abgerufen am Oktober 2020 von https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/kurzinformationen/Rheinland-Pfalz_heute_2020.pdf

- Statistisches Landesamt RLP. (2019). Statistisches Jahrbuch 2019 - Verarbeitendes Gewerbe. Mainz. Abgerufen am 30. September 2020 von https://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/jahrbuch/Jahrbuch_2019_Kapitel_18_-_Verarbeitendes_Gewerbe.pdf
- Statistisches Landesamt RLP. (05. Oktober 2020). Energiebilanz 2017. Von http://www.statistik.rlp.de/fileadmin/dokumente/nach_themen/ene/kurz/Energiebilanz_2017.pdf) abgerufen
- Statistisches Landesamt RLP. (29. 10 2020). *Energieverbrauch der Industrie gestiegen*. Von http://www.statistik.rlp.de/no_cache/de/einzelansicht/news/detail/News/2591/ abgerufen
- Sunfire. (2020). Grüner Wasserstoff für die Industrie. Abgerufen am 23. April 2020 von <https://www.sunfire.de/de/anwendungen/wasserstoff>
- Thyssengas. (2020). *Von der Vision zur Wirklichkeit: unser Wasserstoffprojekt ELEMENT EINS*. Abgerufen am 9. Oktober 2020 von <https://thyssengas.com/de/innovation/element-eins.html>
- TWI Global. (27. 10 2020). *What are Technology Readiness Levels (TRL)?* Von <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels> abgerufen
- Verband der chemischen Industrie e.V. (August 2020). *Chemiewirtschaft in Zahlen*. Abgerufen am 8. Oktober 2020 von <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chemiewirtschaft-in-zahlen-print.pdf>
- Verbandsgemeinde Kaisersesch. (03. 11 2020). *SmartQuart – Wasserstoffquartier Hy-Zell Kaisersesch: Die Zukunft ist hier*. Von https://www.kaisersesch.de/vg_kaisersesch/Verwaltung/Presse/Aktuelles/2020/Juni/SmartQuart abgerufen
- Voss, M. (Hrsg.). (2019). Regeln für eine zukünftige Energieinfrastruktur. Mehr Wasserstoff im Gasnetz. *tab. Das Fachmedium der TGA-Branche*(6). Abgerufen am 21. April 2020 von https://www.tab.de/artikel/tab_Mehr_Wasserstoff_im_Gasnetz_3378124.html
- Wikipedia. (27. 10 2020). *Technology Readiness Level*. Von https://de.wikipedia.org/wiki/Technology_Readiness_Level abgerufen
- Wuppertal Institut. (2017). *Wasserstoff - Energie der Zukunft?* Abgerufen am September 2020 von https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6893/file/6893_Arnold.pdf
- Zentrum Wasserstoff Bayern (H2.B). (2020). Positionspapier des Wasserstoffbündnis Bayern zur bayerischen Wasserstoffwirtschaft. Nürnberg. Abgerufen am 01. Oktober 2020 von https://h2.bayern/wp-content/uploads/2020/05/Positionspapier_Wasserstoffbuendnis_Bayern_052020_web.pdf
- ZfK. (11. Februar 2020). *Wasserstoff-BHKW: Noch ein Auftrag für 2G Energy*. Abgerufen am September 2020 von <https://www.zfk.de/energie/gas/artikel/6add72e016e64f387c070f46370b9b79/wasserstoff-bhkw-noch-ein-auftrag-fuer-2g-energy-2020-02-11/>

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1-1: Wertschöpfungskette Wasserstoff (Quelle: TSB nach (BMW, 2020)) | 5 |
| Abbildung 1-2 Unterscheidung von Wasserstoff anhand der Herstellung (nach (EMCEL, 2020)) . | 5 |
| Abbildung 1-3: Emissionen der Wasserstoffproduktion (Greenpeace Energy EG, 2020) | 6 |
| Abbildung 1-4: Wasserstoffstrategie (BMW, 2020)..... | 7 |
| Abbildung 2-1: Anwendungsgebiete für Wasserstoff (Quelle: (Now GmbH, 2020)) | 9 |
| Abbildung 2-2: Dekarbonisierung über den Stromsektor bzw. die Sektorkopplung mit Wasserstoff als Bindeglied (Quelle: (Zentrum Wasserstoff Bayern (H2.B), 2020))..... | 10 |
| Abbildung 3-1: Auflistung der Szenarien, mit Kurzbeschreibungen sowie Angaben zu PtCH ₄ und PTL-Nachfrage in Deutschland in 2050 (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) | 17 |
| Abbildung 3-2: Wasserstoff-, PtCH ₄ - und PtL-Nachfrage in Deutschland in 2050 (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)..... | 18 |
| Abbildung 3-3: Plausible Bandbreiten für die Wasserstoffnachfrage und Elektrolysekapazitäten für die Jahre 2030 und 2050 (Fraunhofer ISI/ISE, 2019)..... | 18 |
| Abbildung 3-4: Szenarienvergleich – PtX nach Energieträger für die Jahre 2020 – 2050 (dena, 2018) | 19 |
| Abbildung 3-5: PtX-Bedarf in Deutschland und Rheinland-Pfalz (Prognose 2050)..... | 21 |
| Abbildung 3-6: Bedarf an PtX und direktem Wasserstoff in Rheinland-Pfalz (Prognose 2050)... | 21 |
| Abbildung 3-7: Szenarienvergleich – PtX nach Herkunft (dena, 2018)..... | 24 |
| Abbildung 4-1: Produktion von Wasserstoff – Kosten & Trends (Greenpeace Energy EG, 2020) | 28 |
| Abbildung 4-2: Investitionen für die Wasserstoffelektrolyse bei verschiedenen Verfahren (Greenpeace Energy EG, 2020)..... | 29 |
| Abbildung 4-3: Szenarienvergleich – Elektrolyse-Kapazitäten und Vollaststunden in Deutschland von 2020 – 2050 (dena, 2018)..... | 30 |
| Abbildung 4-4: Systemkonfiguration zur dezentralen Wasserstofferzeugung und -nutzung auf Kläranlagen (Jentsch, 2019) | 33 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 2-1: Potenziale zum Einsatz von Wasserstoff in der Industrie, Relevanz für RLP (Quelle: (dena, 2018), TSB) | 11 |
| Tabelle 2-2: Prognostizierter Wasserstoffbedarf in Deutschland 2015 bis 2050 [TWh H ₂ , Hu] (dena, 2016) | 12 |
| Tabelle 2-3: Wasserstoff-Nachfrage für den Straßenverkehr (Fraunhofer ISI/ISE, 2019) | 13 |
| Tabelle 3-1: Grundlagen zur Abschätzung des PtX-Bedarfs in RLP | 20 |
| Tabelle 3-2: Übertragung des PtX-Bedarfs im Jahr 2050 | 20 |
| Tabelle 3-3: Emissionseinsparung beim Einsatz von Wasserstoff 2030 | 26 |
| Tabelle 3-4: Emissionseinsparung beim Einsatz von Wasserstoff 2050 | 26 |
| Tabelle 4-1: Projekte der Elektrolyseurhersteller in Deutschland | 31 |
| Tabelle 4-2: Abschätzung Kapazitäten und Kosten für Elektrolyseure | 32 |
| Tabelle 0-1 Zusammenfassung CO ₂ -Emissionen (nach (Greenpeace Energy EG, 2020)) | 45 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------|--|
| a | Jahr |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| CO ₂ e | Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (carbon dioxide equivalent, nach ISO 14067-1 Pre-Draft) |
| DENA | Deutsche Energie-Agentur GmbH |
| EnEV | Energieeinsparverordnung |
| EU | Europäische Union |
| GWp | Giga Watt Peak |
| kWh | Kilowattstunden |
| kW | Kilowatt |
| Mt | Megatonnen |
| MWh | Megawattstunden |
| RLP | Rheinland-Pfalz |
| t | Tonne |

Anhang

Power-To-Gas-Projekte Deutschland

WO AUS WIND UND SONNE GRÜNES GAS WIRD ...

EINE ÜBERSICHT DER POWER-TO-GAS-PROJEKTE IN DEUTSCHLAND

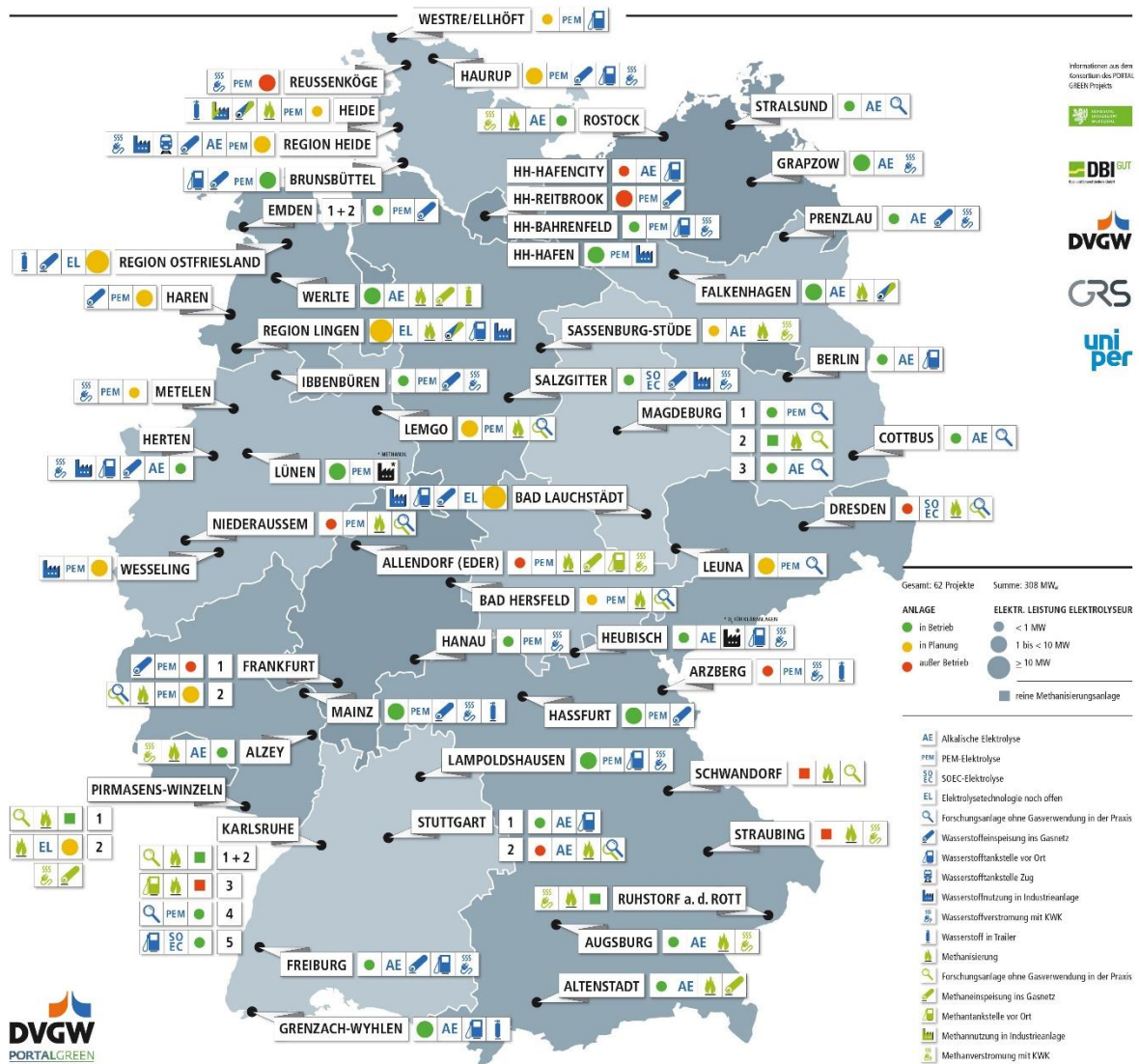


Abbildung 0-1: Power-To-Gas Projekte in Deutschland (DVGW, 2020)

CO₂-Emissionen

Greenpeace (Greenpeace Energy EG, 2020) und das Wuppertal-Institut weisen die CO₂-Emissionen der Wasserstoffproduktion aus.

Grauer Wasserstoff

Die durchschnittlichen Emissionen liegen bei 300 g CO₂/kWh H₂. Bezieht man die Erdgas-Vorkette mit ein sind es 398 g CO_{2äq}/kWh H₂. (Greenpeace Energy EG, 2020)

Die Emissionen der Gasreformierung im ATR-Verfahren sind mit etwa 110 g CO₂/MJ angegeben. Dies entspricht etwa 396 CO₂/kWh H₂. (Wuppertal Institut, 2017)

Blauer Wasserstoff

Die durchschnittliche THG-Belastung liegt bei 168 g CO_{2äq}/kWh H₂, davon sind etwa 98 g CO_{2äq}/kWh Vorkettenemissionen. Die geringeren Emissionen ergeben sich durch das CCS, welches im älteren ATR-Verfahren bei etwa 65% Abscheidung, im neueren SMR-Verfahren bei bis zu 90% Abscheidung liegt. Die höhere Abscheidung hat jedoch eine geringere Effizienz zur Folge, sodass mehr Erdgas benötigt wird je mehr abgeschieden wird. Weitere Emissionen entstehen durch Transport und Lagerung von CO₂. Der Produktionsprozess selbst kann weitgehend dekarbonisiert werden, durch Vorkettenemissionen sind die Emissionen mit 143-218 g CO_{2äq}/kWh H₂ jedoch immer noch relativ hoch. (Nachrüstungen haben niedrigere Effizienz) (Greenpeace Energy EG, 2020)

Grüner Wasserstoff

Die Basis für „echten grünen“ Wasserstoff bildet dekarbonisierter Strom für die Elektrolyse. Bei dem aktuellen Strommix würde die Emission mit 691 g CO₂/kWh H₂ fast doppelt so viel wie die graue Variante emittieren. Mit Verwendung vollständig regenerativen Energien und unter Betrachtung der Life Cycle Analyse der jeweiligen Solar- oder Windkraftanlage belaufen sich die Gesamtemissionen auf durchschnittlich 26 g CO₂/kWh H₂. Um den allgemeinen Strommix im Vergleich zum grauen Wasserstoff für die Elektrolyse attraktiv zu machen, müssten die Emissionen auf unter 180 g CO₂/kWh sinken. Im Vergleich zum blauen müssen die Emissionen des Mixes sogar auf unter 75 g CO₂/kWh sinken. (Greenpeace Energy EG, 2020)

Das Wuppertal-Institut hat im Vergleich etwas höhere Werte ermittelt. Die Emissionen dezentraler Pfade sind in der Regel durch eine breitere Infrastruktur geringfügig höher. (Wuppertal Institut, 2017). Bei der Elektrolyse aus dem EU-Strommix ergeben sich Emissionen von etwa 220 g CO₂/MJ H₂. Dies entspricht 792 g CO₂/kWh H₂, bzw. etwa 100 g CO₂/kWh H₂ mehr Emissionen. Die Emissionen für 100 % grünen Wasserstoff liegen hier bei 13 g CO₂/MJ, dies entspricht 46,8 g CO₂/kWh H₂. (Wuppertal Institut, 2017)

Türkiser Wasserstoff

CO₂ Emissionen nur als Vorkettenemission, Methanprotolyse selbst emissionsfrei. (Greenpeace Energy EG, 2020)

Vorkettenemissionen Erdgas: Sie entstehen durch Förderung, Aufbereitung und Transport des Rohstoffs. Die Emissionen bei Erdgas entsprechen etwa **59 g CO_{2äq}/kWh**. Dies entspricht ca. 25% der Gesamtemissionen bis hin zur Nutzung. (Greenpeace Energy EG, 2020)

Tabelle 0-1 Zusammenfassung CO₂-Emissionen (nach (Greenpeace Energy EG, 2020))

| | Prozess Emissionen | Inkl. Vorkettenemissionen |
|---------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Grauer Wasserstoff | 300 g CO ₂ /kWh | 398 g CO _{2äq} /kWh |
| Blauer Wasserstoff | 70 g CO _{2äq} /kWh | 168 g CO _{2äq} /kWh |
| Grüner Wasserstoff (Strom-mix) | 0 g CO _{2äq} /kWh | 691 g CO _{2äq} /kWh |
| Grüner Wasserstoff (100% regenerativ) | 0 g CO _{2äq} /kWh | 26 g CO _{2äq} /kWh |
| Türkiser Wasserstoff | 0 g CO _{2äq} /kWh | 98 g CO _{2äq} /kWh |

Technology Readiness Level (TRL)

„Der Technology Readiness Level (TRL), auf Deutsch als Technologie-Reifegrad übersetzt,^[1] ist eine Skala zur Bewertung des Entwicklungsstandes von neuen Technologien auf der Basis einer systematischen Analyse. Er gibt auf einer Skala von 1 bis 9 an, wie weit entwickelt eine Technologie ist.“ (Wikipedia, 2020)

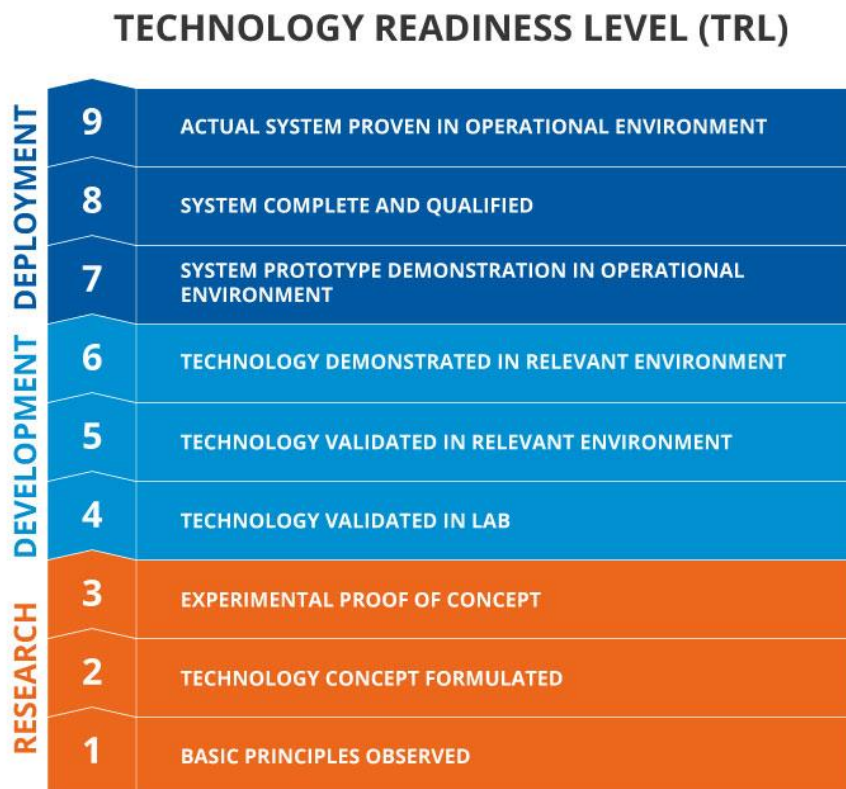


Abbildung 0-2: Technology Readiness Level (TWI Global, 2020)