HELMHOLTZ Energy

HELMHOLTZ Erde und Umwelt

Technologie-Roadmap Wasserstoff der Hightech Agenda Deutschland (HTAD)

Zentrale Beiträge und Empfehlungen aus dem Partnerdialog-Webinar

Webinar am 23.9.2026

Wasserstoffforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft

Die Helmholtz-Gemeinschaft erforscht Grundlagen und komplexe Systeme, um Lösungen für die großen Herausforderungen unserer Zeit zu entwickeln. Sie widmet sich drängenden Fragestellungen aus Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft und bündelt ihre langfristig angelegte Spitzenforschung in sechs strategischen Forschungsbereichen: Energie, Erde und Umwelt, Gesundheit, Information, Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr sowie Materie.

Mit mehr als 48.000 Beschäftigten bilden die 18 Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft die größte Wissenschaftsorganisation Deutschlands. Zur Bearbeitung zukunftsweisenden Forschungsfragen, nutzen die Wissenschaftler:innen einzigartige Forschungsinfrastrukturen und profitieren von modernen Forschungs- und Managementstrukturen.

Der **Forschungsbereich Energie** (Helmholtz Energy) schafft mit Forschung von den Grundlagen bis zur Anwendung die wissenschaftlichen Voraussetzungen für eine klimaneutrale Energieversorgung, die wirtschaftlich tragfähig und gesellschaftlich akzeptiert ist. Seine Mission ist es, die wissenschaftlichen Grundlagen für eine resiliente, sichere, nachhaltige und bezahlbare Energieversorgung zu schaffen. Dazu erforscht und gestaltet dieser Forschungsbereich zukünftige Energiesysteme durch die Entwicklung und Integration von innovativen Materialien, Schlüsseltechnologien, und systemischen Lösungen. Dem Forschungsbereich Energie gehören fünf Helmholtz-Zentren an: das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich (FZJ), das Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB), das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) sowie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Der **Forschungsbereich Erde und Umwelt** (Helmholtz Erde und Umwelt) erforscht die natürlichen Lebensgrundlagen der Menschheit mit einem systemischen Ansatz, von der Landoberfläche über die Ozeane bis hin zu den Polarregionen. Ziel ist es, ein fundiertes Verständnis des Erdsystems zu schaffen und daraus wissenschaftlich fundierte Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Entwicklung abzuleiten. Dem Forschungsbereich Erde und Umwelt gehören sieben Helmholtz-Zentren an: das Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), das Forschungszentrum Jülich (FZJ), das GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel, das GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung, das Helmholtz-Zentrum Hereon, das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) sowie das Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Im Rahmen des Partnerdialogs zur Erstellung der Wasserstoff-Roadmap der High-Tech Agenda Deutschland (HTAD) brachten elf Wissenschaftler:innen aus sieben Helmholtz-Zentren ihre Expertise zu den zentralen Forschungs- und Innovationsbedarfen der Wasserstoffwirtschaft ein. **Die Beiträge verdeutlichen die Breite der wissenschaftlichen Kompetenzen der Helmholtz-Gemeinschaft entlang der gesamten Wasserstoff-Wertschöpfungskette und unterstreichen die Bedeutung von Forschung und Innovation für einen nachhaltigen, sicheren und wettbewerbsfähigen Wasserstoffhochlauf**. Die in diesem Papier zusammengefassten Impulse und Empfehlungen sollen einen wissenschaftlich fundierten Beitrag zur Ausgestaltung der Wasserstoff-Roadmap leisten.

Executive Summary

Der Aufbau einer wettbewerbsfähigen und resilienten Wasserstoffwirtschaft erfordert erhebliche Fortschritte entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Erzeugung über die Speicherung, den Transport und die Verteilung bis hin zur industriellen Nutzung. Die Beiträge der Helmholtz-Gemeinschaft zeigen, dass Forschung und Innovation eine Schlüsselrolle dabei spielen, die Kosten von Wasserstofftechnologien zu senken, ihre Effizienz und Lebensdauer zu erhöhen, und ihre sichere und nachhaltige Integration in das Energiesystem zu ermöglichen.

Zentrale Ansatzpunkte sind die Entwicklung leistungsfähiger und ressourcenschonender Materialien für Elektrolyseure und Brennstoffzellen, die Nutzung von KI, Simulation und Hochleistungsrechnen zur Beschleunigung von Innovationen sowie ein besseres Verständnis von Alterungs- und Degradationsprozessen. Gleichzeitig sind neue Ansätze zur Wasserstoffspeicherung, zum Infrastrukturaufbau und zur Nutzung chemischer Wasserstoffträger notwendig, um Versorgungssicherheit und Flexibilität im zukünftigen Energiesystem zu gewährleisten. Wasserstoff und wasserstoffbasierte Energieträger sind außerdem wichtige Grundstoffe für die Transformation der chemischen Industrie und weiterer energieintensiver Industriezweige. Sie bieten zudem sie erhebliche Potenziale für neue industrielle Wertschöpfung und die Entwicklung klimaneutraler Produktionsprozesse.

Forschung und Innovation müssen darüber hinaus die Systemintegration von Wasserstoff entlang der gesamten Wertschöpfungskette adressieren. Dazu gehören dynamisch betriebene Power-to-X-Prozessketten, sektorübergreifende Anwendungen und disruptive Technologien, die eine bessere Nutzung erneuerbarer Energien ermöglichen und die Sektorkopplung stärken. Diese Technologien müssen pilotiert und im industriellen Umfeld demonstriert werden, um das technische Risiko der Skalierung zu minimieren. Ebenso notwendig sind wissenschaftlich fundierte Sicherheitskonzepte, Standardisierung und geeignete regulatorische Rahmenbedingungen, um den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien zu unterstützen, Investitionssicherheit zu schaffen und gesellschaftliche Akzeptanz zu fördern.

Vor diesem Hintergrund ergeben sich folgende strategische Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Wasserstoff-Roadmap:

1. Forschung zu **innovativen Materialien** für eine nachhaltige, ressourcenschonende und kosteneffiziente **Wasserstofferzeugung** gezielt stärken.
2. Technologische Grundlagen für **resiliente Speicher-, Transport- und Importinfrastrukturen** durch Forschung, Innovation, und Demonstration absichern.
3. **Systemintegration und Power-to-X-Anwendungen** entlang der gesamten Wertschöpfungskette stärken.
4. **Sicherheits-, Standardisierungs- und Nachhaltigkeitsforschung** als Voraussetzung des Markthochlaufs ausbauen und den Transfer in **Normen** und **Standards** fördern.
5. **Technologietransfer** und **Skalierung** auf industrierelevante Maßstäbe durch gemeinsamen **Demonstrationsvorhaben** beschleunigen.

Die Umsetzung dieser Schwerpunkte wird dazu beitragen, die technologische Souveränität Deutschlands und Europas zu stärken, die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Industrie auszubauen und die Wasserstoffwirtschaft als tragende Säule einer klimaneutralen Energieversorgung zu etablieren.

Beiträge aus dem Partnerdialog-Webinar

Materialien, Simulation und Daten für leistungsfähige Wasserstofftechnologien. Thomas D. Kühne, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

Für den nachhaltigen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft sind effiziente, langlebige und ressourcenschonende Materialien und Prozesse entscheidend. Ein zentraler Forschungsbedarf besteht darin, die Leistungsfähigkeit und Degradation von Wasserstofftechnologien unter realistischen und dynamischen Betriebsbedingungen zuverlässig vorherzusagen. Nur so können Materialien, Komponenten und Prozesse gezielt optimiert und Entwicklungskosten reduziert werden.

Die Helmholtz-Gemeinschaft vereint hierfür Kompetenzen in Material- und Energieforschung, Experimenten, physikbasierter Modellierung, Scientific AI, Hochleistungsrechnen (HPC) und Systemanalyse. Im Fokus stehen die Vorhersage von Aktivität und Stabilität von Katalysatoren und Grenzflächen bei reduziertem Einsatz kritischer Rohstoffe, die Untersuchung von Degradationsmechanismen unter Lastwechseln sowie die Identifikation langlebiger Betriebsfenster. Gleichzeitig müssen Materialeigenschaften und Transportprozesse zuverlässig auf technische Zellen, Stacks und industrielle Anlagen übertragen werden.

Die **Verknüpfung von Experimenten**, **physikbasierten Modellen**, **Scientific AI** und **Hochleistungsrechnen** ermöglicht effiziente, nachvollziehbare und belastbare Vorhersagen über unterschiedliche Skalen hinweg. Forschung und Innovation sollten daher gezielt gefördert werden, um gemeinsame Referenzdaten, experimentell validierte Modelle, standardisierte Benchmarks sowie offene Software- und Dateninfrastrukturen aufzubauen und weiterzuentwickeln. Ziel sind messbare Fortschritte bei Effizienz, Lebensdauer, Ressourceneinsatz und Skalierbarkeit zukünftiger Wasserstofftechnologien.

Materialinnovationen zur Senkung der Wasserstoffkosten. Lisa Suntrup und Roel von de Krol, Helmholtz-Zentrum Berlin.

Für eine wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft müssen die Kosten der Wasserstofferzeugung deutlich gesenkt und gleichzeitig neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Materialinnovationen spielen dabei eine Schlüsselrolle entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von der Elektrolyse über Wasserstoffderivate wie Ammoniak, Methanol oder Harnstoff bis hin zur Herstellung hochwertiger Chemikalien und Kraftstoffe.

Auf der Investitionskosten (CAPEX)-Seite sind insbesondere Skaleneffekte in der Massenproduktion sowie leistungsfähige und kostengünstige Materialien entscheidend. Fortschritte bei Katalysatoren, Membranen und Elektrolyten für PEM-, AEM- und SOEC-Technologien können die Investitionskosten deutlich senken. Einen wichtigen Hebel bietet die KI-gestützte Materialentwicklung, die die Entwicklung edelmetallfreier Katalysatoren und PFAS-freier Membranen beschleunigen kann. Insbesondere die AEM-Elektrolyse besitzt großes Potenzial, da sie hohe Leistungsdichten mit kostengünstigen Materialien verbindet.

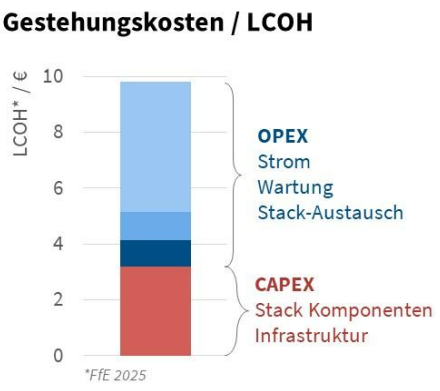


Abbildung 1: Anteile von CAPEX und OPEX an den H_2-Gestehungskosten.

Auf der Betriebskosten (OPEX)-Seite stehen die Stromkosten sowie die Lebensdauer der Elektrolyseure im Mittelpunkt. Ein besseres Verständnis von Materialdegradation unter realen

Betriebsbedingungen ermöglicht Strategien zur Vermeidung oder Regeneration von Alterungsprozessen und verlängert die Standzeiten von Stacks. Gleichzeitig eröffnet der dynamische Betrieb mit erneuerbarem Strom zusätzliche Einsparpotenziale. Die Verlängerung der Stack-Lebensdauer reduziert wiederkehrende Kosten, senkt den Bedarf an kritischen Materialien und verbessert die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten.

Forschung und Innovation sollten daher gezielt auf **Materialinnovationen**, **langlebige Elektrolysesysteme** und **KI-gestützte Materialentwicklung** ausgerichtet werden, um die Wasserstoffgestehungskosten nachhaltig zu senken und die industrielle Skalierung zu ermöglichen. Dadurch werden die Wettbewerbsfähigkeit der Wasserstofferzeugung gestärkt, die Abhängigkeiten von kritischen Rohstoffen reduziert und der Markthochlauf einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft beschleunigt.

Effizienz und Lebensdauer von Elektrolyseuren.
Kerstin Eckert, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.

Blasenströmungen sind ein zentrales Element aller Niedertemperatur-Elektrolyseure und Gasseparatoren. Sie beeinflussen maßgeblich die Energieeffizienz, Leistungsfähigkeit und Lebensdauer von Elektrolyseursystemen. Gasblasen verursachen zusätzliche Überspannungen, beeinträchtigen Stoff- und Wärmetransportprozesse und können lokale Hotspots sowie Degradationsprozesse an den Elektroden begünstigen. Die dadurch entstehenden Effizienzverluste werden auf bis zu 25 % geschätzt.

Ein vertieftes Verständnis der Blasendynamik und ihrer Wechselwirkungen mit Strömung, Wärmehaushalt und Alterungsprozessen, durch die Entwicklung innovativer in-situ Prozessmesstechnik, skalenübergreifender Simulationen und davon abgeleiteter KI-gestützer Prozessmodelle, eröffnet erhebliche Potenziale zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung von Elektrolyseuren. Die Optimierung von Blasenströmungen kann sowohl die OPEX als auch die CAPEX der Wasserstoffproduktion reduzieren und gleichzeitig die Lebensdauer der Systeme erhöhen.

Die Wasserstoff-Roadmap sollte die Erforschung und Optimierung von **Mehrphasenströmungen in Elektrolyseuren** auf Basis neuer in-situ Messtechniken und KI-unterstützter Mehrskalensimulationen als strategischen Forschungsschwerpunkt stärken. Fortschritte in diesem Bereich können die Effizienz steigern, die Lebensdauer von Elektrolysesystemen verlängern und deren Kosten senken. Damit leistet diese Forschung einen wichtigen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit und Skalierbarkeit der

Wasserstofferzeugung und Brennstoffzellentechnologien.
Andreas Friedrich und Pawel Gazdizcki, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Die Weiterentwicklung von Brennstoffzellen- und Elektrolysetechnologien erfordert leistungsfähige, langlebige und nachhaltige Materialien sowie robuste Komponenten. Entscheidend ist dabei, die Kosten zu senken, den Einsatz kritischer Materialien zu reduzieren und gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit europäischer Wasserstofftechnologien zu stärken.

Im Fokus stehen Fortschritte entlang der gesamten Wertschöpfungskette: von protonenleitenden Keramiken für die Elektrolyse über PFAS-freie Materialien für PEM-Brennstoffzellen und PEM-Elektrolyse bis hin zur Weiterentwicklung von AEM-Elektrolyseuren. Besondere Bedeutung haben dabei die Skalierung vom Labor in industrielle Anwendungen, die Erhöhung der Faraday-Effizienz, die Entwicklung langlebiger Membran-

Elektroden-Einheiten sowie die Demonstration neuer Stack-Konzepte für Schwerlast-, Luftfahrt- und weitere anspruchsvolle Anwendungen.

Innovative Materialien, höhere Lebensdauern sowie **nachhaltige Herstellungs- und Recyclingkonzepte** sind Voraussetzungen für leistungsfähige und wirtschaftliche Brennstoffzellen- und Elektrolysetechnologien. Forschung und Innovation in diesen Bereichen sollten daher gezielt gestärkt werden, um die Marktreife neuer Technologien zu beschleunigen, die europäische Wasserstoffindustrie zu stärken und die kostengünstige Bereitstellung von grünem Wasserstoff zu ermöglichen.

Unterirdische Wasserstoff-Speicherung und natürliche Wasserstoffvorkommen.

Cornelia Schmidt-Hattenberger, Helmholtz-Zentrum für Geoforschung.

Für den Aufbau einer resilienten Wasserstoffwirtschaft sind großskalige Speicherlösungen (GWh-TWh) von strategischer Bedeutung. Es besteht ein wesentlicher Forschungsbedarf zur Wasserstoffspeicherung in Porenspeichern, als ergänzende Option zu den bisher untersuchten Salzkavernen. Demonstrationsvorhaben sind wichtig, um ein fundiertes Prozessverständnis der H_2-Porenspeicherung zu gewinnen und zu prüfen, ob sich das vorhandene unterirdische Speicherpotenzial technisch und wirtschaftlich für eine sichere und resiliente Energieversorgung nutzen lässt.

Ein zentrales Querschnittsthema ist die Untersuchung von natürlichem Wasserstoff hinsichtlich seiner geologischen Verfügbarkeit, technischen Gewinnbarkeit und wirtschaftlichen Nutzbarkeit. Eine wissenschaftlich fundierte Bewertung beider Themen ist entscheidend, um ihr künftiges Potenzial für eine sichere und resiliente Wasserstoffversorgung realistisch einzuordnen

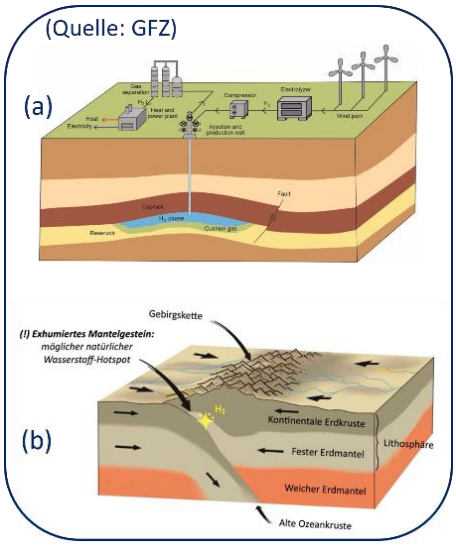


Abbildung 2: (a) Erschließung und Nutzung von H_2-Porenspeichern, (b) Neue Erkenntnisse über natürliche Wasserstoffvorkommen.

Die technologische Entwicklung **wasserstoffkompatibler Anlagen- und Speicherkomponenten, zuverlässiger Monitoringkonzepte** sowie von **Verfahren zur Aufbereitung des rückgeförderten Wasserstoffs** sollte gezielt gestärkt werden. Diese Technologien sind entscheidende Voraussetzungen für die sichere und wirtschaftliche Erschließung neuer geologischer Speicheroptionen. Langfristige Förderprogramme mit der Möglichkeit für Demonstrationsanlagen beschleunigen den Transfer in die großtechnische Anwendung. Für die Abschätzung natürlicher Wasserstoffvorkommen ist ein vertieftes Verständnis der geologischen und geochemischen H_2-Bildungsprozesse erforderlich.

Unterirdische Wasserstoff-Speicherung und Distribution über das Wasserstoff-Kernnetz.

Alexander Dyck und Hendrick Langnickel, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

Der erfolgreiche Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft erfordert nicht nur die Erzeugung von Wasserstoff, sondern auch leistungsfähige Speicher-, Transport- und Verteilinfrastrukturen. Für eine sichere und wirtschaftliche Versorgung müssen die einzelnen Elemente der

Wertschöpfungskette systemisch betrachtet und aufeinander abgestimmt werden. Dabei spielen unterirdische Speicher, das Wasserstoff-Kernnetz sowie die Qualitätssicherung entlang der gesamten Infrastruktur eine zentrale Rolle.

Die Analyse von Wasserstoffspeicherung in Kavernen, Wasserstofftransport im Kernnetz sowie Fragestellungen der Gasqualität und Verdichtung sind wichtige Beiträge für industrielle und öffentliche Stakeholder beim Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft. Mithilfe realitätsnaher Simulationsumgebungen können Betriebsstrategien, Infrastrukturkonzepte und regulatorische Rahmenbedingungen bewertet sowie die Wechselwirkungen zwischen Speichern, Netzen und Erzeugungsanlagen untersucht werden. Ergänzend liefern technoökonomische Analysen wichtige Grundlagen für die Bewertung zukünftiger Markt- und Ausbauszenarien.

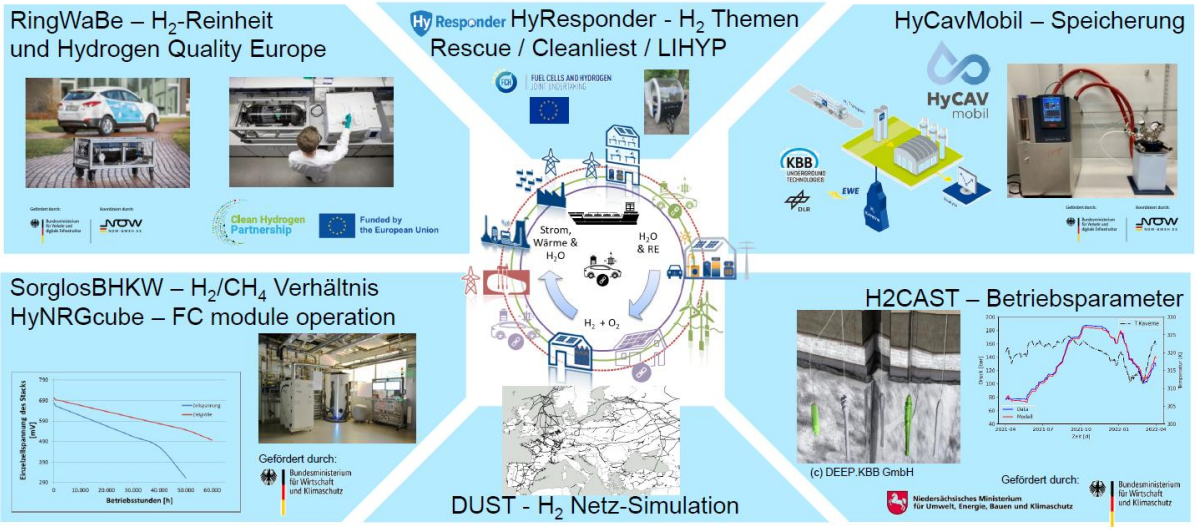


Abbildung 3: Wasserstoff als Grundbaustein der Sektorenkopplung (Aktivitäten zum Thema H_2-Systemen in Projekten vom Institut für Vernetzte Energiesystem des DLR)

Die **Validierung von Speicher- und Netzinfrastrukturen**, ein vertieftes **Verständnis von Qualitäts- und Verlusteffekten** entlang der Wasserstoffwertschöpfungskette sowie die Weiterentwicklung **regulatorischer Rahmenbedingungen** sind zentrale Voraussetzungen für einen sicheren und wirtschaftlichen Wasserstoffmarkt. Forschung und Innovation in diesen Bereichen sollten daher gezielt gestärkt werden. Die **enge Zusammenarbeit von Forschung, Industrie, Netzbetreibern und Politik** ist dabei entscheidend, um Forschungsergebnisse in marktfähige Lösungen zu überführen. Entsprechende Kooperations- und Demonstrationsformate sollten unterstützt werden.

Chemische Wasserstoffspeicher und Derivate.
Andreas Peschel, Forschungszentrum Jülich.

Chemische Wasserstoffspeicher wie Ammoniak, Methanol, DME oder Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) können eine zentrale Rolle beim Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft übernehmen. Sie ermöglichen den Transport und die Speicherung von nachhaltig erzeugtem Wasserstoff über große Distanzen sowie über längere Zeiträume und helfen damit, die räumliche und zeitliche Diskrepanz zwischen Erzeugung und Nutzung erneuerbarer Energien zu überbrücken.

Darüber hinaus können chemische Wasserstoffträgern wie Ammoniak, Methanol und DME langfristig eine wichtige Rolle für die großskalige und saisonale Speicherung erneuerbarer Energien übernehmen und damit zur Versorgungssicherheit sowie zur Flexibilisierung des

Energiesystems beitragen. Aufgrund ihres derzeit teilweise noch niedrigen Technologiereifegrades besteht weiterhin erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Für den breiten industriellen Einsatz ist die Entwicklung einer integrierten Wertschöpfungskette erforderlich, die die Wasserstofferzeugung, die Umwandlung in chemische Energieträger, den Transport, die Speicherung und die Nutzung umfasst. Besondere Bedeutung kommt dabei der lastflexiblen Produktion chemischer Wasserstoffträger zu, um erneuerbare Stromüberschüsse effizient zu nutzen und die Wirtschaftlichkeit der Prozesse zu verbessern. Ebenso entscheidend ist die Systemintegration, damit Wasserstoffderivate möglichst direkt genutzt und energieintensive Rückumwandlungsschritte vermieden werden können.

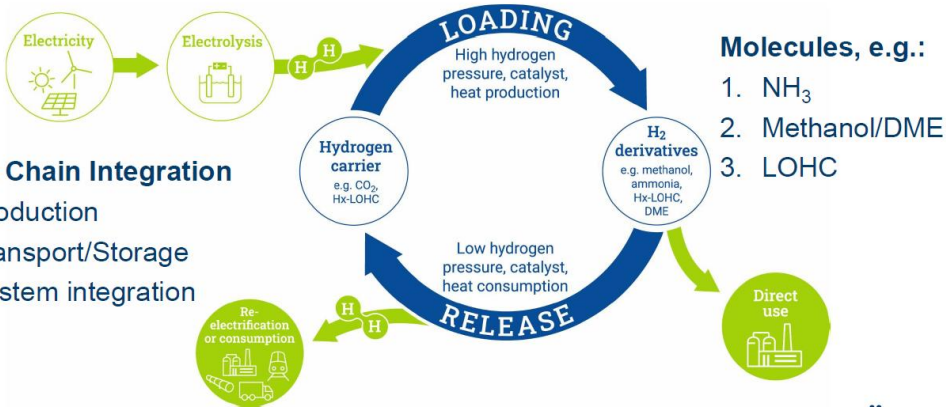


Abbildung 4: Chemische Wasserstoffträger zur Überbrückung von räumlichen, zeitlichen und sektoralen Diskrepanzen bei der Erzeugung und Versorgung mit erneuerbaren Energien.

Die Wasserstoff-Roadmap sollte neben technologischen Fortschritten den Aufbau geeigneter **regulatorischer Rahmenbedingungen** sowie **starker Konsortien** entlang der gesamten Wertschöpfungskette gezielt unterstützen. Diese sind wesentliche Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung chemischer Wasserstoffspeicher. Darüber hinaus sollten **großskalige Demonstrationsvorhaben** gezielt gefördert werden, um technische, wirtschaftliche und regulatorische Fragestellungen unter realen Bedingungen zu adressieren und den Markthochlauf chemischer Wasserstoffspeicher zu beschleunigen.

Disruptive Technologien und integrierte Prozessketten. Roland Dittmeyer, Karlsruher Institut für Technologie.

Für eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Wasserstoffwirtschaft sind technologische Innovationen erforderlich, die die Kosten der Wasserstoffbereitstellung senken und gleichzeitig eine bessere Integration erneuerbarer Energien ermöglichen.

Dynamisch betriebene **Power-to-X-Anlagen und integrierte Wertschöpfungsketten**, die synthetische Kraftstoffe für nicht elektrifizierbare Anwendungen und Ausgangsstoffe für die chemische Industrie liefern, können die Nutzung erneuerbarer Energien optimieren, Importabhängigkeiten reduzieren und die Kopplung von Energie-, Industrie- und Verkehrssektor stärken. Voraussetzung hierfür sind lastflexible und energieeffiziente Prozessketten sowie modulare, skalierbare und möglichst automatisierte Technologien, die den Einsatz kritischer Rohstoffe minimieren. Ein Beispiel ist die Wertschöpfungskette des Projekts *Mannheim 001* an der Kläranlage Mannheim, bei dem erstmals weltweit CO_2 aus der Biogasnutzung in der Abwasserbehandlung zur Herstellung von grünem Methanol eingesetzt wird.

Darüber hinaus bieten disruptive Technologiekonzepte zusätzliche Potenziale für die Wasserstofferzeugung**.** Dazu zählt insbesondere die fotokatalytische Wasserspaltung, die Wasserstoff direkt mithilfe von Sonnenlicht erzeugt und weder Elektrolyseure noch elektrischen Strom als Prozessenergie benötigt. Für die industrielle Anwendung sind jedoch weitere Fortschritte bei leistungsfähigen, langlebigen und kostengünstigen Photokatalysatoren ohne kritische Rohstoffe sowie bei skalierbaren Reaktorkonzepten erforderlich.

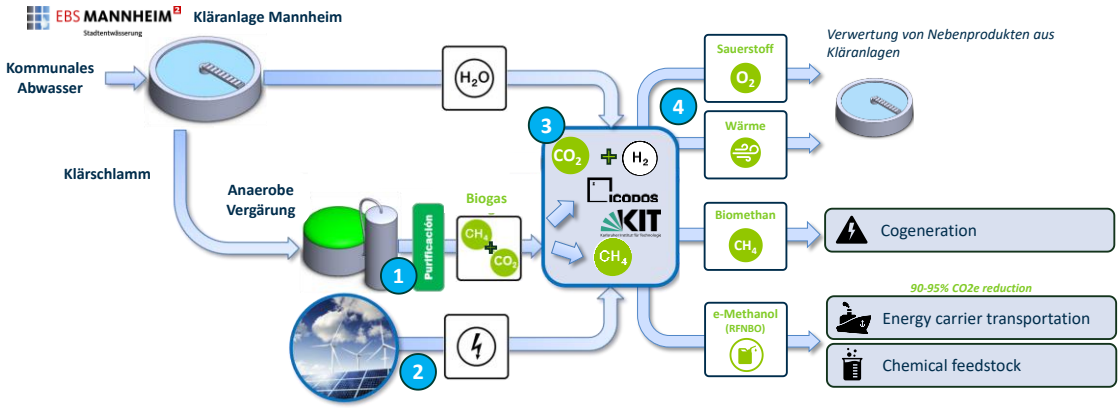


Abbildung 5: Wertschöpfungskette für das Projekt Mannheim 001 in der Kläranlage Mannheim.

Die Förderung von Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsvorhaben zu dynamisch betriebenen Power-to-X-Anlagen und anderen disruptiven Technologien sollte intensiviert werden. Diese Technologien können die Integration erneuerbarer Energien verbessern, Importabhängigkeiten reduzieren und die Sektorkopplung stärken. Forschungsschwerpunkte sollten auf **Lastflexibilität, Material- und Prozessstabilität** von Katalysatoren bzw. Reaktortechnologien und katalytischen Verfahren**, Skalierbarkeit** sowie der **Digitalisierung und Automatisierung von Anlagen** liegen, um ihren Beitrag zu einer resilienten und wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft zu maximieren.

Sicherheit als Voraussetzung für den Markthochlauf.
Daniel Banuti, Karlsruher Institut für Technologie.

Die Sicherheit von Wasserstofftechnologien ist eine zentrale Voraussetzung für den erfolgreichen Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft und deren gesellschaftliche Akzeptanz. Wissenschaftlich fundierte Sicherheitskonzepte, belastbare Daten sowie geeignete Normen und Standards sind erforderlich, um Risiken entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu bewerten und den sicheren Einsatz von Wasserstofftechnologien zu gewährleisten.

Im Mittelpunkt der Forschung stehen das Verständnis und die Modellierung von Phänomenen bei gasförmigem und flüssigem Wasserstoff, darunter Freisetzung, Ausbreitung, Zündung, Verbrennung und Detonation. Insbesondere Flüssigwasserstoff (LH_2) stellt aufgrund seiner kryogenen Eigenschaften und spezifischen Freisetzungs- und Brandphänomene besondere Anforderungen an Sicherheitskonzepte, Messtechnik und Simulationswerkzeuge. Experimentelle Daten, validierte Modelle sowie moderne Analyse- und KI-Methoden bilden die Grundlage für risikobasierte Sicherheitsbewertungen und die Weiterentwicklung von Codes und Standards.

Pränormative Forschung, Standardisierung, Zertifizierung und **Qualifizierung** sind zentrale Voraussetzungen für die sichere und breite Anwendung von Wasserstofftechnologien. Die Wasserstoff-Roadmap sollte daher Forschung und Innovation in diesen Bereichen gezielt fördern sowie **internationale Standardisierungsaktivitäten, Zertifizierungskonzepte** und **Schulungsmaßnahmen** stärken. Eine enge **Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen, Industrie, Normungsorganisationen und internationalen Netzwerken** ist dabei entscheidend, um wissenschaftliche Erkenntnisse in praktikable Sicherheitsanforderungen zu überführen und die gesellschaftliche Akzeptanz neuer Wasserstofftechnologien zu erhöhen.

Wasserstoff im Kontext von Bioökonomie und Energiesystemen.
Katja Bühler und Daniela Thrän, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.

Der Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft erfordert nicht nur technologische Innovationen, sondern auch ein besseres Verständnis ihrer Integration in klimaneutrale Energie- und Ressourcensysteme. Dabei spielen biologische Prozesse zur Wasserstofferzeugung, die Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff und Biomasse sowie die ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Bewertung verschiedener Nutzungspfade eine wichtige Rolle.

Ein Teil der Wasserstoffforschung beschäftigt sich mit der Untersuchung der Möglichkeiten mikrobieller Wasserstoffproduktion sowie der Rolle von Wasserstoff als Energieträger in biologischen Prozessen. Darüber hinaus werden Synergien und potenzielle Konkurrenzsituationen zwischen Biomasse und Wasserstoff in einem klimaneutralen Energiesystem analysiert. Systemmodelle ermöglichen es, die Auswirkungen von CO_2-Entnahmeoptionen auf den zukünftigen Wasserstoffbedarf zu bewerten und optimale Ressourcennutzungsstrategien abzuleiten. Ergänzend liefern ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertungen wichtige Erkenntnisse für die Skalierung und den Markthochlauf von Wasserstofftechnologien.

Die Wasserstoff-Roadmap sollte die Forschung zu **gesellschaftlichen, regulatorischen und transformativen Aspekten** der Wasserstoffwirtschaft gezielt stärken. Eine **integrierte Betrachtung von Umweltwirkungen, Wirtschaftlichkeit** und **sozialer Nachhaltigkeit** ist entscheidend, um tragfähige Transformationspfade zu identifizieren und politische Entscheidungsprozesse wissenschaftlich zu unterstützen. Gleichzeitig sollten **Narrative, gesellschaftliche Wahrnehmungen und Akzeptanzfragen** stärker in die Forschung einbezogen werden, um die gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstofftechnologien zu fördern.

Konkrete Empfehlungen für die Wasserstoff-Roadmap

Die Wasserstoff-Roadmap sollte gezielt Forschung und Innovation entlang der gesamten Wertschöpfungskette stärken. Nur so kann die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im entstehenden Wasserstoffmarkt gesichert werden. Der Aufbau einer wettbewerbsfähigen Wasserstoffwirtschaft erfordert ein abgestimmtes Zusammenspiel von Wasserstofferzeugung, Speicher- und Transportinfrastruktur sowie industrieller Anwendung. Um technologische Herausforderungen zu adressieren, den Markthochlauf zu beschleunigen, technologische Souveränität zu stärken und die Integration von Wasserstoff in ein klimaneutrales Energiesystem zu ermöglichen, sind auch Sicherheits-, Standardisierungs- und Systemforschung entscheidend.

Die nachfolgenden Empfehlungen greifen zentrale wissenschaftliche und technologische Handlungsfelder entlang der Wertschöpfungskette auf und zeigen, in welchen Bereichen Forschungs- und Innovationsaktivitäten zur Erreichung dieser Ziele beitragen können.

1. Kosteneffiziente und ressourcenschonende Wasserstofferzeugung zum Forschungsschwerpunkt machen.

Materialinnovationen, KI-gestützte Materialentwicklung sowie ein vertieftes Verständnis von Degradationsmechanismen sollten gezielt gefördert werden, um Effizienz, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen zu steigern und die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffen zu reduzieren. Hierzu tragen auch alternative Herstellungsverfahren, wie die solare Route, bei.

2. Speicher-, Transport- und Importinfrastrukturen durch Forschung und Demonstration absichern.

Forschungs- und Demonstrationsprogramme für geologische Wasserstoffspeicher, das Wasserstoff-Kernnetz sowie chemische Wasserstoffträger sollten ausgebaut werden. Ziel ist die Validierung sicherer, wirtschaftlicher und resilienter Infrastrukturkonzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

3. Systemintegration und Power-to-X-Anwendungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette stärken.

Forschung zu integrierten, dynamisch betriebenen Power-to-X-Prozessketten oder H2-fähigen Gasturbinen, Wasserstoffderivaten und sektorübergreifenden Anwendungen sollte intensiviert werden, um erneuerbare Energien besser zu integrieren, Importabhängigkeiten zu reduzieren und neue industrielle Wertschöpfung zu schaffen.

4. Sicherheits-, Standardisierungs- und Nachhaltigkeitsforschung als Voraussetzung des Markthochlaufs ausbauen.

Pränormative Forschung, Sicherheitsbewertung, Standardisierung und Zertifizierung sollten gezielt unterstützt werden. Gleichzeitig sind gesellschaftliche, regulatorische und nachhaltigkeitsbezogene Fragestellungen stärker in die Wasserstoffforschung zu integrieren, um Vertrauen und Akzeptanz zu schaffen.

5. Technologietransfer und Skalierung auf industrierelevante Maßstäbe durch gemeinsamen Demonstrationsvorhaben beschleunigen.

Großskalige Demonstrationsprojekte, offene Daten- und Modellierungsplattformen sowie langfristige Innovationspartnerschaften zwischen Forschung, Industrie, Netzbetreibern und Politik sollten gefördert werden, um technologische Durchbrüche schneller in marktfähige Anwendungen zu überführen.

Teilnehmende am Webinar: Auswahl von Wasserstoff-Expert:innen aus der Helmholtz-Gemeinschaft

Prof. Thomas D. Kühne
Center for Advanced Systems Understanding, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.
E-Mail: t.kuehne@hzdr.de

Prof. Dr. Kerstin Eckert
Institut für Fluiddynamik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.
E-Mail: k.eckert@hzdr.de

Dr. Lisa Suntrup
Stababteilung Energie und Information, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie.
E-Mail: lisa.suntrup@helmholtz-berlin.de

Dr. Roel von de Krol
Institut Solare Brennstoffe, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie.
E-Mail: roel.vondekrol@helmholtz-berlin.de

Prof. Dr. rer. nat. K. Andreas Friedrich
Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
E-Mail: Andreas.Friedrich@dlr.de

Dr. Alexander Dyck
Institut für Vernetzte Energiesysteme, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
E-Mail: Alexander.Dyck@dlr.de

Dr. Cornelia Schmidt-Hattenberger
Arbeitsgruppenleiterin Geologische Speicherung, Helmholtz-Zentrum für Geoforschung.
E-Mail: cornelia.schmidt-hattenberger@gfz.de

Prof. Dr.-Ing. Andreas Peschel
Institute for a sustainable Hydrogen Economy (IHE), Forschungszentrum Jülich.
E-Mail: a.peschel@fz-juelich.de

Prof. Dr. Ing. habil. Roland Dittmeyer
Institut für Mikroverfahrenstechnik (IMVT), Karlsruher Institut für Technologie.
E-Mail: roland.dittmeyer@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Daniel Banuti
Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit, Karlsruher Institut für Technologie.
E-Mail: daniel.banuti@kit.edu

Prof. Dr. Katja Bühler
Department Microbial Biotechnology, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.
E-Mail: katja.buehler@ufz.de

Koordination und Erstellung

Dr. Núria González und **Dr. Andrea Meyn**
Helmholtz Energy Office, Karlsruher Institut für Technologie.
E-Mail: nuria.gonzalez@kit.edu

Stand November 2026