

Wasserstoffwertschöpfungskette im Rheinischen Revier

Kurzstudie



Herausgeber:

ZUKUNFTSAGENTUR RHEINISCHES REVIER

Am Brainergy Park 21, 52428 Jülich

www.rheinisches-revier.de

Autoren: Felix Schimek, Till Gerstein, Martin Robinius

Oktober 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Die Ergebnisse auf einen Blick.	4
2. Einleitung zur Studie.	6
3. Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft.	7
Technologien der H ₂ –Wertschöpfungskette.	7
Bedarfsanalyse für Wasserstoff.	9
4. Akteure der Wertschöpfungskette.	11
Status quo im Rheinisches Revier.	11
5. Potenzialanalyse.	14
Relevanz und Chancen der Technologieproduktion im Rheinisches Revier	14
Stärken und Schwächen des Rheinisches Reviers	16
Wertschöpfungseffekte.	18
6. Rolle des Rheinisches Reviers.	19
Förderprogramme.	19
Vernetzungsformate.	21
Governance.	22

7. Literaturverzeichnis.	25
Anhang.	26
Abbildungsverzeichnis.	26
Abkürzungsverzeichnis.	26
Technologiesteckbriefe.	27

1 Die Ergebnisse auf einen Blick

Potenzial

Arbeitsergebnisse

➤ Handlungsempfehlungen

Steigende lokale und globale H₂-Bedarfe.

1

In NRW entsteht bis 2030 eine H₂-Nachfrage von bis zu 26 TWh/a. Hierbei entstehen für Unternehmen des Rheinischen Reviers (RR) Chancen zur Lieferung von H₂-Technologien. Für den langfristigen Erfolg der Unternehmen ist jedoch die Nachfrage in globalen Märkten relevant.

- Initiativen zur Deckung der regionalen Nachfrage nach H₂-Technologien durch regionale Produktion aufbauen.
- Unternehmen bei der Erschließung von Exportmärkten unterstützen.

Im RR ist eine große Abdeckung der H₂-Wertschöpfungskette vorhanden.

2

Im RR haben bereits 47 Unternehmen ein H₂-Produkt im Portfolio. Die Produktionskapazität der Unternehmen ist jedoch sehr unterschiedlich. Mindestens 22 Unternehmen haben Potenzial zum Transfer von Produkten oder Kompetenzen in den H₂-Bereich.

- Unternehmen mit vorhandenen Produkten in der Expansion unterstützen.
- Durch Information und Vernetzung Kompetenzen der Unternehmen auf den H₂-Bereich übertragen.

H₂-Technologien benötigen eine Vielzahl an Zuliefererbauteilen.

3

Produktionskapazitäten für H₂-Technologien sind in NRW und in DE im Aufbau. Zulieferer können Bauteile zu komplexen Systemen (Elektrolyse, H₂-LKW etc.) beisteuern.

- Unternehmen hinsichtlich dem Bedarf an Komponenten aufklären.
- Wettbewerbsvorteile durch Forschung an Kernbauteilen (z.B. Katalysatoren) erarbeiten.

Systemanbieter erlauben eine integrierte regionale Wertschöpfung.

4

Durch Systemanbieter (H₂-Versorgung, H₂-LKW etc.) welche lokale Produkte verwenden, wird eine hohe lokale Wertschöpfung erreicht.

- Systemanbieter oder entsprechende strategische Partnerschaften im Bereich Fahrzeuge (H₂-LKW & – Busse) und H₂-Versorgung (Erzeugung, Speicherung, Verteilung) aufbauen.

Das RR hat eine gute Ausgangslage für die H₂- & Brennstoffzellenindustrie.

5

Im RR ist neben einer ausgeprägten (öffentlichen & industriellen) Forschung, eine Vielzahl an Unternehmen mit Erfahrung in der Energiewirtschaft vorhanden. Der Transformationsdruck des Strukturwandels und die vorhandenen Fördermittel sprechen weiter für die Region.

- Die Stärken des RR im über-regionalem Marketing gezielt kommunizieren.
- In umsetzungsnahen Projekten den Innovationstransfer aus der Forschung fördern.

Bestehende Fördertöpfe nutzen und ergänzen.

6

Fördergelder sind vorhanden, jedoch wird der Aufbau von Produktionskapazitäten zu wenig adressiert. Zudem ist es für kleine Unternehmen zu aufwendig an Fördermittel zu kommen.

- Über geeignete Kanäle die Möglichkeiten zum Abruf von Geldern für H₂-Projekte sicherstellen.
- Unternehmen bei der Beantragung von Fördermitteln entlasten.

Bis zu 4.500 Jobs in 2030 in der H₂- & Brennstoffzellenindustrie im RR.

7

Wird der Aufbau der H₂- & BZ-Industrie im RR unterstützt, können in 2030 bis zu 4.500 Arbeitsplätze bei einem potenziellen Umsatz von etwa 700€ Mio. entstehen.

- Zur vollständigen Umsetzung der Wertschöpfung sollte die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom sichergestellt werden.
- Zur Hebung der Potenziale sind gemeinsame Anstrengungen der Politik und der Industrie notwendig

Synergien durch koordinierte & fokussierte Zusammenarbeit im RR.

8

Im RR finden sich eine Vielzahl an öffentlichen Akteuren, welche sich in ihren Zielen und Absichten überschneiden.

- Vertrauensfördernde Vernetzungsformate zur Etablierung einer H₂-Gemeinschaft aufbauen.
- Eine zentrale Anlaufstelle zur Bündelung von Aktivitäten der Akteure etablieren.

2. Einleitung zur Studie

Der Klimawandel und die erfolgreiche Entwicklung der Energiewende stellen gleichzeitig eine große Herausforderung sowie Chance für den Strukturwandel im Rheinischen Revier (RR) dar. Nicht zuletzt haben die Folgen des Ukraine Krieges sowie der Bedarf nach Energiesicherheit ein Umdenken hinsichtlich der Diversifikation und Unabhängigkeit der Versorgung und Standortsicherung der lokalen Industrien initiiert. In diesem Zusammenhang kommt Wasserstoff (H_2) als Energieträger eine zentrale Rolle zuteil. In der 2020 veröffentlichten H_2 -Roadmap Nordrhein-Westfalen werden Zielsetzungen für den Aufbau einer H_2 -Wirtschaft formuliert. Diese beinhalten unter anderem den Aufbau übergreifender H_2 -Mobilitätsanwendungen sowie die Versorgung NRWs mit H_2 durch regionale Elektrolysekapazitäten und ein Pipelinenetz. (MWIKE NRW 2020) Das RR hat hierdurch die Chance, an der zukünftigen regionalen- und überregionalen H_2 -Wirtschaft zu partizipieren und seine bestehenden Kompetenzen über die Wertschöpfungskette H_2 zu stärken und auszubauen.

Die Studie **Wasserstoffwertschöpfungskette im Rheinischen Revier** zeigt auf, welche Rolle das Rheinische Revier in einer H_2 -Wirtschaft spielt und welche Potenziale zur regionalen Wertschöpfung über die Produktion von H_2 -Technologien im Rheinischen Revier bestehen. Die Studie ist dabei wie folgt aufgebaut. Zunächst erfolgt eine Aufnahme der grundlegenden Technologien entlang der Wertschöpfungskette von Wasserstoff. Folgend werden die Ergebnisse einer Meta-Analyse zu zukünftigen H_2 -Bedarfen erörtert. Kapitel 4 beinhaltet eine Bestandsaufnahme und Einordnung der H_2 -Akteure im RR. Darauf aufbauend folgt die Analyse der Potenziale zur Partizipation an einer H_2 -Wirtschaft. Kapitel 6 fokussiert die Positionierung und Möglichkeiten des RR in Bezug auf Förderung, Vernetzung und Steuerung der Aktivitäten in der Region. Im Ergebnis werden für jedes Kapitel Maßnahmen empfohlen, um die Potenziale zu heben und die Attraktivität der Region für die H_2 - und Brennstoffzellenindustrie (H_2 - & BZ-Industrie) zu stärken.

3. Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft

Das Rheinische Revier galt bisher als Lieferant von Energie auf Basis der Verstromung von Braunkohle aus lokalen Tagebaugebieten. Im RR und in den angrenzenden Gebieten Nordrhein–Westfalens ist deshalb überproportional viel energieintensive Industrie anzufinden. Die Herausforderungen für die Zeit nach der Kohleverstromung bestehen zum einen in der Sicherstellung der Energieversorgung der lokalen Industrien und zum anderen im Aufbau neuer Wertschöpfungspotenziale als Ersatz für wegfallende Industriezweige. Dabei soll das RR nicht nur ein bedeutender Industriestandort bleiben, sondern durch den laufenden Transformationsprozesses zur Modellregion für zukünftige Energiesysteme avancieren (ZRR – IRR GmbH 2020).

Allein durch den Ausbau von Erneuerbaren Energien und die Elektrifizierung von Energieanwendungen kann der Wegfall der fossilen Energieträger voraussichtlich nicht kompensiert werden. Im Hinblick auf die Diversifikation und Sicherstellung der Energieversorgung ist die Integration von H₂ in das Energiesystem dabei ein zentraler Baustein der Energiewende.

Lokale Wertschöpfung kann zum einen durch die Nutzung regional verfügbarer Erneuerbarer Energien zur Produktion von H₂ generiert werden und zum anderen durch die Produktion von Komponenten und Systemen, welche entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette eingesetzt werden. Da das Potenzial der Erneuerbaren Energien und damit die Wasserstoffproduktion aus regionalen Stromquellen im Rheinischen Revier begrenzt ist, fokussiert diese Studie auf die Chancen im Bereich der Wasserstofftechnologien (MWIKE NRW 2020).

Das Kapitel **Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft** stellt die technischen Grundlagen entlang der H₂–Wertschöpfungskette sowie potenzielle H₂–Bedarfe in Deutschland und NRW dar.

Technologien der H₂–Wertschöpfungskette

Zur Veranschaulichung der diversen Technologien der H₂–Wertschöpfungskette sind wichtige Systeme und Anwendungen auf 21 Steckbriefen dargestellt. Ein Fokus liegt dabei auf den an den Systemen beteiligten Einzelkomponenten. Die Steckbriefe sind nach dem Aufbau der Wertschöpfungskette geordnet und decken die Bereiche Erzeugung, Transport, Speicherung, Verteilung und Anwendungen ab (siehe Abbildung 1) und können zur Erstinformation von Unternehmen oder der Öffentlichkeit genutzt werden.



Abbildung 1: Übersicht der in Steckbriefen dargestellten Technologien der H₂-Wertschöpfungskette.

Die Steckbriefe beinhalten eine Beschreibung der Technologie sowie Informationen zu Kosten, typischen Leistungsdaten und Herstellern. Um Anknüpfungspunkte für einen Technologietransfer aufzuzeigen, sind für alle Technologien die zugehörigen Anlagenteile und Komponenten dargestellt. Diese Informationen dienen der Bestimmung möglicher Technologien und Komponenten, welche von Unternehmen des RR hergestellt oder aufgrund technologischer Nähe in bestehende Produktportfolios aufgenommen werden können. Die Einordnung der Marktreife erfolgt auf Grundlage der angekündigten Projekte zur Produktion bzw. Anwendung der Technologien. In Abbildung 2 ist ein exemplarischer Steckbrief für die PEM Elektrolyse dargestellt. Der vollständige Steckbriefsatz ist dem Anhang zu entnehmen.

Protonen-Austausch-Membran Elektrolyse (PEMEL)

Erzeugung

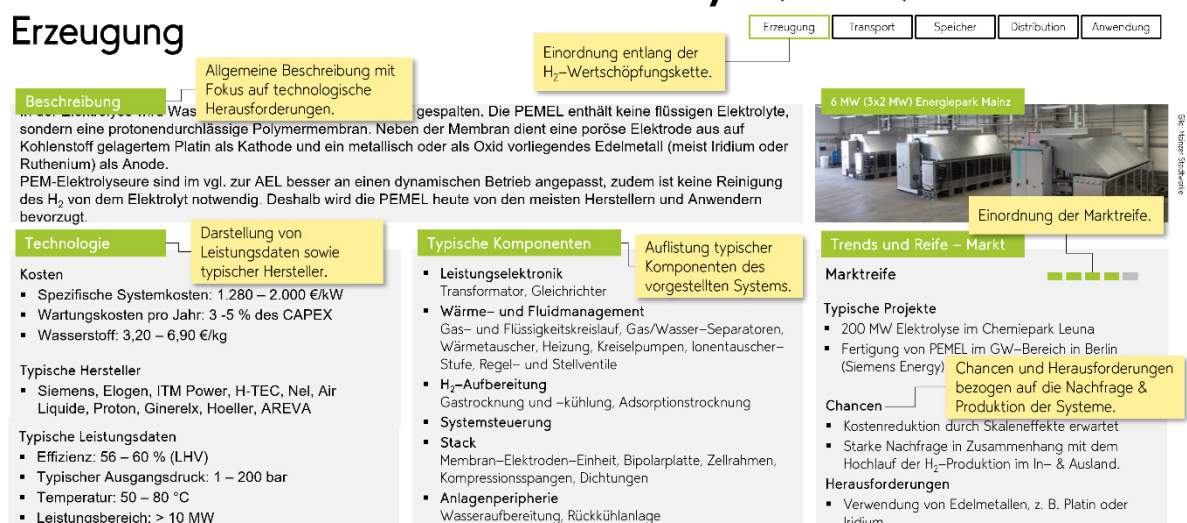


Abbildung 2: Technologiesteckbriefe (Beispiel: PEM Elektrolyse).

Bedarfsanalyse für Wasserstoff.

Der prognostizierte Wasserstoffbedarf ist ein Indikator für die Relevanz des Energieträgers und der dahinterstehenden Technologien. Der zukünftige H₂-Bedarf und die Größenordnung der zukünftigen H₂-Wirtschaft in der Region sind von einer Vielzahl technischer und ökonomischer Faktoren abhängig. Zur Einordnung der Potenziale in Nordrhein–Westfalen wurde eine Metastudie zu den zukünftigen H₂-Bedarfen durchgeführt.

Hierzu wurden **12 Studien analysiert**¹, welche die Erreichung der THG–Neutralität bis 2045 betrachten. Die Ergebnisse in Abbildung 3 zeigen spezifische Wasserstoffbedarfe für Deutschland und das Land NRW. Die analysierten Studien wurden in zwei Szenario Cluster mit hohen und niedrigen H₂-Bedarfen eingeteilt und je Cluster Mittelwerte gebildet.

Im Jahr 2030 ist in Deutschland ein **H₂-Bedarf zwischen 60 und 130 TWh/a** zu erwarten. Zur Erreichung der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 entsteht in Deutschland ein aus der Szenarioanalyse abgeleiteter **H₂-Bedarf von 280 bis 550 TWh/a**. Die EU hat im Mai 2022, im Zuge der „REPowerEU“ Initiative zur Energieunabhängigkeit von Russland, das Ziel zur Nutzung von 788 TWh/a Wasserstoff im Jahr 2030 ausgegeben. Für das Jahr 2050 wird in Europa ein Bedarf von bis zu 2.250 TWh/a erwartet. (FCH JU 2019; BMWi 2021; Kopernikus–Projekt Ariadne 2021; Europäische Kommission 2022)

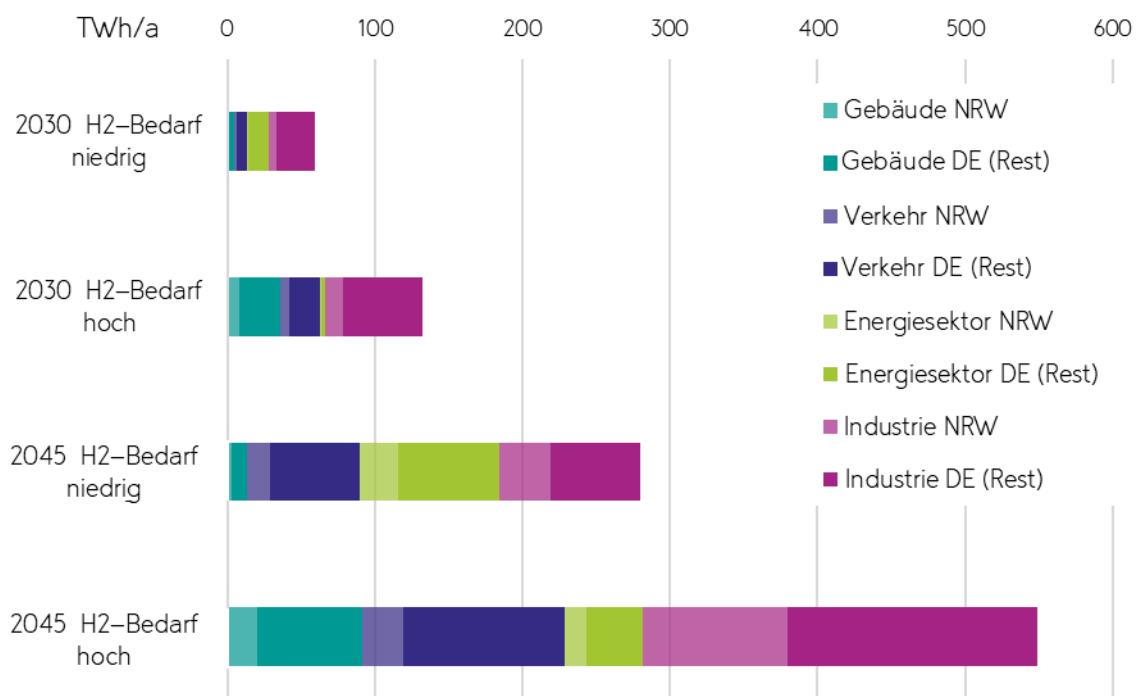


Abbildung 3: Wasserstoffbedarfe in Deutschland mit Anteil in NRW in TWh/a.

¹ Eine Übersicht der analysierten Studien ist dem Anhang zu entnehmen.

Aus der Bandbreite der ermittelten Bedarfe für Deutschland werden NRW-spezifische Bedarfe durch einen Übertrag der sektoralen Anteile auf die nationalen H₂-Bedarfe ermittelt. Demnach wird in **NRW im Jahr 2030 ein H₂-Bedarf von 10 – 26 TWh/a** erwartet. Im **Zieljahr der Treibhausgasneutralität** liegt die Bedarfserwartung bei **79 – 161 TWh/a**, was etwa einem Drittel der Nachfrage für Gesamtdeutschland entspricht. Durch die stark gestiegenen Energiepreise und die Verknappung des Gasangebotes in Folge des Ukraine-Krieges ist eine schnellere Diversifizierung der Energieversorgung durch Industrie und Politik zu erwarten. Daher ist es wahrscheinlicher, dass für **2030 das Szenario „hoher H₂-Bedarf“** eintritt.

Der Vergleich der erwarteten Bedarfe in Europa mit den erwarteten Bedarfen in Nordrhein-Westfalen zeigt, dass die Region ein wichtiger Absatzmarkt für Wasserstoff und damit auch für Wasserstofftechnologien wird. Dennoch sind die Marktpotenziale im Ausland um ein Vielfaches größer. Für produzierende Unternehmen im RR kann NRW ein erster Absatzmarkt für H₂-Technologien sein. Parallel müssen auch **Marktpotenziale in Deutschland sowie im Ausland** erschlossen werden, um die Erfolgsaussichten von Technologieunternehmen aus dem RR im nationalen und globalen Wettbewerb zu sichern.

Aufgrund der begrenzten Potenziale für den Ausbau der Erneuerbare Energien in NRW, sind auch die Kapazitäten zur Erzeugung von grünem Wasserstoff aus regionalem Strom begrenzt. Voraussichtlich werden in NRW **H₂-Importquoten von circa 90 %** benötigt (MWIKE NRW 2020). Um die steigende H₂-Nachfrage decken zu können bedarf es daher **umfassender Versorgungs- und Verteilungskonzepte** für H₂, welche in Kooperation mit potenziell großen industriellen Verbrauchern von grünem Wasserstoff, wie etwa der chemischen Industrie, erarbeitet werden müssen.

Alternativ könnte die Importquote verringert und die lokale Wertschöpfung gesteigert werden, indem Strom importiert und für die Wasserstoffherzeugung in NRW genutzt wird. Voraussetzung hierfür ist eine **gute Anbindung an das überregionale Stromtransportnetz** um z.B. Offshore-Wind von der Nordsee nutzen zu können.

4 Akteure der Wertschöpfungskette

In einer umfassenden Recherche wurden Akteure aus den Bereichen der Unternehmen, der Forschung und der öffentliche Akteure wie zum Beispiel Vereine identifiziert, welche mit Wasserstoff in Verbindung stehen. Das heißt, den Akteuren konnte entweder ein Produkt oder ein Projekt im Wasserstoffbereich zugeordnet werden oder aber deren Produkte, Produktionstechnologien oder Kompetenzen sind auf den Wasserstoffbereich übertragbar.

Insgesamt sind **288 Akteure mit H₂-Aktivitäten in NRW** identifiziert, davon befinden sich 111 innerhalb des Rheinischen Reviers. Von den 71 Unternehmen im Rheinischen Revier haben 47 bereits ein H₂-Produkt im Portfolio. Mindestens 22 der Unternehmen im RR haben Potenzial für einen Transfer von Produkten oder Kompetenzen in den H₂-Bereich.

Auf Basis dieser Analyse der Akteurs- & Unternehmenslandschaft, wurde der Status-Quo der Wasserstoffwertschöpfungskette im Rheinischen Revier ermittelt. Die Auswertung fokussiert dabei auf die Unternehmen in der Region, öffentliche Akteure oder Forschungseinrichtungen sind ausgeblendet.

Status quo im Rheinisches Revier.

Auf Grundlage der erstellten Akteursdatenbank wurden die Unternehmen entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette eingeordnet. Das heißt jedem Unternehmen wurde eine oder mehrere Technologien zugeordnet. Dabei wird je Technologie und Unternehmen der Status „vorhandenes Produkt“, „übertragbares Produkt“ oder „übertragbare Produktionstechnologie“ vergeben. Einem Unternehmen können für unterschiedliche Produkte unterschiedliche Stadien zugeschrieben werden.

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht des Produktportfolios der Unternehmen im Rheinischen Revier. Die oberste Zeile beschreibt die Cluster innerhalb der Wertschöpfungskette, in welche das Produkt oder die Anwendung des Unternehmens eingeordnet werden kann. Die Cluster sind Dienstleistungen, Bau & Betrieb von Infrastruktur, Produktion von Komponenten & Systemen sowie H₂-Anwendungen. Auf der X-Achse sind die einzelnen Technologien und Systeme der Wertschöpfungskette aufgetragen. Die Säulen des Diagramms zeigen die Anzahl der Unternehmen, welche jeweils die Technologie im Portfolio haben. Über die Farbe der Säule ist der Status des Produktes bei den Unternehmen ersichtlich.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass bereits **viele Technologien entlang der Wertschöpfungskette von Unternehmen im Rheinischen Revier bedient werden**. Bis auf den Bereich der Infrastruktur-Komponenten ist für nahezu jede H₂-Technologie ein Unternehmen mit einem „vorhandenen Produkt“ vertreten. Der Reifegrad der Produkte und die Produktionskapazitäten der Unternehmen unterscheiden sich jedoch stark und sollten für weitere Schlussfolgerungen näher betrachtet werden.

Ein Schwerpunkt der Unternehmen im Rheinischen Revier liegt im Bereich der Planung und Beratung sowie der Forschung. Dies ist damit zu erklären, dass traditionell viele Dienstleister wie mit Ursprung in der fossilen Energiewirtschaft im Rheinischen Revier ansässig sind und diese auch bereits Angebote in Bezug auf Wasserstoff im Portfolio haben.

Potenziell übertragbare Produkte oder Kompetenzen liegen nahezu entlang der gesamten Wertschöpfungskette vor. Ein Schwerpunkt liegt im Bereich des **Aufbaus und des Betriebs von H₂-Infrastruktur**, wie z.B. Bauleistungen, dem Betrieb von H₂-Speicherung & Verteilung oder dem Bau von H₂-Tankstellen. Des Weiteren liegt Transferpotenzial im Bereich der **Produktion von Anwendungskomponenten, genauer von Stack-Komponenten, Bauteilen des Wärme- und Fluidmanagements und Speicher** vor. Aber auch im Bereich des Maschinenbau gibt es einige Unternehmen mit Potenzial zur Nutzung vorhandener Kompetenzen.

Lücken in der Wertschöpfungskette liegen im Bereich der Produktion von Infrastrukturkomponenten. Im Rheinischen Revier sind keine Unternehmen bekannt, welche H₂-Pipeline, H₂-Transportschiffe (binnen) oder Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Systeme produzieren. Auch ist kein Unternehmen identifiziert, dass Niederdruckspeicher vom Typ I herstellt. Auf der anderen Seite sind Unternehmen ansässig, welche Kompressoren, Hochdruckspeicher und Tankstellen aus dem Bereich der Infrastruktur anbieten.

Da die Unternehmen des Rheinischen Reviers im globalen Wettbewerb stehen, ist zu beachten, dass die Analyse im Kontext der regionalen Grenzen des Rheinischen Reviers durchgeführt wurde. Um eine Einschätzung bzgl. der Chancen einzelner Unternehmen zur Ansiedelung bzw. für den Aufbau von Produktionskapazitäten einzelner Produkte im Rheinischen Revier geben zu können, sind unter anderem die Wettbewerber im Umfeld im Detail zu analysieren. Ein erster Ansatz für eine Recherche kann die erstellte Akteursdatenbank sein, welche auch Unternehmen in NRW beinhaltet.

Aufgrund der nahezu vollständigen Abdeckung der Produkte der Wertschöpfungskette kann das Rheinische Revier bei einem Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft in vielen Technologiebereichen partizipieren. Gleichzeitig zeichnet sich ein Potenzial für eine enge Zusammenarbeit der Unternehmen ab, um Beratung im Bereich Forschung und Entwicklung, Produktionsmaschinen und Zulieferbauteile aus der Region zu beziehen.

Übersicht des Produktportfolios der Unternehmen im Rheinischen Revier bezogen auf die H₂-Wertschöpfungskette

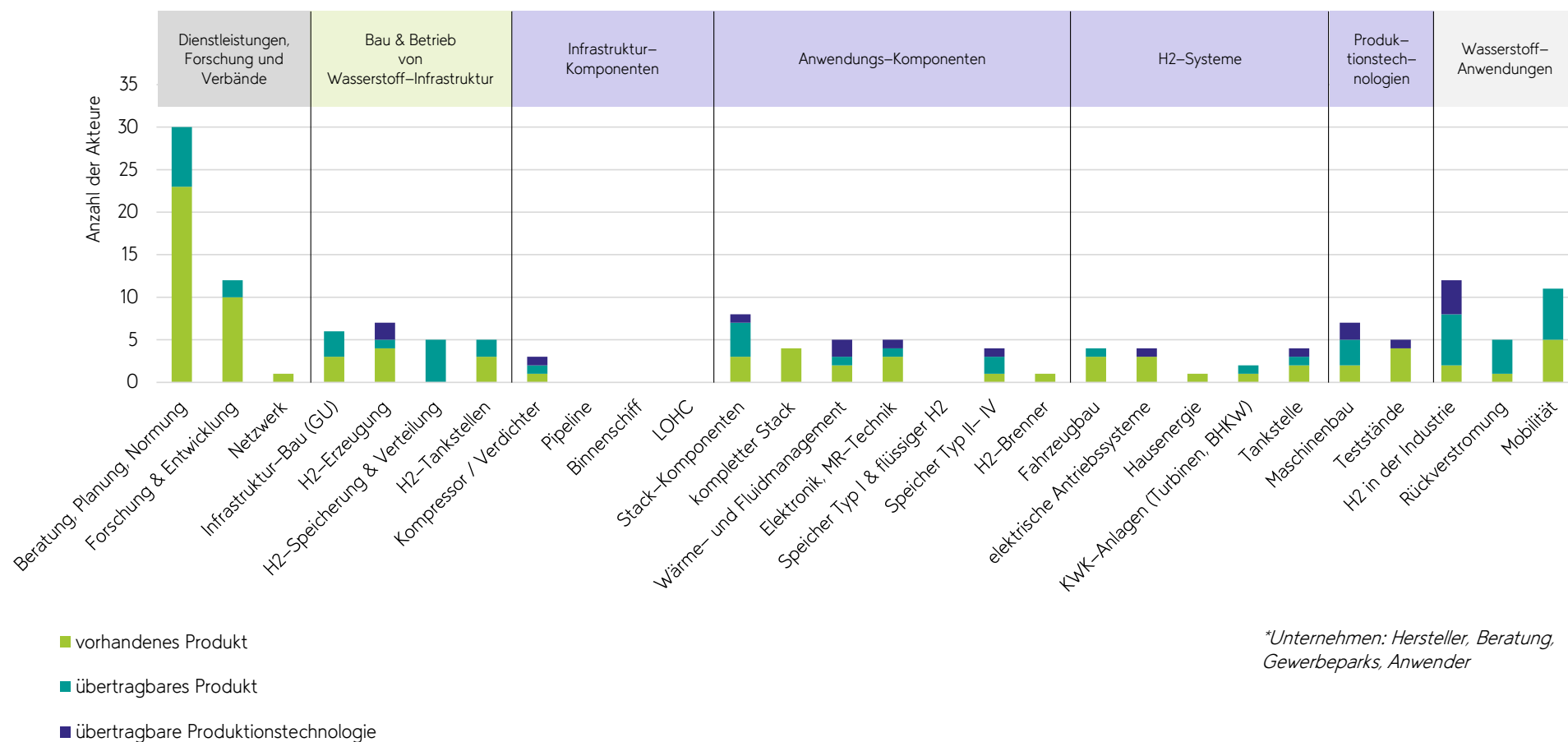


Abbildung 4: Übersicht des Produktportfolios der Unternehmen im Rheinischen Revier

5 Potenzialanalyse

Zur Abschätzung der Markt-, Kunden, Wettbewerbs- und Umfeldpotenziale des Rheinischen Reviers sowie zur Beurteilung der Chancen und Risiken, die sich für die Region ergeben wurde eine Potenzialanalyse durchgeführt. Zur Quantifizierung der Chancen sind Wertschöpfungs- & Arbeitsplatzeffekte ermittelt und analysiert.

Relevanz und Chancen der Technologieproduktion im Rheinischen Revier

Zur Beurteilung, in welchen Bereichen der Aufbau von lokaler Wertschöpfung Potenzial hat und unterstützungswürdig ist, wurden die zehn wichtigsten Wasserstofftechnologien und –systeme genauer analysiert. Zunächst wurden die Technologie hinsichtlich deren Relevanz in Bezug auf den Markthochlauf eingeordnet. In der Bewertung wurde die erwartete Nachfrage in Zusammenhang mit deren Eintrittswahrscheinlichkeit und die zeitliche Einordnung berücksichtigt. Zusätzlich wurde auch die aktuelle Verfügbarkeit von Produkten im europäischen Markt mit einbezogen.

Weiterhin wurden die Chancen, eine Produktion im Rheinischen Revier aufzubauen, bewertet. Diese Einschätzung wurde durch eine Detailbetrachtung der vorhandenen Kompetenzen im RR im Vergleich zur Unternehmenslandschaft in NRW ermittelt. Liegt beispielsweise für eine Technologie keine Kompetenz im RR oder eine starke Konkurrenz im Umfeld vor, so erfolgt eine niedrige Bewertung. Ist allerdings bereits eine Produktion im RR vorhanden und keine Konkurrenz in NRW identifiziert, so wird die Chance für Wertschöpfung durch eine Produktion hoch eingestuft.

Durch eine Kombination der Relevanz für den Markthochlauf und der Chancen zum Aufbau von Produktionskapazitäten lassen sich technologiespezifische Potenziale zur Wertschöpfung im RR identifizieren. **Abbildung 5 zeigt den Vergleich zwischen den Technologien und Systemen in Bezug auf deren Relevanz für den Markthochlauf und den Chancen zur Produktion im RR.**

Auf Grundlage der Bewertung lassen sich die betrachteten H₂-Technologien und –systeme in drei Gruppen einteilen. In der ersten Gruppe ist die Relevanz der Technologien für den Markthochlauf sehr hoch. Das heißt es ist kurzfristig eine hohe Nachfrage zu erwarten. Zugleich sind bereits Unternehmen mit weitreichender Erfahrung oder sogar einer Produktion im Rheinischen Revier ansässig. Es besteht daher ein hohes Potenzial zur Weiterentwicklung von Wertschöpfung durch die Skalierung vorhandener Kompetenzen und von bestehenden

Produktionskapazitäten. In diese Gruppe fallen **Kompressoren, Elektrolyseure & Brennstoffzellen, Stack-Komponenten sowie Bauteile des Wärme- & Fluidmanagements und Elektronik (BoP)**. Bis auf H₂-Kompressoren wurden für alle Technologien Wettbewerber in NRW identifiziert. Insbesondere im Bereich der Brennstoffzellen und Elektrolyseure, welche den Kern der Wasserstoffindustrie bilden, sind bereits einige namenhafte Akteure in NRW aktiv. Daher sollte insbesondere hier eine Förderung oder Investition unter Berücksichtigung des Wettbewerbs im Detail evaluiert werden.

In der zweiten Gruppe findet sich der **Fahrzeugbau, die H₂-Speichersysteme und die Produktion von Tankstellen**. Diese Systeme haben eine große Relevanz für den Markthochlauf, es sind jedoch weniger ausgeprägte Kompetenzen oder Produktionskapazitäten im RR vorhanden. Es bedarf daher weiterer starker Unterstützung und gegebenenfalls der Ansiedelung von weiteren Firmen, um im Hochlauf zu partizipieren. Hohe regionale Wertschöpfung wird durch den Aufbau komplexer Systeme wie zum Beispiel H₂-LKW oder H₂-Tankstellen erreicht, in denen Bauteile von Herstellern aus der Region integriert werden. Dadurch werden Produkte der Zulieferer in eine lokale Wertschöpfungskette aufgenommen und aufgewertet. Ist die Ansiedelung von Herstellern komplexer Systeme vor Ort nicht möglich, sollten strategische Partnerschaften geknüpft werden.

Für die Technologien in der dritten Gruppe ist die Relevanz für den Markthochlauf eher niedrig, das heißt es ist mittelfristig eine mittlere bis geringe Nachfrage zu erwarten. Gleichzeitig wurden im Rheinischen Revier vergleichsweise schwach ausgeprägte Kompetenzen bei den Unternehmen identifiziert. In dieser Gruppe sind die Systeme H₂-Brenner, Produktion & Bau von Pipelines sowie Hausenergie & KWK-Anlagen eingeordnet. Insgesamt ist in diesen Technologien das kurzfristige Potenzial für den Aufbau von Wertschöpfung im Rheinischen Revier gering.

Für die Produktion von Transport- und Verteilungspipelines wird zwar mittelfristig eine relevante Nachfrage erwartet, insbesondere hier gibt es jedoch bereits starke Wettbewerber in NRW. Lokale Wertschöpfung kann dennoch durch die Verlegungsleistung von Pipelines generiert werden.

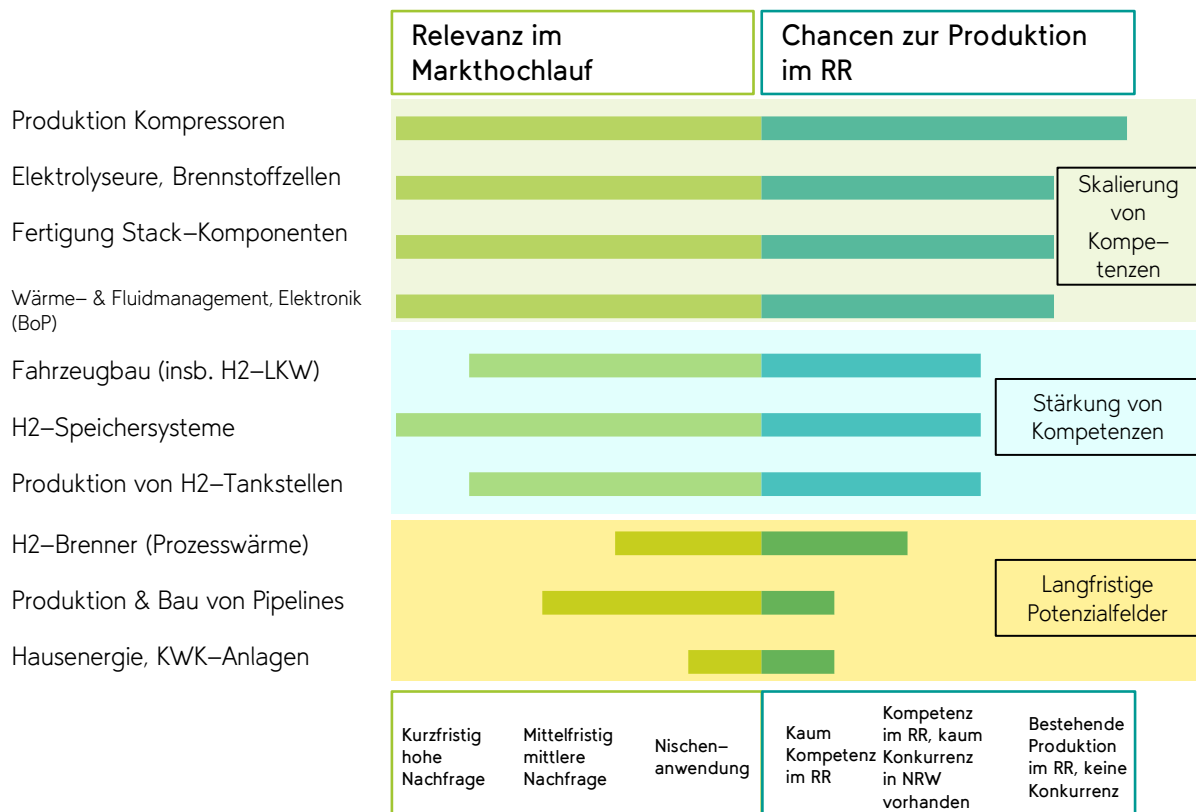


Abbildung 5: Einschätzung der Relevanz von Wasserstofftechnologien und der Chancen zur Produktion der Technologien im Rheinischen Revier.

Ein großes Potenzial zur Realisierung von Wertschöpfung durch die Nutzung von bestehenden Kompetenzen liegt im Bereich der Kompressoren, Stack-Komponenten und Stacks sowie BoP Bauteilen. Ein Fokus der öffentlichen Unterstützung sollte auf diese Technologien gelegt werden. **Es gilt Unternehmen mit vorhandenen Produkten weiter zu stärken und auf die Skalierung der Produktion vorzubereiten.**

Daneben sollte insbesondere der **Aufbau von Systemanbietern** bspw. für die H₂-Versorgung oder für H₂-Fahrzeuge diskutiert werden. Dadurch kann eine stark integrierte Wertschöpfung in der Region erreicht werden.

Stärken und Schwächen des Rheinischen Reviers

Zur Beurteilung der Stärken und Schwächen des Rheinischen Reviers in Bezug auf den Aufbau von Produktionskapazitäten wurden die technischen Aspekte der Infrastruktur analysiert. Eine gute Infrastruktur, also Anbindung sowie Versorgung, ist die Grundvoraussetzung für eine hohe Attraktivität einer Region. Darüber hinaus wurden „weiche Faktoren“ analysiert, welche für die Ansiedelung oder das Wachstum von Unternehmen im H₂-Bereich relevant sind.

SWOT–Infrastruktur.

Stärken	Schwächen
▪ Ausgeprägte Gas– und Strominfrastruktur ▪ Anbindung Binnenschifffahrt (Hafen Neuss) ▪ EE Leistung im RR soll auf 5 GW bis 2028 verdoppelt werden ▪ Etablierung 800 km langes H₂–Netz in NRW ▪ Bereits 5 H₂–Tankstellen im Betrieb	▪ Limitiertes Potenzial für den Ausbau von EE ▪ Mangel großskaliger Energiespeicher ▪ Energie muss zukünftig stärker importiert werden ▪ Verkehrsinfrastruktur in NRW ist insgesamt stark ausgelastet
▪ Anbindung an die NL für Energieimporte ▪ Erste überregionale Transportpipelines Richtung Köln werden das RR tangieren ▪ Große Synergiepotenziale mit nahegelegener Industrie (Stahl, Chemie) ▪ Verfügbare Strukturwandelförderung ▪ Hohe gesellschaftliche Akzeptanz bzgl. dem Strukturwandel und der Energiewende	▪ Potenziell hohe Energiepreise und Abhängigkeit in der Versorgung ▪ Gefahr der Abwanderung von energieintensiver Industrie ▪ Mangelnde Ausweisung von EE–Flächen und langsame Genehmigungsprozesse ▪ Brückentechnologie Erdgas ist keine nachhaltige Alternative
Chancen	Risiken

SWOT–Unternehmen.

Stärken	Schwächen
▪ Akteure der Forschung aktiv und vernetzt ▪ Firmen im RR sind in Bezug auf H₂–Technologien breit aufgestellt ▪ Gut ausgebildetes Personal verfügbar ▪ Starke öffentliche Akteurslandschaft ▪ Wasserstoffkonzepte mit nationaler Strahlkraft sind in der Region aktiv	▪ Strukturfördermittel bisher nur wenig für H₂ eingesetzt ▪ Fördergelder verfallen, da die Kommunikation der Aufrufe langsam läuft ▪ Transparenz nicht ausreichend ▪ Stärken des RR werden überregional nicht wahrgenommen
▪ Ambitionierte H₂–Strategie des Land NRW ▪ Starker und innovativer Maschinen– und Anlagenbau ▪ Programme für den Transfer von Forschungsergebnissen in die Produktion von H₂–Technologien ▪ Unternehmen der energieintensiven Industrie zeigen Innovations– und Pioniergeist	▪ Unsicherheit bezüglich Versorgungssicherheit und Preisen ▪ Markteintrittsbarrieren für KMU, sowie hohes Investitionsrisiko ▪ Förderung nicht pragmatisch abrufbar ▪ Energie– und genehmigungsrechtliche Hürden ▪ Finanzielle Leistungsfähigkeit der Akteure wird strapaziert
Chancen	Risiken

Wertschöpfungseffekte.

Die Wertschöpfungseffekte durch Aktivitäten in Verbindung mit Wasserstoff wurden aus den Szenarien der EU Hydrogen Roadmap abgeleitet. Im konservativen Szenario wird unterstellt, dass Wasserstoffaktivitäten nicht gefördert werden und kaum Infrastruktur aufgebaut wird. Im ambitionierten Szenario dagegen werden gemeinsame Anstrengungen der Wirtschaft und Politik unternommen und der Aufbau einer H₂- & Brennstoffzellen-Industrie (BZ) gefördert. Letzteres Szenario liegt im Korridor zur Erreichung der Klimaziele.

Im ambitionierten Szenario entsteht bis 2030 in der EU ein Umsatzpotenzial von ca. 156 Mrd. €. Das RR könnte davon eine Bruttowertschöpfung von **bis zu 700 Mio. € in der H₂- & BZ-Industrie** erreichen, sofern die heutige Wettbewerbsposition der relevanten Wirtschaftszweige bestehen bleibt. Für die Abschätzung wurde das Umsatzpotenzial in der EU auf die relevanten Wirtschaftszweige verteilt. Der Verteilungsschlüssel ergibt sich aus den Umsätzen im Rheinischen Revier im Vergleich zum gesamten EU-Umsatz der einzelnen Wirtschaftszweige. Durch direkte und indirekte Beschäftigungseffekte können im ambitionierten Szenario **bis 2030 zwischen 2.400 und knapp 4.500 Arbeitsplätze** in der H₂- & BZ-Industrie entstehen. Abbildung 6 zeigt eine Übersicht der potenziellen Arbeitsplätze.

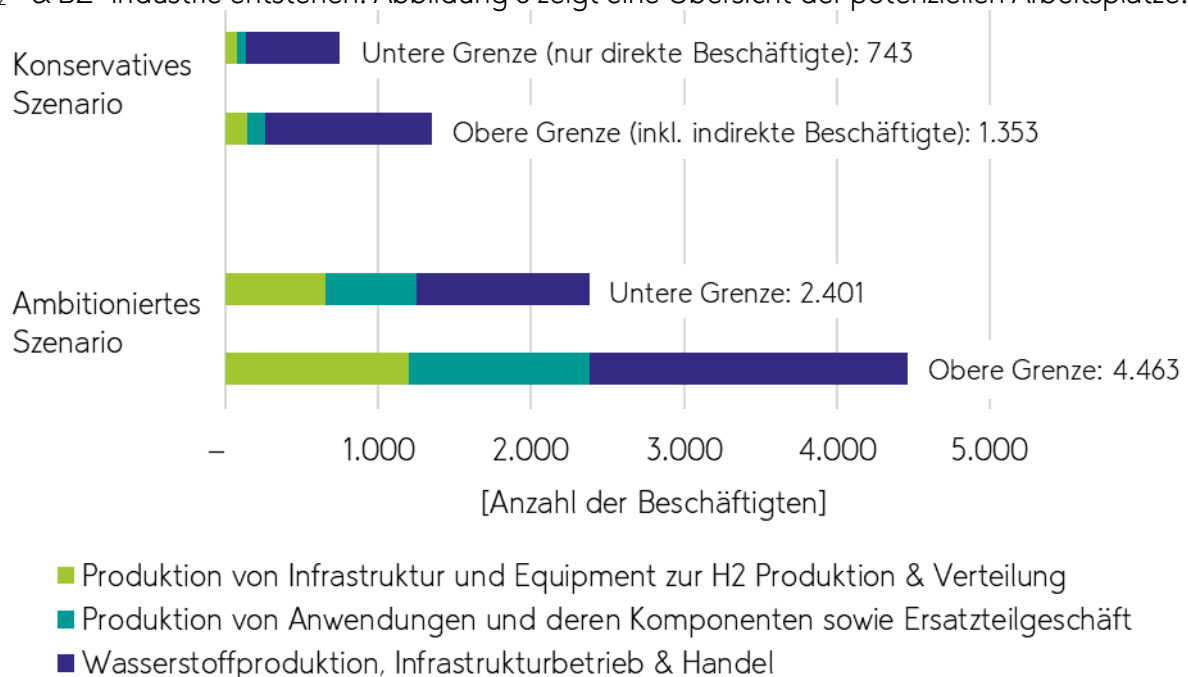


Abbildung 6: Arbeitsplätze in der Wasserstoff- und Brennstoffzellenindustrie in Rheinischen Revier im Jahr 2030.

Die Abschätzung der Arbeitsplatzeffekte in der Region basiert auf einer Zuordnung der Anzahl direkter bzw. indirekter Jobs pro Mio. € Umsatz in den Kategorien „Produktion von Infrastruktur und Equipment zur H₂-Produktion & -Verteilung“, „Produktion von Anwendungen und deren Komponenten sowie Ersatzteilgeschäft“ sowie „H₂-Produktion, Infrastrukturbetrieb & Handel“.

6 Rolle des Rheinischen Reviers

Die Analyse des Status Quo der Wasserstoffwertschöpfungskette im Rheinischen Revier hat ergeben, dass für viele Technologien bereits Kompetenzen oder sogar Produktionskapazitäten bei Unternehmen vorliegen. Die Attraktivität der Region liegt unter anderem in der starken Forschungs- und Industrielandschaft und der Vielzahl öffentlicher Akteure.

Es ist daher davon auszugehen, dass die **Unternehmen im Rheinische Revier eine wichtige Rolle in der H₂-Industrie einnehmen** können. Die Produktion von H₂-Technologien und der Aufbau von Wertschöpfung in der Region bilden dabei in Bezug auf die Entwicklung der Arbeitsplätze sowie der regionalen Energieversorgung einen wichtigen Ausgleich zum Wegfall der Kohleindustrie. Zur erfolgreichen Integration von H₂ in die Transformation der Region ergeben sich für das RR die **Handlungsfelder Förderung, Vernetzung und Governance**. Entlang dieser können die Rahmenbedingung zur Entwicklung der H₂-Wirtschaft in der Region verbessert werden.

Förderprogramme

Der erfolgreiche Hochlauf einer H₂-Wirtschaft ist von spezifischen Anreizen und Förderungen auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene abhängig. Eine Analyse der derzeitigen Förderlandschaft zeigt, dass eine Vielzahl an Fördermöglichkeiten vorhanden ist. Die Untersuchung der analysierten 50 Programme in Hinblick auf spezifische Lücken in der Förderlandschaft verdeutlicht jedoch, dass eine **Förderlücke** im Bereich des **Aufbaus von Produktionen von Teilen und Komponenten (vertikale Wertschöpfung) für die H₂-Wirtschaft** vorliegt. Förderprogramme sind häufig auf Endanwendungen von H₂-Technologien, wie beispielsweise im Mobilitätsbereich, fokussiert. Die Unterstützung von Produzenten von Teilen und Komponenten (Tier 1–3) stellt einen Anreiz für Unternehmen dar, sich im RR anzusiedeln, was den Aufbau von regionalen Technologienetzwerken fördert. Entlang der Wertschöpfungskette H₂ gibt es zudem diverse Anknüpfungspunkte für die **Integration digitaler Technologien**. Dienstleister mit Tätigkeiten im Bereich Energie sollten bei der Entwicklung digitaler Lösungen für die H₂-Wirtschaft unterstützt werden.

Die spezifische Förderung im Bereich der Produktion von Teilen und Komponenten sowie der Digitalisierung ist ein wichtiger Bestandteil bei der Skalierung und Effizienzsteigerung der (regionalen) H₂-Wirtschaft. Durch gezielte Förderung der **Übertragung bestehender Produktionslinien auf Produkte für die H₂-Wirtschaft**, sowie von Unterstützung beim **Aufbau von Technologieexport**, können Wertschöpfungspotenziale gehoben werden. Dafür

ist es notwendig, die regionale Entwicklung im globalen Kontext zu denken. Abbildung 7 zeigt die gegenwärtige Förderlücke „vertikale Wertschöpfung“.

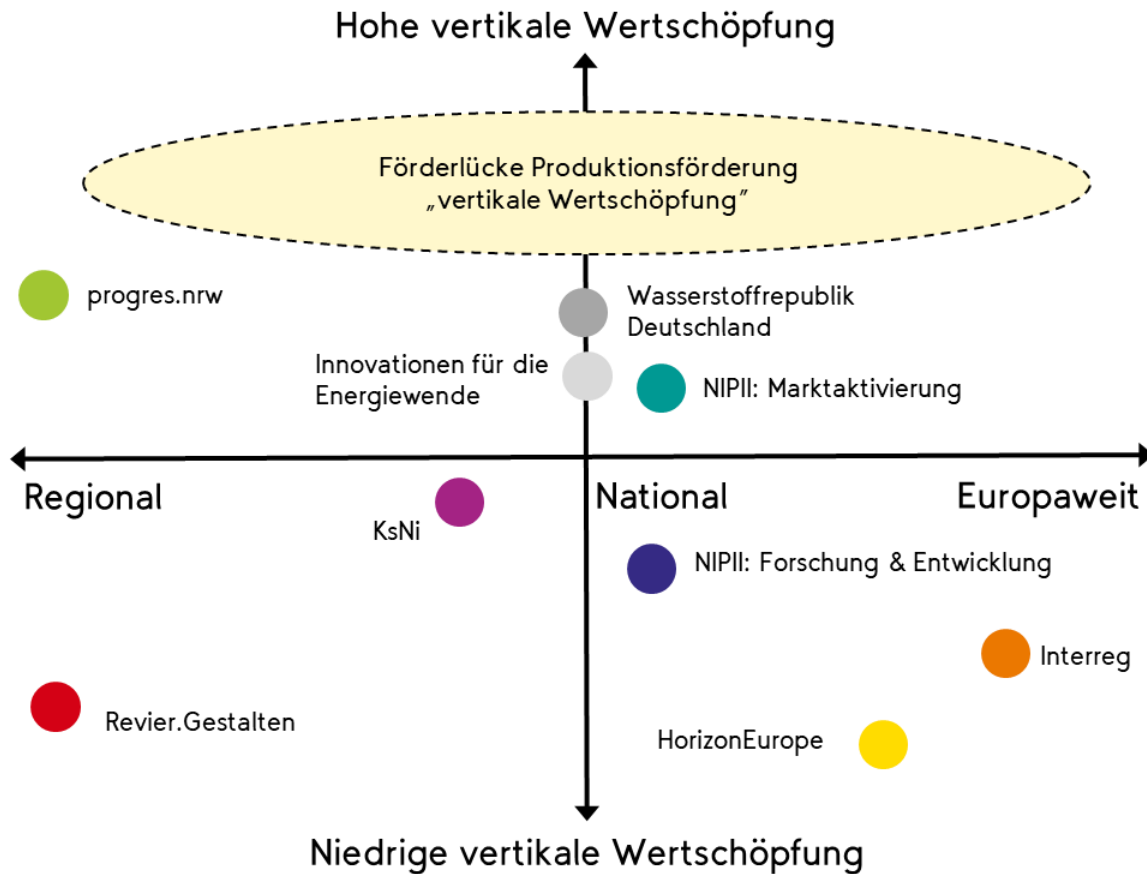


Abbildung 7: Einordnung ausgewählter Förderprogramme für die H₂-Industrie.

Knappe Personalressourcen, fehlende finanzielle Kapazitäten oder lange **Bewilligungszeiträume** sind häufige Hindernisse bei der unternehmensseitigen Entwicklung von Fördervorhaben. Dies kann dazu führen, dass Unternehmen auf eine Antragsstellung bei unklaren Erfolgschancen tendenziell verzichten. Zur Erhöhung der Motivation und Wirtschaftlichkeit der Projektanbahnungsphase kann eine zeitlich begrenzte Unterstützung der Unternehmen in Betracht gezogen werden. Dies setzt eine **verbesserte Kommunikation von Fördermöglichkeiten** (z.B. durch einen „Förder-Mailverteiler“) voraus. Weiterhin muss die Möglichkeit der Verwendung von **Mitteln aus Strukturförderprogrammen** eindeutig kommuniziert werden und bestehende Unklarheiten hinsichtlich der finalen Bewilligung von Mitteln schon bei Antragsstellung adressiert werden.

Vernetzungsformate

Zur Unterstützung des Austausches der Akteure des RR sind entsprechende Vernetzungsformate ein wichtiger Bestandteil. In der Analyse von Formaten zum Austausch und zur Vernetzung in der Region wurden 29 bestehende Formate aus dem Bereich der H₂-Wirtschaft verglichen und geclustert. Die Analyse verdeutlicht den Bedarf an Formaten zur Bildung von gegenseitiger vertrauter Interaktion der Akteure untereinander. Ein hoher Vertrauensgrad ermöglicht den Akteuren leichter gemeinsam Ideen zu entwickeln. Abbildung 8 zeigt die in der Region bestehenden Vernetzungsformate als ausgegraute Balken. Viele der bestehenden Formate adressieren die Öffentlichkeit und haben das Ziel der allgemeinen Information bezüglich Wasserstoffthemen. Formate mit Zielsetzung der Vertrauensbildung und Formate zur Schaffung von Möglichkeiten zum Aufbau von Synergien wurden weniger häufig identifiziert. Auf dieser Grundlage konnten drei Vorschläge für neue Vernetzungsformate mit dem Ziel der fokussierten Zusammenarbeit entwickelt werden.

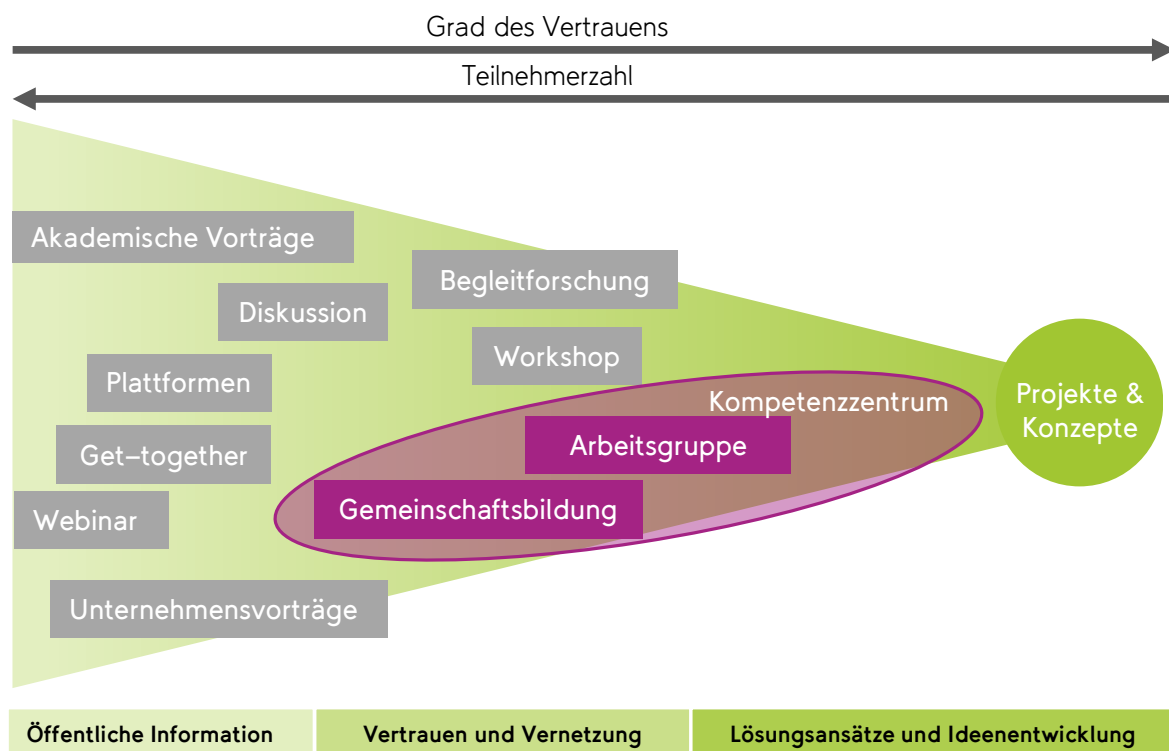


Abbildung 8: Vernetzungstunnel zur Einordnung bestehender Formate und Ideen neuer Formate.

Die **Gemeinschaftsbildung** hat zum Ziel die Identifikation der Akteure mit dem Rheinischen Revier als Region für Wasserstofftechnologien zu erleichtern, Kontakte zu knüpfen und gemeinsam an der Stärkung der Region zu arbeiten. Ein zentraler Baustein kann dabei die Entwicklung eines revierweiten Netzwerkes und die Bildung einer Interessensvertretung der H₂- & BZ-Industrie im Revier sein. Der Aufbau und die Motivation der Akteure innerhalb der

so entstehenden Gemeinschaft in der Region kann beispielsweise durch die Initiierung regelmäßiger H₂-Stammtische oder organisierte Besichtigungen von den Akteuren für die Akteure der Region erreicht werden. **Themenspezifische Arbeitsgruppen**, welche sich aus Vertretern der öffentlichen Organisationen und der Unternehmen zusammensetzen, können Herausforderungen des Hochlaufs kontinuierlich begleiten und gemeinsam adressieren. Hierbei geht es darum die Zusammenkünfte stärker auf eine Arbeitsebene auszurichten, um gemeinsam Lösungsideen zu entwickeln. Arbeitsgruppen stellen damit die Schnittstelle von unternehmerischen Belangen und öffentlichen Akteuren dar. Thematisch sind die Arbeitsgruppen entlang der Wertschöpfungskette aufzubauen. So können Synergien, beispielsweise in der gemeinsamen Projektentwicklung genutzt werden. Eine übergreifende Maßnahme zur Bündelung der gemeinschaftsbildenden Aktivitäten und lösungsorientierten Arbeitsgruppen wäre der Aufbau eines **zentralen H₂-Kompetenzzentrums** für das Rheinische Revier. Das Ziel ist es, die H₂-Aktivitäten verschiedener öffentlicher und industrieller Akteure im RR zu bündeln und zu koordinieren. Entlang verschiedener Kompetenzfelder können Arbeitsgruppen sowie mögliche bestehende und neue gemeinschaftsbildende Vernetzungsformate zentral für die gesamte Region koordiniert werden. Das Kompetenzzentrum bildet damit eine Anlaufstelle für Akteure der H₂- & BZ-Industrie und fungiert als Interessensvertretung. Ein Kompetenzzentrum könnte auch die Funktion einer Governance für die zahlreichen Akteure übernehmen und so Wirkung und Sichtbarkeit in der Region erhöhen.

Governance⁹

In Interviews mit Stakeholdern aus Politik, Industrie und Wissenschaft wurden Herausforderungen sowie Kompetenzen und Potenziale im Rheinischen Revier evaluiert. Die bestehende Fachkompetenz in der Energiewirtschaft, der Forschungsstandort und die geografische Lage bieten dem RR eine solide Grundvoraussetzung für die Entwicklung von Technologien der Energiewende. Im Hinblick auf die Ansiedelung von Unternehmen ist es wichtig, existierende **Stärken national und international zu vermarkten** und die **Rahmenbedingungen für die Förderung** bestehender Kompetenzen zu schaffen.

Hierbei besteht Synergiepotenzial in der Zusammenarbeit und der gemeinsamen Zielsetzung der zahlreichen öffentlichen Akteure. Eine Möglichkeit, die Aktivitäten der Akteure in der Region zu koordinieren besteht im **Aufbau einer übergreifenden Governance-Struktur** (Abbildung 9). Dabei kann das beschriebene Kompetenzzentrum eine zentrale Rolle bei der Bündelung der Aktivitäten einnehmen. Die Governance des RR soll dabei die in der Breite vorhandenen Initiativen, Netzwerke, Forschungsvorhaben und Agenturen in Ihrer Wirkung in der Region unterstützen. Konkret kann durch die Bündelung an zentraler Stelle die Sichtbarkeit einzelner Vorhaben bei den Akteuren in der Region und darüber hinaus erhöht

werden. Die Ansprache, Unterstützung und Vernetzung der privatwirtschaftlichen Akteure zur Hebung lokaler Wertschöpfungspotenziale ist dabei das zentrale Element.

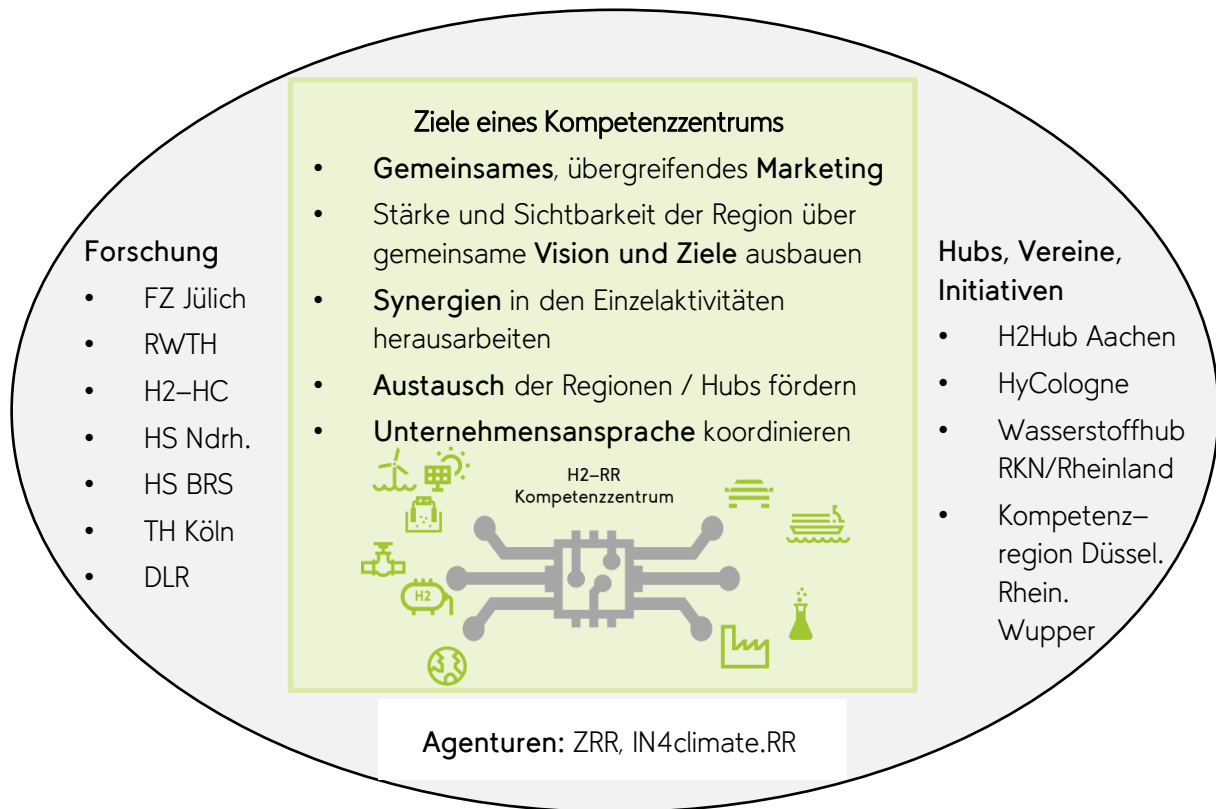


Abbildung 9: Vorschlag einer Governance-Struktur Wasserstoff im RR.

Fazit

Das Rheinische Revier steht im Zuge der Energiewende in besonderem Maße vor Herausforderungen. Der seitens Politik und Wirtschaft für NRW vorgesehene beschleunigte Kohleausstieg im Jahr 2030 wird die Transformationsdynamik in der Region weiter verstärken (RWE 2022). Um den Wegfall der Kohleverstromung in der Region zu kompensieren, müssen auf der einen Seite neue Energieströme etabliert und auf der anderen Seite neue Wertschöpfungsmöglichkeiten geschaffen werden. Wasserstoff kommt dabei eine Doppelrolle zu.

Die Integration von Wasserstoff in das Energiesystem ist ein wichtiger Baustein der Energiewende und nimmt eine zentrale Funktion zur Sicherstellung der Energieversorgung ein. Daneben ergeben sich neue Wertschöpfungspotenziale durch die Erzeugung und Verteilung von Wasserstoff sowie durch die Entwicklung und die Produktion von Wasserstofftechnologien.

Im Hinblick auf die Produkte, decken die Unternehmen im Rheinischen Revier bereits eine Vielzahl an Technologien entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette ab. Der Entwicklungsgrad der Produkte und die Produktionskapazitäten sind jedoch je Unternehmen sehr unterschiedlich. Darüber hinaus sind zahlreiche Unternehmen ansässig, welche Kompetenzen und Produktionstechnologien auf den Wasserstoffbereich übertragen könnten. Das Rheinische Revier ist daher gut aufgestellt, um am weltweiten Hochlauf der Technologienachfrage zu partizipieren. Erste strategische Absatzmärkte können sich durch die politisch unterstützten regionalen Anwendungsziele für Wasserstoff, z.B. durch die H₂-Strategie NRW, ergeben.

Im Ergebnis ist es entscheidend, die gute Ausgangslage des Rheinischen Reviers weiter zu fördern und die Transition vom Energielieferanten zum Technologielieferanten mit regionaler Wasserstoffwertschöpfung zu verknüpfen. Dabei gilt es die bereits ansässigen Akteure in der Expansion zu stärken und synergetisch neue Akteure anzusiedeln. Unternehmen finden im Rheinischen Revier eine hohe Dichte an Forschungseinrichtungen, ausgebildetes Personal, gut angebundene Flächen und zahlreiche private und öffentliche Akteure, die den Wasserstoffhochlauf unterstützen. Im Hinblick auf eine stärkere Vernetzung und Gemeinschaftsbildung ist es sinnvoll die Aktivitäten in der Region durch eine Governance-Struktur zu koordinieren.

Fördergelder sind vorhanden, jedoch benötigen Unternehmen Unterstützung bei der Beantragung und dem Abruf von Budgets, denn aufgrund komplexer Anforderungen und langen Bearbeitungsdauern sind Förderungen für KMU oftmals nicht pragmatisch zugänglich. Zudem sollten im Zuge des Hochlaufs Möglichkeiten gefunden werden, den Aufbau von Produktionskapazitäten fördertechnisch zu unterstützen.

Arbeiten Unternehmen und die Politik am Aufbau der Wasserstoffindustrie im Rheinischen Revier können in diesem Bereich bis 2030 zwischen 2.400 bis 4.500 Arbeitsplätze entstehen. Wasserstofftechnologien haben damit das Potenzial einen Teil der durch den Strukturwandel wegfallenden Wertschöpf zu ersetzen.

7 Literaturverzeichnis

- BMWi, Hrsg. 2021. „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland“. www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/berichtsmodul-3-referenzszenario-und-basissszenario.pdf?__blob%3DpublicationFile%26v%3D4.
- Europäische Kommission. 2022. „REPowerEU-Plan“. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:fc930f14-d7ae-11ec-a95f-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF.
- FCH JU, Hrsg. 2019. „Hydrogen Roadmap Europe“.
- Kopernikus-Projekt Ariadne, Hrsg. 2021. „Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – Szenarien und Pfade im Modellvergleich“, 359 pages. <https://doi.org/10.48485/PIK.2021.006>.
- MWIKÉ NRW, Hrsg. 2020. „Wasserstoff Roadmap Nordrhein-Westfalen“, 76.
- RWE, Hrsg. 2022. „Verständigung auf Kohleausstieg 2030 und Stärkung der Versorgungssicherheit in der Energiekrise“. *Pressemitteilung*, Oktober, 4.
- ZRR – IRR GmbH, Hrsg. 2020. „Wirtschafts- und Strukturprogramm 1.0“, 180.

Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der in Steckbriefen dargestellten Technologien der H ₂ –Wertschöpfungskette.	8
Abbildung 2: Technologiesteckbriefe (Beispiel: PEM Elektrolyse).	8
Abbildung 3: Wasserstoffbedarfe in Deutschland mit Anteil in NRW in TWh/a.	9
Abbildung 4: Übersicht des Produktportfolios der Unternehmen im Rheinischen Revier.	13
Abbildung 5: Einschätzung der Relevanz von Wasserstofftechnologien und der Chancen zur Produktion der Technologien im Rheinischen Revier.	16
Abbildung 6: Arbeitsplätze in der Wasserstoff– und Brennstoffzellenindustrie in Rheinischen Revier im Jahr 2030.	18
Abbildung 7: Bestimmung der Förderlücke in vertikaler Wertschöpfung.	20
Abbildung 8: Vernetzungstunnel zur Einordnung generischer Formate und Ideen neuer Formate.	21
Abbildung 9: Vorschlag einer Governance–Struktur Wasserstoff im Rheinischen Revier.	23

Abkürzungsverzeichnis

BZ	Brennstoffzelle
BoP	Balance–of–plant
H ₂	Wasserstoff
H ₂ – & BZ	Wasserstoff– und Brennstoffzellen
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
RR	Rheinisches Revier

Studien der Meta-Analyse

BMWi 2021 Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland
Strom Szenario & H2 Szenario

LBST 2019 Wasserstoff Nordrhein–Westfalen, 2 Szenarien

BDI 2021 BDI Klimapfade 2.0

Dena 2021 Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität KN100

FZJ 2021 Neue Ziele auf alten Wegen

Kopernikus Projekte 2021: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 – REMod
Szenario & REMIND Szenario

Fraunhofer ISE 2021 Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem Update KN 2045

FZJ 2021 H2–Roadmap NRW

AGORA 2021 Klimaneutrales Deutschland 2045

Technologiesteckbriefe

Technologien der H₂–Wertschöpfungskette

Darstellung in Steckbriefen

im Zuge der Studie „Wasserstoffwertschöpfungskette im Rheinischen Revier“

im Auftrag der Zukunftsagentur Rheinisches Revier.

Agendachart

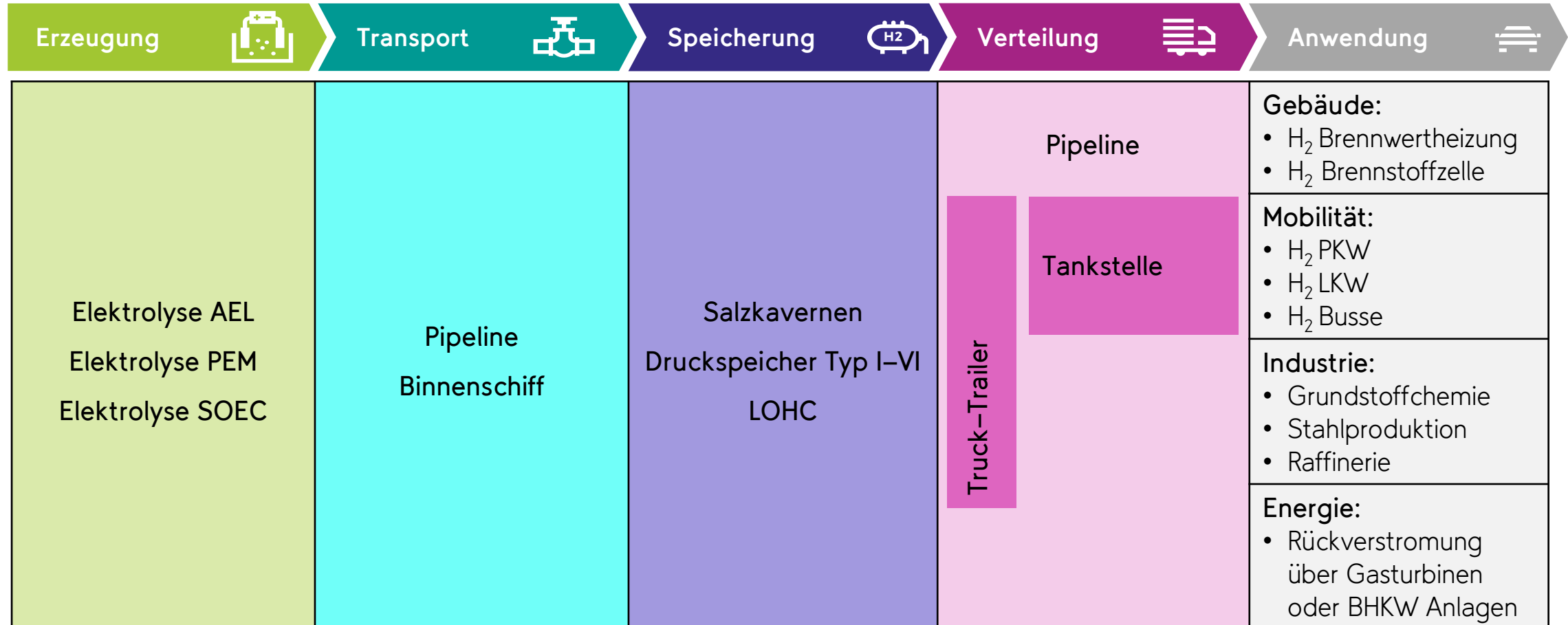
- 01 _____ Erzeugung
- 02 _____ Transport
- 03 _____ Speicherung
- 04 _____ Distribution
- 05 _____ Anwendung

Die Steckbriefe wurden in einer umfassenden Recherche erstellt.

Ausgewählte Quellen der Steckbriefe.



Technologien der H₂-Wertschöpfungskette



Übersicht der 21 Steckbriefe

	Komponente	#
Erzeugung	Protonen–Austausch–Membran Elektrolyse (PEMEL)	1
	Alkalische Elektrolyse (AEL)	2
	Festoxid Hochtemperatur–Elektrolyse (SOEC)	3
Transport	Wasserstoffkompressor	4
	Pipeline (neu)	5
	Pipeline (Umrüstung alter Erdgasleitungen)	6
	Binnenschiff für gasförmigen Wasserstoff	7
	Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC)	8
Speicher	Salzkaverne zur Wasserstoffspeicherung	9
	Wasserstoff–Druckspeicher Typ I (bis 350 bar)	10
	Wasserstoff–Druckspeicher Typ II – IV (bis 1000 bar)	11
Distribution	LKW–Trailer zum Transport von gasförmigem Wasserstoff – 250, 500 bar	12
	LKW–Trailer zum Transport von flüssigem Wasserstoff	13
	Wasserstoff–Tankstelle	14

	Komponente	#
Anwendung	Brennstoffzellen–PKW	15
	Brennstoffzellen–LKW	16
	Brennstoffzellen–Busse	17
	Wasserstoff in der Industrie: Grundstoffchemie (Methanol, Ammoniak), Stahlherstellung, Raffinerien	18
	Wasserstoff–Rückverstromung über Gasturbine oder BHKW Anlagen	19
	Wasserstoff–ready Brennertherme	20
	Brennstoffzellenheizung	21

Die Technologien sind gemäß ihrer Marktreife eingestuft.

Definition und Einstufung der Marktreifegrade.

Bezeichnung Marktreife	Einstufung	Beschreibung
Forschungsprojekt		Das Produkt ist Gegenstand der Forschung und noch nicht in kommerzieller Anwendung auf dem Markt etabliert.
Pilotprojekt		Das Produkt befindet sich in der Entwicklung und wird im industriellen Maßstab getestet.
Industrielle Entwicklung		Eine industrielle Produktion befindet sich im Aufbau. Erste konkrete Produkte sind angekündigt.
Industrielle Produktion / Anwendung		Die industrielle Produktion / Anwendung findet statt.
Etablierung am Markt		Das Produkt hat sich am Markt etabliert und findet vielfach Anwendung.

Die Einflussparameter auf die Systemkosten sind vielfältig

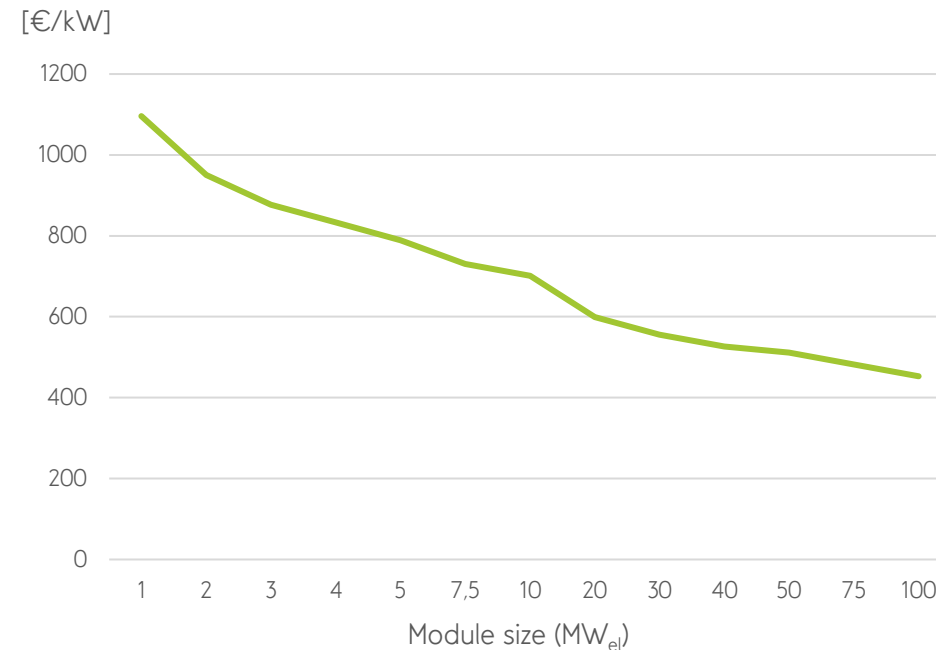
Hinweise zu den Steckbriefen.

Typische Einflussfaktoren auf Investitionskosten am Beispiel der Elektrolyse:

- Typ der Elektrolyse
- Menge der in der Elektrolyse eingesetzten Edelmetalle als Katalysator
- Automatisierungsgrad der Produktion
- Größe der Anlage (starke Skaleneffekte bis 10 MW)
- Systemgrenze (Bsp. Integration von Verdichtern oder Speichern)

→ Die in den Steckbriefen dargestellten Kosten können, je nach Ausgestaltung der Rahmenbedingungen, in der Umsetzung abweichen.

Investitionskosten der PEM-Elektrolyse in Abhängigkeit der Modulgröße [1]



Agendachart

- 01 _____ Erzeugung
- 02 _____ Transport
- 03 _____ Speicherung
- 04 _____ Distribution
- 05 _____ Anwendung

Protonen–Austausch–Membran Elektrolyse (PEMEL)

Erzeugung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

In der Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Die PEMEL enthält keine flüssigen Elektrolyte, sondern eine protonendurchlässige Polymerelektrolytmembran. Neben der Membran dient eine poröse Elektrode aus auf Kohlenstoff gelagertem Platin als Kathode und ein metallisch oder als Oxid vorliegendes Edelmetall (meist Iridium oder Ruthenium) als Anode. PEM–Elektrolyseure sind im vgl. zur AEL besser an einen dynamischen Betrieb angepasst, zudem ist keine Reinigung des H₂ von dem Elektrolyt notwendig. Deshalb wird die PEMEL heute von den meisten Herstellern und Anwendern bevorzugt.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 1.280 – 2.000 €/kW
- Wartungskosten pro Jahr: 3 – 5 % des CAPEX
- Wasserstoff: 3,20 – 6,90 €/kg

Typische Hersteller

- Siemens, Elogen, ITM Power, H-TEC, Nel, Air Liquide, Proton, Ginerelx, Hoeller, AREVA

Typische Leistungsdaten

- Effizienz: 56 – 60 % (LHV)
- Typischer Ausgangsdruck: 1 – 200 bar
- Temperatur: 50 – 80 °C
- Leistungsbereich: > 10 MW

Typische Komponenten

- **Leistungselektronik**
Transformator, Gleichrichter
- **Wärme- und Fluidmanagement**
Gas- und Flüssigkeitskreislauf, Gas/Wasser-Separatoren, Wärmetauscher, Heizung, Kreislumpen, Ionentauscher-Stufe, Regel- und Stellventile
- **H₂-Aufbereitung**
Gastrocknung und -kühlung, Adsorptionstrocknung
- **Systemsteuerung**
- **Stack**
Membran-Elektroden-Einheit, Bipolarplatte, Zellrahmen, Kompressionsspannen, Dichtungen
- **Anlagenperipherie**
Wasseraufbereitung, Rückkühlanlage

6 MW (3x2 MW) Energiepark Mainz



Bild: Mainzer Stadtwerke

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- 200 MW Elektrolyse im Chemiepark Leuna
- Fertigung von PEMEL im GW-Bereich in Berlin (Siemens Energy)

Chancen

- Kostenreduktion durch Skaleneffekte erwartet
- Starke Nachfrage in Zusammenhang mit dem Hochlauf der H₂-Produktion im In- & Ausland.

Herausforderungen

- Verwendung von Edelmetallen, z. B. Platin oder Iridium

[1] Schmidt et. al. (2017) "Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study"
[2] Smolinka et al. (2018) "Studie IndWeDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland"

[3] IEA (2019) "The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities"
[4] DLR (2020) "Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 1"

[5] Kearny Energy Transition Institute (2020) "Hydrogen applications and business models"
[6] Buttler et al. (2018) "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review."

Alkalische Elektrolyse (AEL)

Erzeugung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

In der Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Bei der alkalischen Elektrolyse (AEL) wird dabei eine Kaliumhydroxidlösung (KOH) mit einer Konzentration von 20 – 40 % als ladungsleitendes Medium (Lauge als Elektrolyt) verwendet. Ein Diaphragma separiert die gasförmigen Produkte von dem Elektrolyt. Als Elektroden werden in der Regel Titanelektroden mit einer Rutheniumoxid-Beschichtung verwendet. Die Technologie der AEL ist aus der industriellen Chlor-Alkali Elektrolyse hervorgegangen und ausgereift, sodass Systemgrößen im 3-stelligen MW Bereich möglich sind.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 640 – 1.000 €/kW
- Wartungskosten pro Jahr: 2 – 3 % des CAPEX
- Wasserstoff: 2,40 – 6,40 €/kg

Typische Hersteller

- Thyssen-Krupp (Uhde), McPhy, Teledyne, Siemens, Enapter, Iht, Nel, EM Korea, Asahi Kasei, Sunfire

Typische Leistungsdaten

- Effizienz: 63 – 70 % (LHV)
- Typischer Ausgangsdruck: 1 – 30 bar
- Zelltemperatur: 60 – 80 °C
- Leistungsbereich: > 10 MW

Typische Komponenten

- **Leistungselektronik:**
Transformator, Gleichrichter
- **Wärme- und Fluidmanagement:**
Gas- und Flüssigkeitskreislauf, Gas/Wasser-Separatoren, Wärmeübertrager, Kreislumpen, Laugenvorlage und -wäsche, Regel- und Stellventile
- **H₂-Aufbereitung:**
Gastrocknung, Laugenabscheidung & H₂-Reinigung
- **Systemsteuerung**
- **Stack:**
Diaphragma, Elektroden, Stromkollektor, Bipolarplatte, Zellrahmen, Druckplatte/Verschraubung, Dichtungen
- **Anlagenperipherie:**
Laugenaufbereitung, Rückkühlanlage

AEL Elektrolyse Sunfire



Bild: Sunfire

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte:

- 2 GW Elektrolyseanlage in saudi-arabischer Modellregion Neom (ThyssenKrupp, 2026)
- RWE baut 10 MW AEL (Sunfire) in Lingen

Chancen

- Großskalige Projekte dank ausgereifter Technologie
- Kostenreduktion durch Skaleneffekte erwartet
- Steigerung der Flexibilität durch Forschung möglich

Herausforderungen

- Alkalischer Elektrolyt, Aufreinigung des H₂ nötig
- Geringere Teillastfähigkeit, langsame Lastwechsel

[1] Schmidt et. al. (2017) "Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study"
[2] Smolinka et al. (2018) "Studie IndWeDe. Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland"
[3] Sunfire [11.05.2022] <https://www.sunfire.de/de/news/detail/rwe-realisiert-elektrolyse-projekt-mit-sunfire>

[3] IEA (2019) "The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities"
[4] DLR (2020) "Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 1"

[5] Kearny Energy Transition Institute (2020) "Hydrogen applications and business models"
[6] Buttler et al. (2018) "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review."

Festoxid Hochtemperatur–Elektrolyse (SOEC)

Erzeugung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

In der Elektrolyse wird Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Bei der Hochtemperatur–Elektrolyse (HTE bzw. Festoxid–Elektrolyse (SOEC)) wird die notwendige Energie durch Strom und zusätzlich durch Dampf zugeführt. Dadurch ist die Nutzung von Abwärme aus industriellen Prozessen möglich. Die SOEC nutzt einen keramischen Elektrolyt sowie, im vgl. zu PEM oder AEL günstigere Katalysatoren, allerdings ist die Materialbeständigkeit eine große Herausforderung. Insgesamt liegt die Entwicklung der SOEC hinter der PEM & AEL, bietet allerdings auch die größten Potenziale in Bezug auf Effizienz und Kostenreduktion.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 1.400 – 2.500 €/kW
- Wartungskosten pro Jahr: 3 – 6 % des CAPEX
- Wasserstoff: 6–8 €/kg

Typische Hersteller

- Sunfire, Solid Power, Haldor Tapsoe, Toshiba, ElringKlinger

Typische Leistungsdaten

- Effizienz: 74 – 81 % (LHV)
- Typischer Ausgangsdruck: 1 – 25 bar
- Temperatur: 650 – 1000 °C
- Leistungsbereich: > 100 kW

Typische Komponenten

- **Leistungselektronik**
Transformator, Gleichrichter
- **Wärme- und Fluidmanagement**
Gas/Dampf–Kreislauf, Gas/Dampf–Separatoren, Hochtemperatur–Wärmeübertrager, Rekuperator, Hotbox–Gehäuse, Regel- und Stellventile
- **H₂–Aufbereitung**
Gastrocknung und –kühlung, H₂–Feinreinigung
- **Systemsteuerung**
- **Stack**
Elektrolyt–Elektroden–Einheit, poröser Strömungsverteiler, Bipolarplatte, Kompressionskomponenten, Dichtungen
- **Anlagenperipherie**
Wasseraufbereitung, Rückkühlanlage

HT–Elektrolyse Sunfire



Bild: Sunfire

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- MultiPhy: 2,4 MW SOEC (Sunfire) an einer Biofuels Raffinerie

Chancen

- Die mögliche hohe Effizienz verspricht einen wachsenden Marktanteil bei Elektrolyseuren
- Produktion von Synthesegas für Grundstoffchemie

Herausforderungen

- Materialbeständigkeit bei hohen Temperaturen
- Schnelle Degradation der Elektroden & Elektrolyt
- Verbesserung des Stackdesigns für hohe Kapazität

[1] Schmidt et. al. (2017) "Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study"
[2] Smolinka et al. (2018) "Studie IndWeDe, Industrialisierung der Wasserelektrolyse in Deutschland"
[3] https://irees.de/wp-content/uploads/2020/11/IREES_Bewertung-der-Hochtemperaturelektrolyse.pdf

[4] IEA (2019) "The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities"
[5] DLR (2020) "Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende. Teil 1"

[6] Kearny Energy Transition Institute (2020) "Hydrogen applications and business models"
[7] Buttler et al. (2018) "Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review."

Agendachart

- 01 _____ Erzeugung
- 02 _____ **Transport**
- 03 _____ Speicherung
- 04 _____ Distribution
- 05 _____ Anwendung

Wasserstoffkompressor Transport

Erzeugung **Transport** Speicher Distribution Anwendung

Beschreibung

Der Ausgangsdruck der Elektrolyse bei der Wasserstoffproduktion liegt typischerweise bei 30 bar und muss für Transport oder Betankung auf bis zu 1.000 bar erhöht werden. Dafür können Membran-, Radial- und Kolbenkompressoren eingesetzt werden. Für hohe, dauerhafte Auslastung ist der Membrankompressor besonders geeignet. Für einen dynamischen Betrieb, zum Beispiel im Zusammenhang mit kleinen Absatzmengen, eignet sich der weniger empfindliche Kolbenkompressor. In Zukunft könnte eine Kombination aus Niederdruckkolben- und Hochdruckmembranstufen maximale Flexibilität bzgl. Durchflussmengen ermöglichen.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten*: 2.200 – 6.700 €/kW
*Werte für Kompressorstation in Pipelinesnetz [4]
- Wartungskosten pro Jahr: 2 – 3 % des CAPEX
- H₂-Kompression spezifisch: 0,18 – 0,72 €/kg_{H2}

Typische Hersteller

- Neumann Esser Group, Hycomp, Sauer Compressors, Hydrogen Tools, PDC Machines, Burckhardt Compression

Typische Leistungsdaten

- Effizienz: ca. 90 % bzgl. Energiegehalt des Wasserstoffes
- Energieverbrauch: 2–3 kWh/kg_{H2}
- Leistungsbereich für LKW-Tankstelle: 90 – 700 kW
(max. 550 bar Enddruck und 44 – 550 kg_{H2}/h Tankstellendurchsatz)

Typische Komponenten

- **Hubkolbenverdichter**
Kurbelwelle, Kolben-/Pleuelstange, Kolben, Druckzylinder, Saug- und Druckventile, Gasein- und -auslass, Zwischenstufenkühler, Hydrauliköl, Antriebseinheit
- **Membranverdichter**
Kurbelwelle, Schwungrad, Pleuelstange, Kreuzkopf, Hydraulikkolben, Hydraulikkopfträger, Hydraulikkopf (Platte), Gaskopf (Platte), Gaskopfträger, Ansaug- und Auslassrückschlagventile, Membransatz, hydraulisches Regelventil, Kurbelgehäuseentlüftung, Kolbenbolzen, Kurbelgehäuse, Schmiermittelpumpe

→ Medienführende Hohlkörper und Leitungen sollten aus H₂-beständigen, austenitischen Edelstählen (bsp. 1.4404, 1.4571) gefertigt werden

Wasserstoffkompressor NEA



Bild: Neumann & Esser Group

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- COSMHYC XL – Entwicklung eines innovativen Kompressors für große H₂-Tankstellen

Chancen

- Hoher Bedarf an H₂-Kompressoren durch H₂-Transport über Pipeline und H₂-Tankstellen
- Entwicklung langlebiger, leckagefreier Dichtungen

Herausforderungen

- Gasleckagen bei (sehr) hohen Drücken
- Membrandegradation bei geringer Auslastung
- H₂-Verunreinigung durch Schmiermittel

[1] Hydrogen Council (2020) "Path to hydrogen competitiveness A cost perspective"
[2] Surek (2017). Verdichter. In: Böge, A., Böge, W. (eds) Handbuch Maschinenbau.
[3] Hofer (NEA Group) [27.04.2022] "Dry-running piston compressors"

[4] Wang et al. (2020) "European Hydrogen Backbone"
[5] Tschöke (2014) "DUBBEL. Taschenbuch für den Maschinenbau"
[6] Burckhardt Compression [05.05.2022] <https://www.burckhardtcompression.com/de/solution/industriegase/h2-power-to-x-mobilitaet/h2-tankstellen/>

[7] PDC Machines [27.04.2022] <https://www.pdcmachines.com/diaphragm-compressors/>
[8] NEA Group [27.04.2022] <https://www.neuman-esser.de/compressors/wasserstoff-kompressoren/>
[9] efer [27.04.2022] <https://www.efer.kit.edu/cosmhyc-xl/>

Pipeline (neu) Transport



Beschreibung

Schon seit mehreren Jahrzehnten sind deutschlandweit etwa 420 km an Wasserstoffpipelines in Betrieb. Diese Pipelines verbinden große Wasserstoffverbraucher wie Erdölraffinerien und Chemiewerke. Um den Gefahren durch Wasserstoffversprödung entgegen zu wirken, sollte besondere Sorgfalt auf die Materialauswahl und das Wartungskonzept gelegt werden. Neben niedriglegierten Stählen bis X52, zeigen erste Untersuchungen, dass auch übliche hochlegierte Stähle bis X70 für den H₂-Transport geeignet sind. Damit ist eine größere Freiheit im Leitungsdesign und bessere Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 1,97 – 4,03 Mio. €/km
- Wartungskosten pro Jahr: ca. 5.000 €/km
- H₂-Transportkosten*: 0,21 – 1,65 €/kg bei 1.000 km

*kombiniert aus CAPEX & OPEX, Kosten variieren stark mit der Transportdistanz

Typische Hersteller

- Generalunternehmer: Bohlen & Doyen, Bilfinger
- Pipeline: Thyssenkrupp, Mannesmann

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: variabel ab ca. 10 t_{H2}/d
- Betriebsdruck: 10 – 100 bar

Typische Komponenten

- **Stahlrohre**
Insbesondere niedrig legierte Stähle bis X52 werden nach EIGA-Richtlinie empfohlen. Neuen Erkenntnissen nach sind auch höherfeste Stähle bis X70 für Wasserstoff geeignet.
- **Polymerrohre**
Für kleinere Durchmesser (z.B. im Verteilnetz) eignen sich hochdichte Kunststoffrohre (HDPE) oder moderne Metall-Kunststoff-Verbundrohre (MKV).
- **Anlagenperipherie**
wasserstofffeste Regel- und Steuerinstrumente, Kompressor(station), Dichtungen
- **Verlegung und Betrieb**
Rohrmolche, Detektionsgeräte, Materialprüfinstrumente, Pipeline-Integrity-Management-System (PIMS)

H₂-Transportrohr Thyssenkrupp



Bild: Thyssenkrupp

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Testpipeline auf dem Gelände des RWE Gaskraftwerkes Emden („GET H2 Nukleus“)
- 240 km Wasserstoffnetz von Air Liquide im Rhein-Ruhr-Gebiet

Chancen

- Entwicklung wasserstofffester Materialien wie bspw. faserverstärkte Polymere (FRP)

Herausforderungen

- Wasserstoffversprödung von Metallen
- Kosten, Gasleckagen, Verunreinigungen

[1] Hydrogen Council (2021) "Hydrogen Insights"

[2] IEA (2021) "Global Hydrogen Review 2021"

[3] U.S. Department of Energy (27.04.2022) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>

[4] Reuß et al. (2019) „Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur“

[5] Brändle et al. (2020) "Estimating Long-Term Global Supply Cost for Low-Carbon Hydrogen"

[6] Siemens Energy et al. (2020) „Wasserstoffinfrastruktur – tragende Säule der Energiewende“

[7] Weichenhain et al. (2021) "Hydrogen transportation. The key to unlocking the clean hydrogen economy"

[8] Mannesmann (27.04.2022) <https://www.mannesmann-innovations.com/de/innovationen/mannesmann-h2ready/>

[9] EIGA-Richtlinie IGC Doc 121/14

Pipeline (Umstellung von Erdgasleitungen) Transport



Beschreibung

Die Beimischung von Wasserstoff in bestehende Gasnetze wird derzeit mit Mischungen von bis zu 20 %-Vol. H₂ getestet. In der Regel bestimmt die Wasserstofftoleranz der Endanwendungen die Beimischgrenze. Bezüglich dem Transport von reinem Wasserstoff weisen bisherige Erkenntnisse darauf hin, dass die Umstellung der meisten vorhandenen Stahlpipelines möglich ist. Es bleibt im Einzelfall zu prüfen, ob die Betriebsparameter sowie Armaturen und Dichtungen anzupassen sind. Aufgrund möglicher Materialschädigung ist mit einem erhöhten Wartungsaufwand im vgl. zum Erdgastransport zu rechnen.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 0,54 – 1,08 Mio. €/km
- Wartungskosten pro Jahr: ca. 5.000 €/km
- H₂-Transportkosten*: 0,12 – 0,36 €/kg bei 1.000 km

*kombiniert aus CAPEX & OPEX, Kosten variieren stark mit der Transportdistanz

Typische Hersteller

- Generalunternehmer: Bohlen & Doyen, Bilfinger
- Sachverständige: Veenker Ingenieure

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: variabel ab ca. 10 t_{H2}/d
- Betriebsdruck: 10 – 100 bar

Typische Komponenten

- Bestehende Gaspipeline**
Für Erdgaspipelines typischer Stahl (X70) ist in der Regel auch für den Transport von Wasserstoff geeignet. Eine Anpassung der Betriebsparameter und des Wartungskonzeptes ist zu prüfen.
 - Anlagenperipherie**
Wasserstofffeste Regel- und Steuerinstrumente, Kompressor(station)
 - Auszutauschende / zu prüfende Komponenten**
Messeinrichtungen, Kompressoren, Armaturen, Regelventile, Dichtungen, Rohrmolche, Detektionsgeräte, Pipeline-Integrity-Management-System (PIMS)
- Bisher ist keine großskalige Umstellungen von Erdgasleitungen bekannt, Erfahrungen zur Ertüchtigung von „alten“ Komponenten sind ausstehend.

Pipeline (beispielhaft)



Bild: Orlando Schwarz

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Roadmap zur Umnutzung bestehender Erdgasinfrastrukturen („H₂-PIMS“)

Chancen

- Einsparung von 60 – 90 % der Kosten im vgl. zu neuen Pipelines
- Umrüstung frei werdender Erdgasleitungen

Herausforderungen

- Wasserstoffversprödung des Stahls
- Gasleckagen, Verunreinigungen

[1] Hydrogen Council (2021) "Hydrogen Insights"

[2] IEA (2021) "Global Hydrogen Review 2021"

[3] U.S. Department of Energy (27.04.2022) <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>

[4] Reuß et al. (2019) „Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur“

[5] Brändle et al. (2020) "Estimating Long-Term Global Supply Cost for Low-Carbon Hydrogen"

[6] Siemens Energy et al. (2020) „Wasserstoffinfrastruktur – tragende Säule der Energiewende“

[7] Weichenhain et al. (2021) "Hydrogen transportation. The key to unlocking the clean hydrogen economy"

[8] Gillissen et al. (2020) Umstellung von Erdgaspipelines auf Wasserstoff: eine wirtschaftliche Alternative für Deutschland?

Binnenschiff (gasförmiger Wasserstoff) Transport

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Obwohl zurzeit der Fokus im Aufbau von Transportstrukturen eher auf Pipelines und großen Seeschiffe für den interkontinentalen Transport liegen, könnten Binnenschiffe, ähnlich wie LKW auf der Straße, für den Transport von Wasserstoff genutzt werden. Alternativ zum Aufbau von speziellen Gastankerschiffen könnten containerisierte, modulare Speichersysteme auf existierenden Containerschiffen für die Binnenschifffahrt transportiert werden. Neben der Be- und Entladung über Gasterminals könnten die Speichercontainer auch durch bestehende Hafeninfrastruktur gelöscht werden.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: k. A.
- Wartung: k. A.
- H_2 -Transportkosten*: ca. 1,60 €/kg H_2
*auf einer Strecke zwischen niederländischem Offshorewindpark und Duisburg über Rotterdam

Typische Hersteller

- Es haben sich noch keine Hersteller angekündigt

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: 13,2 – 264 t H_2
bei Beladung von 12 – 240 40-ft-Container und 1.100 kg H_2 /Container
- Betriebsdruck Speichercontainer: 300 – 500 bar

Typische Komponenten

- **Container**
Mounting (Befestigung)
 - **Druckbehälter**
Typ II – IV Druckbehälter, Handventil, Entlüftungsventil, Hauptventil (Kugelhahn), Wasserstoffleitung Füll- und Entleeranschlüsse mit Fittings
 - **Sonstige Komponenten:**
Befüllung über Kompressor, Druckventile und –sensoren, Durchflussmengenmesser, Temperatursensor
- Bisher wurden keine Binnenschiffe speziell für den Transport von Wasserstoff konzeptioniert, Erfahrungen zur Ertüchtigung sind ausstehend. Seetaugliche Schiffe für den Gastransport sind allerdings in Planung.

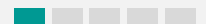
Binnencontainerschiff (beispielhaft)



Bild: Pexels

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte:

- RH2INE als übergeordnetes Projekt für die Implementierung von Wasserstoff in der Schifffahrt

Chancen

- Bei Speicherung in containerisierten Gasdruckspeichern kann bestehendes Hafenequipment und –abläufe genutzt werden
- Aufbau von Transportrouten per Schiff ist tendenziell schneller möglich als durch Pipelinebau

Herausforderungen

- Begrenzte Skalierungsmöglichkeiten

Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Transport

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC) sind chemische Verbindungen, welche reversibel hydriert und dehydriert werden können. Bei der Hydrierung wird Wasserstoff chemisch an die Trägerflüssigkeit gebunden, so dass dieser bei Atmosphärendruck transportiert werden kann. Am Zielort wird der Wasserstoff im Dehydrierungsprozess durch Wärmezufuhr freigesetzt. Anschließend wird das entladene LOHC zur mehrfachen Wiederverwendung zurück zur Wasserstoffquelle transportiert. Toluol, Dibenzyltoluol und Benzyltoluol sind derzeit die am häufigsten betrachteten Trägersubstanzen für LOHC Anwendungen.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 1,3 – 4,0 Mio. € bei 2,5 MW*
2,5 – 9,3 Mio. € bei 10 MW*
- Wartungskosten: 4 % des CAPEX
- H₂-Transportkosten: 1,0 – 3,1 €/kg_{H₂} bei 2,5 MW*
0,7 – 2,8 €/kg_{H₂} bei 10 MW*

*entspricht einem Durchsatz von 1.800 bzw. 7.200 kg_{H₂}/d

Typische Hersteller

- Hydrogenious, H₂Industries, Areva Group

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: 5,2 – 7,3 wt% bzw. 173,3 – 243,3 kWh/kg_{LOHC}
- Betriebsdruck: Atmosphärendruck

Typische Komponenten

- **Hydrierung**
Reaktor, Wärmeübertrager, Pumpe, Separator
- **Dehydrierung**
Reaktor, Wärmeübertrager, Pumpe, Separator, Druckwechseladsorber, Kompressor
- **Wärmeversorgung**
Brenner, Wärmeübertrager, Verdichter
- **Speicher**
LOHC-Speichertanks (geladen/entladen)
- **Wasserstoffaufreinigung**
- **Anlagenperipherie**
Rohrleitungen, Ventile, Mess- und Regelungseinrichtungen
- **LOHC**
- **Katalysator**

LOHC-ähnliche Flüssigkeit



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Direkte LOHC Nutzung in Brennstoffzellen (Hydrogenious & Schaeffler)

Chancen

- Weiternutzung bestehender (Öl/Diesel-)Infrastruktur
- Verlustfreier Transport (Langzeitspeicherung/Langstreckentransport)

Herausforderungen

- Energieintensive H₂-Rückgewinnung
- Rücktransport des Trägermaterials notwendig

[1] Hurskainen et al. (2020) „Techno-economic feasibility of road transport of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers“
[2] Niermann et al. (2019) „Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain“

[3] Rao et al. (2020) „Potential Liquid–Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Systems: A Review on Recent Progress“
[4] H2Mobility [11.05.2022] <https://h2.live/news/2256/>

[5] Weichenhain et al. (2021) “Hydrogen transportation. The key to unlocking the clean hydrogen economy”

Agendachart

- 01 _____ Erzeugung
- 02 _____ Transport
- 03 _____ Speicherung**
- 04 _____ Distribution
- 05 _____ Anwendung

Salzkavernen zur Wasserstoffspeicherung



Beschreibung

In unterirdischen Kavernen können große Mengen Wasserstoff über lange Zeiträume mit geringen Verlusten gespeichert werden. Dies ist vor allem zur Pufferung von Importen und großen Bedarfen sowie zum saisonalen Produktionsausgleich notwendig. Durch das große Volumen sind geringe Speicherkosten pro Kilogramm Wasserstoff zu realisieren. Der Bau von Kavernen ist an das Vorkommen natürlicher Hohlräume oder Salzstöcke gebunden und nicht überall möglich. In Zukunft könnten bisherige Erdgasspeicher umgewidmet werden. Im europäischen Vergleich hat Deutschland sehr viel Speicherpotenzial für Wasserstoff.

Technologie

Kosten

- Systemkosten: 38,8 – 81 Mio. € bei 500.000 m³ Volumen
- Wartungskosten pro Jahr: 2 % des CAPEX

Typische Hersteller

- Bau & Betrieb: EWE Gasspeicher, Trianel Gasspeicher Epe, Uniper Energy Storage, Storengy, Nafta-Speicher

Technik

- Effizienz inkl. Komprimierung: bis zu 98 %
- Druck: 58 – 175 bar
- Energiedichte H₂: ca. 7,5 kg/Nm³ bei 100 bar

Typische Komponenten

- unterirdisch**
Salzkaverne, einzementiertes Rohr
- oberirdisch**
Leitungen/Armaturen inkl. Ventilen, Kompressor, Wasserstofftrocknungsanlage, Qualitätsmessung
- Ausbau**
Bohr- und Grubentechnik, Solespülung

Kavernenspeicher Peckensen



Bild: Storengy

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Erforschung und Bewertung der Speicherung von H₂ in Salzkaverne bis 2022 („HyCavMobil“, Rüdersdorf)

Chancen

- Im europäischen Vergleich sind in Deutschland große Kavernenkapazitäten zur Wasserstoffspeicherung vorhanden

Herausforderungen

- Einfluss der Porosität der Kavernen noch unklar
- Träge Be- und Entladung der Kaverne

Wasserstoff-Druckspeicher Typ I (bis 350 bar)

Speicherung



Beschreibung

Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff muss dieser zur Speicherung komprimiert werden. Je höher der Druck, desto weniger Volumen und Platz ist für die Tanks notwendig. Wasserstoffdrucktanks werden je nach Druckniveau und Aufbau in die Typen I bis IV eingeteilt.

Typ I Speicher sind Niederdruckbehälter aus Metall und werden mit bis zu 350 bar betrieben. Aufgrund des niedrigen Drucks und des einfachen Aufbaus ist dieser Typ kostengünstig, benötigt aber relativ viel Baufläche und Materialeinsatz.

Technologie

Kosten

- 300 – 350 €/kg_{H₂} (CAPEX)

Typische Hersteller

- McPhy, Vako, Linde

Technik

- Effizienz inkl. Komprimierung: ca. 90 %
- Druck: < 350 bar
- Energiedichte H₂: ca. 22 kg/Nm³ bei 350 bar

Typische Komponenten

- Hohlkörper**
Stahl oder Aluminium
- Peripherie**
Kompressoren, Ventile, Sensorik

Druckspeicher Typ I



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Chancen

- Technologie durch Erfahrung mit Industriegasen ausgereift
- Pufferspeicher werden für viele H₂-Anwendungen und H₂-Erzeugung benötigt
- Es entsteht ein großer Bedarf an Speicherröhren durch die Nachfrage von LKW-Trailern

Herausforderungen

- Geringe volumetrische Speicherdichte, deshalb große Baufläche und hohes Gewicht

Wasserstoff-Druckspeicher Typ II-IV (bis 1000 bar)

Speicherung



Beschreibung

Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte wird Wasserstoff zur Speicherung stark komprimiert. Je höher der Druck, desto weniger Volumen bzw. Platz ist für die Tanks notwendig. Drucktanks werden je nach Druckniveau und Aufbau in die Typen I bis IV eingeteilt. Speicher vom Typ II – IV sind Hochdruckspeicher aus Kompositmaterialien, welche mit Drücken bis zu 1000 bar betrieben werden können. Aufgrund des hohen Drucks ist der Aufbau und entsprechend auch die Herstellung komplexer als bei Niederdruckspeichern.

Technologie

Kosten

- 800 – 1200 €/kg_{H₂} (CAPEX, bis 500 bar)
- 1000 – 2000 €/kg_{H₂} (CAPEX, bis 1000 bar)

Typische Hersteller

- NPROXX, McPhy, Wystrach

Technik

- Effizienz inkl. Komprimierung:
89 – 91 % (350 bar) / 85 – 88 % (700 bar)
- Zulässiger Druck: < 1000 bar (Typ III: 350 – 700 bar)
- Energiedichte H₂: ca. 37 kg/Nm³ bei 700 bar

Typische Komponenten

Hohlkörper

- Typ II: Metall oder Plastik mit bspw. Faserharz-Verstärkung
- Typ III: Aluminium mit bspw. Carbonfaser-Verstärkung
- Typ IV: Plastik mit bspw. Carbonfaser-Verstärkung

Peripherie

- Kompressoren, Ventile, Sensorik

Druckspeicher Typ IV in Container



Bild: NPROXX

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Werkstoffkonzepte mit Blick auf Multimaterialcharakter des Druckbehälters („H₂–HD“)
- Speichermodule für 4000 kg H₂ bei 590 bar für die Zugbetankungsanlage im Industriepark Höchst

Chancen

- Eine große Anzahl an Speichern wird als Tank für H₂-Fahrzeuge benötigt
- Massenproduktion ist noch nicht etabliert

Herausforderungen

- Kosten steigen mit zunehmendem Speicherdruck

[1] Kearny Energy Transition Institute (2020) "Hydrogen applications and business models"
[4] Görner K, Lindenberger D (2018): Band II Pfadanalysen: Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System. Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme [Hrsg.]

[2] Rivard et. al. (2019) "Hydrogen Storage for Mobility: A Review"
[5] Reus ME (2019): Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur. Forschungszentrum Jülich GmbH [Hrsg.]

[3] van Leeuwen (2018) "Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimization"
[6] infraserv (27.04.2022) – <https://www.infraserv.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit/wasserstoffversorgung-brennstoffzellenzuege/>

Agendachart

- 01 _____ Erzeugung
- 02 _____ Transport
- 03 _____ Speicherung
- 04 _____ Distribution**
- 05 _____ Anwendung

LKW-Trailer für gasförmigen Wasserstoff Distribution



Beschreibung

Gasförmiger Wasserstoff wird meist in mehreren einzelnen Druckbehältern auf einem 40-Fuß-Auflieger transportiert. Unterschieden wird im Allgemeinen zwischen Flaschen- und Röhrentrailer. Röhrentrailer verfügen über bis zu 9 Stahlbehälter (Typ I Speicher), welche insgesamt ca. 500 kg Wasserstoff bei 200 bis 250 bar speichern. Trailer mit einem Aufbau aus Hochdruckspeichern (Typ IV Speichern) können bis zu 1.100 kg Wasserstoff bei 500 – 700 bar Druck aufnehmen. Systeme für die Nutzung höherer Drücke und bis zu 1.500 kg Kapazität sind in Entwicklung.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 580.000 – 650.000 € (Trailer)
- Wartungskosten pro Jahr: ca. 2 % des CAPEX
- H₂-Transportkosten*: 0,62 – 0,79 €/kg_{H₂} bei 100 km

*kombiniert aus CAPEX & OPEX, Kosten variieren stark mit der Transportdistanz

Typische Hersteller

- Wystrach, NPROXX, Linde, Air Products, Air Liquide, Praxair

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: 500 – 1.100 kg_{H₂}/Trailer
- Betriebsdruck: 200 – 1.000 bar

Typische Komponenten

- **Trailer**
Mounting (Befestigung), ggf. Container
- **Druckbehälter**
Behälterventil (Handventil), Entlüftungsventil, Hauptventil (Kugelhahn), Wasserstoffleitung Füll- und Entleeranschlüsse mit Fittings
- **sonstige Komponenten**
Befüllung über Kompressor, Druckventile und –sensoren, Durchflussmengenmesser, Temperatursensor

Tube Trailer (beispielhaft)



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- 300 bar Wechseltrailersystem mit 7 Rotations-speichern für 2 Tankstellen („H2Nord Schleswig Holstein“)

Chancen

- Ausgereifte Technologie, Optimierung über Speicherdruck und Gewicht der Behälter möglich
- Speicherdrücke bis zu 1000 bar sind in Entwicklung

Herausforderungen

- Niedrige Transportmengen pro Fahrt
- Hohes Eigengewicht

[1] umlaut (2022) Experten-Netzwerk
[2] IEA (2021) "Global Hydrogen Review 2021"

[3] Reuß et al. (2019) „Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur“
[4] Hydrogen Council (2020) "Path to hydrogen competitiveness A cost perspective"

[5] Krieg (2012) „Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff“
[6] IEA (2019) "The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities"

LKW-Trailers für flüssigen Wasserstoff

Distribution



Beschreibung

Flüssiger Wasserstoff hat eine bis zu 8-fach höhere Energiedichte im Vergleich zu gasförmigem Wasserstoff, zudem wird bei der Verflüssigung eine hohe Reinheit erreicht. Für den Transport über lange Strecken und für Anwendungen mit hohem Reinheitsanspruch bietet sich deshalb der flüssige Zustand an.

Für die Verflüssigung wird Wasserstoff auf ca. -253 °C abgekühlt. Um den Energieeintrag zu minimieren, wird ein möglichst großer, vakuum-isolierter, Tank mit einem optimierten Verhältnis aus Volumen zu Oberfläche eingesetzt.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 860.000 – 945.000 € (Trailer)
- Wartungskosten pro Jahr: ~ 2 % CAPEX/a
- Transportkosten*: 0,71 – 2,1 €/kg_{H₂} bei 500 km

*kombiniert aus CAPEX & OPEX, Kosten variieren stark mit der Transportdistanz

Typische Hersteller

- Linde, Air Products, Air Liquide, Praxair, Chart

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: 4.000 – 4.400 kg_{H₂}/Trailer
- Temperatur Wasserstoff: ca. -253 °C
- Energiebedarf Verflüssigung: ca. 12 kWh/kg
- Effizienz Verflüssigung: 70–75%

bezogen auf den Energieinhalt des H₂

Typische Komponenten

- Verflüssigung**
Mehrstufige Wärmetauscher, Expansionsturbinen, dynamische Gaslager, vakuum-isolierte Kühlkammer, Joule-Thomson Ventil
- Trailer bzw. Speicher**
Doppelwandiger, vakuum-isolierter Cryotank (1–12 bar)
- Anwendung flüssiger H₂**
Cryo-Pumpe, Dispenser, ggf. Rückvergasung, Wärmetauscher

LH₂ Trailer (beispielhaft)



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Verflüssiger in Leuna für max.10 t H₂ pro Tag (Linde)

Chancen

- Größe Transportvolumen
- Nutzung von flüssig-H₂ für LKW und Flugzeuge
- Effizienzsteigerung durch neue Verfahren

Herausforderungen

- Kosten der Verflüssigung
- „Boil-Off“ (0,3 – 1 %/d, Verluste durch Evaporation)
- Bisher nur große zentrale Anlagen (3*in DE)

[1] Linde [06.05.2022] <https://www.lindehydrogen.com/technology/liquefaction>

[2] IEA (2021) "Global Hydrogen Review 2021"

[3] IEA (2019) "The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities"

[4] Reuß et al. (2019) „Techno-ökonomische Analyse alternativer Wasserstoffinfrastruktur“

[5] Hydrogen Council (2020) "Path to hydrogen competitiveness A cost perspective"

[6] Chart Inc. (2021) Data Sheet: Decker (2019) "Linde Hydrogen Distribution Technology"

[7] Krieg (2012) „Konzept und Kosten eines Pipelinesystems zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff“

[8] Weichenhain et al. (2021) "Hydrogen transportation. The key to unlocking the clean hydrogen economy"

[9] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy [06.05.2022] <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/liquid-hydrogen-delivery>

Wasserstoff-Tankstelle

Distribution



Beschreibung

Für die Betankung von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen werden spezielle Tankstellen benötigt. Diese unterscheiden sich stark von konventionellen Dieseltankstellen, da keine Flüssigkeit (Diesel/Benzin) sondern gasförmiger Wasserstoff vertankt wird. Um ausreichend Wasserstoff in die Fahrzeugtanks pressen zu können, wird mit sehr hohen Drücken gearbeitet. Für mobile Anwendungen haben sich 700 bar (PKW) und 350 bar (Nutzfahrzeuge) auf Fahrzeugseite durchgesetzt. Zur Erreichung des Speicherdrucks im Fahrzeug, ist bei der Betankung auf der Seite der Tankstelle ein höherer Druck (bis zu 1.000 bar) notwendig.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 3000 – 6.000 €/kg_{H₂}/Tag
- Wartungskosten: 0,3 – 0,4 €/kg_{H₂}

Typische Hersteller

- Sera, Linde, Maximator, Air Liquide, Nel Hydrogen

Typische Leistungsdaten

- Kapazität: ab 500 kg/Tag bis mehrere Tonnen/Tag
- Zieldruck: 350 – 700 bar
- Fahrzeugtank-Temperatur: –40 – 85 °C
- Angestrebte max. Durchflussrate: 300 g/s
(Betankungszeit: ca. 2,5 Minuten bei 42,5 kg_{H₂})

Typische Komponenten

- **Speicher**
Versorgungsspeicher (ca. 200 bar), Mittel- oder Hochdruckspeicher
- **Dispenser**
Füllkupplung, Schlauch, Abreißkupplung, Messsensorik, Display
- **Wärme- und Fluidmanagement:**
Kompressoren, Vorkühlung (bei 700 bar Betankung), ggf. Booster-Kompressor (bei Direktbetankung)
- **Anlagenperipherie:**
Handventile, Rückschlagventile, gesteuerte Ventile, Magnetventile, Drucktransmitter, Gas- und Temperatursensoren

Wasserstoff-Tankstelle



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Mind. 10 – 15 neue H₂-Tankstellen (2026) in Region Osthessen im Rahmen des „HYWHEELS“ Projektes
- 90 Tankstellen der H₂Mobility

Chancen

- (Weiter-)Entwicklung der beteiligten Komponenten für den Hochdruckbetrieb bis zu 1.000 bar
- Druck- und Kühltechnik bieten Innovationspotenzial

Herausforderungen

- Lange Betankungszeiten für große Fahrzeuge aufgrund aktuell geringer Durchflussraten

[1] umlaut (2021)
[2] Flauger et al. (2021) „Der Strompreis-Schock“

[3] Melaina (2013) „Hydrogen Station Cost Estimates“
[4] H2Mobility (2021) „Overview Hydrogen Refuelling For Heavy Duty Vehicles“

[5] Smolinka et al. (2013) „Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität“
[6] Stadt Fulda (25.04.2022) Abschlussworkshop „HYWHEELS“

Agendachart

- 01 _____ Erzeugung
- 02 _____ Transport
- 03 _____ Speicherung
- 04 _____ Distribution
- 05 _____ **Anwendung**

Brennstoffzellen–PKW Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Die Kraftentwicklung bei Wasserstofffahrzeuge (FCEV) wird über Elektromotoren realisiert. Im Bezug auf die Fahrzeugtechnik ähneln FCEV deshalb im Allgemeinen stark reinen Elektrofahrzeugen (BEV). Zusätzlich zu den typischen Komponenten der BEV ist ein H_2 -Tank und eine Brennstoffzelle verbaut, welche den Strom für die Elektromotoren erzeugt. Mit einem Speichervolumen von 5 – 6 kg H_2 sind Reichweiten von 500 – 700 km möglich. Deutschland hat mit knapp 100 H_2 -Tankstellen ein im internat. Vergleich gut ausgebautes Versorgungsnetz. Allerdings konnten sich FCEV im Vergleich zu BEV bisher weniger durchsetzen.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 64.000 – 77.000 €

Typische Hersteller

- Toyota, Hyundai, Honda, Mercedes–Benz

Typische Leistungsdaten

- Reichweite: 500 – 700 km
- Tankvolumen: 4–6 kg H_2
- Verbrauch: 0,8–1,5 kg H_2 /100 km
- Zelltemperatur: 60 – 85 °C
- Leistungsbereich: 100 – 147 kW
- Pufferbatterie: 1,2 – 2 kWh

Typische Komponenten

Antriebskomponenten

Brennstoffzellensystem, Batterie, Elektromotor

Brennstoffzellen–Stack

Membran–Elektroden–Anordnung (Katalysator, Elektroden, Elektrolyt, Gasdiffusionsschicht), Bipolarplatte, Dichtung, Endplatte

Peripherie

H_2 –Speicher (v. a. 700 bar), für BZ angepasster Kühlkreislauf, elektronische Steuerung

Hyundai Nexo



Bild: Hyundai Motor Group

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- BMW plant für 2025 Fahrzeuge mit Brennstoffzelle anzubieten (Bsp. BMW i Hydrogen NEXT)

Chancen

- Optimierung des Katalysators der Brennstoffzelle
- Die BZ–Fertigung könnte vom Hochlauf & Erfahrungen der Elektrolyseurproduktion profitieren

Herausforderungen

- Hohe Kosten durch geringe Produktionsvolumina und hohe Materialkosten (Katalysatoren v. a. Platin)
- Größeres Angebot an BEV–Modellen

[1] BMW [26.04.2022] <https://www.bmwgroup.com/de/news/allgemein/2019/bmw-i-hydrogen-next.html>
[2] Toyota [26.04.2022] <https://www.toyota.de/neuwagen/mirai>

[3] Hyundai [26.04.2022] <https://www.hyundai.de/modelle/nexo/>
[4] Schaal (2021) <https://www.electrive.net/2021/02/18/toyota-mirai-komfortable-limousine-mit-nur-einem-herausstechenden-merkmal/>

[5] Kieß et al. (2018) "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik"

Brennstoffzellen–LKW

Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Brennstoffzellen–LKW bieten hohe Reichweiten sowie eine schnelle Betankung und eignen sich damit für den Langstreckenverkehr oder für geographisch anspruchsvolle Gebiete. Bisher sind wenige Serienmodelle auf dem europäischen Markt verfügbar. Für 2023 sind jedoch mehrere Serienfahrzeuge angekündigt. Heute schon werden konventionelle LKW und Spezialfahrzeuge auf Wasserstoff umgerüstet und bieten damit eine Option für den schnellen Umstieg. Spezialfahrzeuge wie Abfallsammelfahrzeuge bieten Potenzial für Nischenanbieter.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 400.000 – 585.000 €

Typische Hersteller

- Hino (Toyota), Hyundai, Hyzon, Nikola, Daimler
- Umrüstung: CleanLogistics, Quantron, faun

Typische Leistungsdaten

- Reichweite: 400 – 1.500 km
- Tankvolumen: 23 – 100 kg_{H₂}
- Verbrauch: 7 – 8 kg_{H₂}/100 km
- Zelltemperatur: 60 – 85 °C
- Leistungsbereich BZ: 150 – 750 kW
- Pufferbatterie: 73 – 400 kWh

Typische Komponenten

- **Wasserstoffspezifische Antriebskomponenten**
Brennstoffzellensystem, Batterie, Elektromotor
- **Brennstoffzellen–Stack**
Membran–Elektroden–Anordnung (Katalysator, Elektroden, Elektrolyt, Gasdiffusionsschicht), Bipolarplatte, Dichtung, Endplatte
- **Peripherie**
H₂–Speicher

Hyundai Xcient Fuel Cell



Bild: Hyundai

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Förderprojekt „Gallia“ für Erforschung neuer Gasdiffusionsschichten im Heavy–Duty–Verkehr
- Der FCEV–Truck Nikola Tre ist für 2023 geplant

Chancen

- H₂ hat große Chancen sich im Schwerlastverkehr zu etablieren, da noch keine „Batterie–Trucks“ auf dem Markt sind
- Potenzial für Nischenanbieter bei Spezialfahrzeugen

Herausforderungen

- Fehlende Betankungsinfrastruktur
- Bisher wenige Serienfahrzeuge

[1] H2Mobility [05.05.2022] <https://h2.live/news/2374/>

[2] FAUN [26.05.2022] <https://www.faun.com/produkte/alternative-antriebe/bluepower/>

[3] umlaut (2022) Experten–Netzwerk

[4] Hyundai [26.04.2022] <https://hyundai-hm.com/unser-truck/>

[5] Kieß et al. (2018) "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik"

[6] Wittich et al. (2021) <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/betrugsvorwurfe-nikola-gruender-trevor-milton-badger-gm-steigt-aus-bosch-reduziert-brennstoffzellen-entwicklungs-chef-geht/>

Brennstoffzellen–Busse

Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Wasserstoff–Busse bieten hohe Reichweiten sowie schnelle Tankzeiten und werden deshalb primär in ländlichen und hügeligem Gelände eingesetzt. Mit einer Reichweite von 350 – 400 km lässt sich die Strecke eines Tagesumlaufs i.d.R. mit nur einer Tankfüllung bewältigen. Bis auf das Wasserstoffsystem ähneln die Komponenten der Wasserstoffbusse denen der rein elektrischen Busse. Die europäische Clean Vehicle Directive (CVD) gibt vor, dass öffentliche Flotten zunehmend strengere CO₂–Vorgaben einhalten müssen. Hierdurch besteht derzeit ein starkes Interesse an H₂–Bussen für den ÖPNV.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten: 600.000 – 650.000 €

Typische Hersteller

- Van Hool, Solaris, CaetanoBus und Safran

Typische Leistungsdaten

- Reichweite: 350 – 400 km
- Tankvolumen: 25 – 39 kg_{H₂}
- Verbrauch: 6 – 9 kg_{H₂}/100 km
- Zelltemperatur: 60 – 85 °C
- Leistungsbereich BZ: 30 – 80 kW
- Pufferbatterie: 30 – 40 kWh

Typische Komponenten

- **Wasserstoffspezifische Antriebskomponenten**
Brennstoffzellensystem, Batterie, Elektromotor
- **Brennstoffzellen–Stack**
Membran–Elektroden–Anordnung (Katalysator, Elektroden, Elektrolyt, Gasdiffusionsschicht), Bipolarplatte, Dichtung, Endplatte
- **Peripherie**
H₂–Speicher (v. a. 350 bar), (Wärmepumpen–) Heizsystem

Brennstoffzellen–Bus (beispielhaft)



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Entwicklung eines H₂–Stadtbusse durch ELO Mobility und das Fraunhofer IVI (NIP: „Go4City“)
- Bis 2033 möchte Ruhrbahn 200 H₂–Busse einsetzen

Chancen

- Verringerung des Katalysatoreinsatzes
- Optimierung der Effizienz durch an Busse angepasste Brennstoffzellen
- Starker Hochlauf im ÖPNV durch CVD**

Herausforderungen

- Hohe Kosten durch geringe Produktionsvolumina und hohe Materialkosten (Katalysatoren v. a. Platin)

[1] NOW GmbH [26.04.2022] <https://www.now-gmbh.de/aktuelles/pressemitteilungen/startschuss-fuer-das-innovations-projekt-go4city/>
[2] Werwitzke (2021) <https://www.electrive.net/2021/03/26/ruhrbahn-reine-h2-busflotten-fuer-essen-und-muehlheim/>

[3] Klell et al. (2018) "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik"

** Clean Vehicle Directive

Wasserstoff in der Industrie

Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Fossil gewonnener Wasserstoff wird heute schon in großem Maßstab in chemischen Prozessen eingesetzt. So wird Wasserstoff unter anderem für die Herstellung von Methanol und Ammoniak, aber auch in klassischen Raffinerieprozessen und der Stahlproduktion benötigt. Dieser „graue“ Wasserstoff kann i.d.R. direkt in den bestehenden Prozessen durch „grünen“ Wasserstoff ersetzt werden. Daneben können über die Ammoniak- und Methanolsynthese synthetische Kraftstoffe und speicherbare Energieträger produziert werden. Auch in der Bereitstellung von Prozesswärme kann H_2 zum Einsatz kommen.

Technologie

Typische Hersteller

- eMethanol: MAN Energy Solutions, Siemens
- Grundstoffchemie & Raffinerieprozesse: EDL Pörner Gruppe, CAC Chemietechnik
- Stahlproduktion: Midrex, Salzgitter, Voestalpine

Typische Leistungsdaten

- H_2 -Bedarf in DE bei vollständiger Umstellung der Raffinerieprozesse: 1,5 Mt/Jahr [5]
- H_2 -Bedarf für die Umstellung der Stahlproduktion in DE: 1,2–2 Mt/Jahr [6]
- Spezifischer H_2 -Bedarf für die Stahlproduktion: 51–57 kg_{H_2}/t_{DRI} [6]

Typische Komponenten

Grundstoffchemie

- **Methanol**
 CO_2 -Abscheider als Kohlenstoffquelle, Kompressor, Hochdruckreaktor & Katalysator, Produktabtrennung
- **Ammoniak**
Kompressor, Haber-Bosch-Reaktor, Kühler, Gasabscheider

Raffinerieprozesse

Hydroentschwefelung, Hydrocracking

Stahlproduktion

Direkt-Reduktionsanlage, Lichtbogenofen

Prozesswärme

H_2 -Brenner

Thyssenkrupp Stahlwerke



Bild: thyssenkrupp Steel Europe AG

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- European Energy eMethanol Produktion in Dänemark
- HYBRIT – Grüne Stahlproduktion in Schweden

Chancen

- Prozesse sind größtenteils bekannt, grüner H_2 kann direkt grauen H_2 ersetzen
- Leistungsfähige Infrastruktur für große Punktbedarfe kann synergetisch für weitere Anwendungen sein

Herausforderungen

- Tlw. große Investitionen in neue Anlagen notwendig
- Für einen wirtschaftlichen Einsatz von H_2 in der Industrie sind höhere CO_2 -Preise notwendig

[1] Siemens Energy
[2] Reichert (2020) Entwicklung eines Prozesses zur Methanolsynthese mit kontinuierlicher Produktabtrennung durch in-situ Sorption

[3] HySteel
[4] Vattenfall

[5] Dena – powertogas.info
[6] Albrecht et al. – Emissionsfreie Stahlerzeugung

Wasserstoff-Rückverstromung Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Die großskalige H₂-Rückverstromung wird voraussichtlich nicht zur Grundlastdeckung der Stromversorgung eingesetzt werden, sondern als Flexibilität zur Unterstützung der erneuerbaren Energien. Wasserstoffbetriebene Energieanlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) könnten jedoch regional Strom und Wärme bereitstellen und so die Anlageneffizienz maximieren. H₂-KWK Anlagen sind als Blockheizkraftwerk mit Verbrennungsmotor, Brennstoffzelle oder mit Gasturbine in Entwicklung. Gasturbinen von Siemens können bereits bis zu 75% mit H₂ betrieben werden, reine H₂-Turbinen sind für 2030 angekündigt.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten für ein Motorenkraftwerk bzw. GuD mit H₂-Gasturbine: ca. 1000–1200 €/kW

Typische Hersteller

- Turbinen: Siemens, Mitsubishi, Kawasaki
- BHKW: Deutz, Jenbacher Gasmotor, MTU

Typische Leistungsdaten

- Effizienz Turbine: bis zu 97% (KWK)
- Leistungsbereich Turbine: 5 – 600 MW
- Effizienz BHKW: ca. 90–95%
- Leistungsbereich BHKW: 0,2 – 10 MW

Typische Komponenten

Gasturbine

- **Gasturbine**
Turbinenschaufel, Brenner, Brennraum, Wärmeübertrager

Verbrennungsmotor

- **Gasmotor**
Auf H₂ abgestimmte Kolbenmaschinen, Druckventile, Gas-Einspritzsystem

Kraftwerkskomponenten

- **Gasspeicher**
- **Anlagenperipherie**
Zuleitungen, H₂-ready Gasregelstrecke, Gaswarnanlagen, Abgasnachbehandlung

H₂-Ready Gasmotor, Jenbacher



Bild: Copyright @ INNIO

Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- H₂-Motor (Deutz) im Heizkraftwerk Köln-Niehl

Chancen

- Flexible Back-Up Kraftwerke sind im Zuge der Energiewende weiterhin notwendig
- H₂-ready Gasmotoren können heute mit Erdgas und in Zukunft mit Wasserstoff betrieben werden

Herausforderungen

- Stoffeigenschaften und Flammentemperatur des H₂ stellen besondere Anforderungen an die Materialien
- Hohe NO_x-Werte im Abgas

Wasserstoff–(ready)–Brennwertthermen Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Ein H₂–ready Heizkessel ist ähnlich wie ein konventioneller Gas–Brennwertkessel aufgebaut. Die Heizleistung und weitere für den Anwender relevante Eigenschaften bleiben unverändert. Die Brennerkomponenten und die Gasregelung müssen jedoch für Wasserstoff als Brennstoff angepasst werden. Für 2025 sind „H₂ Ready“ ausgezeichnete Heizanlagen angekündigt, welche sowohl mit reinem Erdgas als auch mit einem Wasserstoffanteil zwischen 0 bis 20 %–Vol. funktionieren.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten*: 780 – 870 €/kW
- Wartungskosten pro Jahr*: 3 % des CAPEX

*orientiert an Gas–Brennwertkessel

Typische Hersteller

- Viessmann, Buderus, Wolf, Vaillant, Bosch

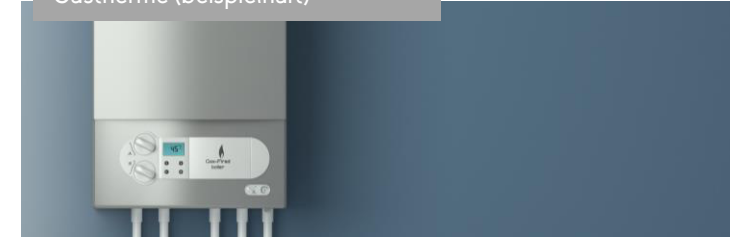
Typische Leistungsdaten

- Effizienz: 89 – 99 % (LHV)
- Rücklauftemperatur: 30 – 60 °C
- Leistungsbereich: 2 – 50 kW_{th}

Typische Komponenten

- **Anlage**
Brenner, Brennraum, Wärmeübertrager, Abgasrohr
- **Anlagenperipherie**
Umwälzpumpe, Mess– und Regelungstechnik spez. für H₂

Gastherme (beispielhaft)



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- Viessmann Prototyp im Reallabor SmartQuart in Kaisersesch

Chancen

- Potenzielle Umrüstung alter Gas–Brennwertkessel durch Austausch des Brenners und Sensoren

Herausforderungen

- Stoffeigenschaften und Flammentemperatur des H₂ stellen besondere Anforderungen (bspw. Dichtigkeit) an die Materialien
- Verfügbarkeit einer H₂–Infrastruktur

[1] Frahm [25.04.2022] <https://www.heizungsfinder.de/gasheizung/gaskessel/h2-ready>
[2] Buderus [25.04.2022] <https://www.buderus.de/de/gastherme/gasbrennwertkessel>

[3] Bosch [25.04.2022]: Broschüre Gas–Brennwertgeräte
[4] Rubinius et al. (2020) "Wege für die Energiewende"

[5] Worcester/Bosch [25.04.2022] <https://www.worcester-bosch.co.uk/professional/news/worcester-bosch-scoops-another-award-for-hydrogen-prototype-boiler>
[6] C.A.R.M.E.N.e. V. (2019) "Heizungsmodernisierung – ein Kostenvergleich"

Brennstoffzellenheizung (KWK)

Anwendung

Erzeugung

Transport

Speicher

Distribution

Anwendung

Beschreibung

Die lokal installierte Brennstoffzelle wandelt in einer elektrochemischen Reaktion („kalte Verbrennung“) Wasserstoff mithilfe von Sauerstoff aus der Luft in Wasser um und gibt dabei Strom und Wärme ab. Eine Brennstoffzellenheizung ist damit ein vollwertiges BHKW. Es wird zwischen Nieder- und Hochtemperaturbrennstoffzellen unterschieden, wobei die Protonen-Austausch-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC, Niedertemperatur) und die Festoxidbrennstoffzelle (SOEC, Hochtemperatur) heute am weitesten verbreitet sind.

Technologie

Kosten

- Spezifische Systemkosten*: 2.950 – 3.200 €/kW
*aktuell starke Förderung möglich
- Wartungskosten pro Jahr: 1 – 2 % des CAPEX

Typische Hersteller

- Viessmann, Buderus, Solidpower, SenerTec, Freudenberg

Typische Leistungsdaten

- Effizienz: 88 – 95 % (kombiniert)
- Rücklauftemperatur: 6 – 50 °C
- Leistungsbereich: 2 – 50 kW_{th}

Typische Komponenten

- **Systemsteuerung / Energiemanagement**
- **Brennstoffzellen-Stack**
Membran-Elektroden-Anordnung (Katalysator, Elektroden, Elektrolyt, Gasdiffusionsschicht), Bipolarplatte, Dichtung, Endplatte
- **Anlagenperipherie**
H₂-Speicher, Leitungen, Gaszähler, Trinkwasser-Speicher, Hydraulik

BZ-Heizung (beispielhaft)



Trends und Reife – Markt

Marktreife



Typische Projekte

- 36 kW Brennstoffzellenheizung für Quartier mit 1.400 Wohneinheiten in Bochum

Chancen

- Optimierung der Struktur der Katalysatorschicht für reduzierten Katalysatorbedarf
- Brennstoffzellenheizungen funktionieren z.T. auch heute schon mit Erdgas

Herausforderungen

- Hohe Kosten durch Platinanteil am Katalysator
- Verfügbarkeit einer H₂-Infrastruktur

[1] Vonovia [11.05.2022] <https://presse.vonovia.de/de-de/aktuelles/200123-innovationsquartier-bochum-weilmar>
[2] Viessmann Climate Solutions SE [25.04.2022]: Produktdatenblatt "Datenblatt Vitocalor PT2". Abgestimmt mit weiteren Quellen.

[3] Energy Transition Consulting
[4] Klell et al. (2018) "Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik"

[5] Dr. Zamel et al. (2019): Abschlussbericht des Projektes DEKADE (Fraunhofer ISE)
[6] Dr. Unruh et al. (2021) "Wasserstoff – Chancen für die Wirtschaft in NRW"



umlaut AG
Am Kraftversorgungsturm 3
52070 Aachen
Germany

Autoren: Felix Schimek, Till Gerstein, Patrick Wienert, Martin Robinius

www.umlaut.com
beyond@umlaut.com
eröffentlicht am 01.10.2022