

Wasserstoff als zentraler Baustein der Sektorenkopplung

Eine zentrale Herausforderung für das zukünftige CO₂-neutrale Energiesystem ist, wie mit regenerativer Energie bei möglichst geringen Gesamtsystemkosten ein zu allen Zeiten stabiler Systembetrieb gewährleistet werden kann. Strom aus erneuerbaren Energien (EE) wird dann die wichtigste Primärenergie sein und die Strombereitstellung wird aufgrund wechselnder meteorologischer Bedingungen stark über die Zeit variieren.

Dies wird dazu führen, dass etwa zur Hälfte der Zeit ein Stromüberangebot vorliegen wird. Diese Entwicklung lässt sich schon heute in Gegenden mit einem hohen Anteil an erneuerbarer Stromerzeugung beobachten, beispielsweise in der windkraftreichen Modellregion für das Forschungsprojekt *enera* im Nordwesten Deutschlands [1]. Insgesamt konnten in Deutschland im Jahr 2019 rund 6,5 TWh elektrischer Energie nicht genutzt werden, da eine Abregelung von erneuerbaren Energieanlagen erforderlich war [2]. Andererseits wird es im zukünftigen Energiesystem Zeiten geben, in denen keine ausreichende Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Quellen zur Verfügung steht. Der Extremfall ist hier die sogenannte Dunkelflaute, also ein längerer Zeitraum ohne nennenswerte Beiträge aus Solar- und Windenergie. Für diese Phasen müssen Erzeugungskapazitäten in der Größenordnung der Spitzenlast bereitgehalten werden [3].

Das Energiesystem der Zukunft erfordert daher neben Flexibilitätsoptionen einen Langzeitspeicher, der in der Lage ist, diese Schwankungen aufzufangen. Aufgrund der großen erforderlichen Speicherkapazität von deutlich über 100 TWh kommen dafür nur chemische Energiespeicher infrage. Wasserstoff, der aus erneuerbarem Strom hergestellt wird, kann diese Funktion übernehmen und als Energieträger bei der Kopplung der einzelnen Sektoren eine Schlüsselrolle spielen [4]. Durch den Transport in Pipelines kann Wasserstoff zudem für einen räumlichen Ausgleich von Energieangebot und -nachfrage sorgen. Wasserstoff wird somit als stofflicher Energieträger neben erneuerbarem Strom zur zweiten Säule des zukünftigen Energiesystems.

Im Rahmen der Sektorenkopplung wird Wasserstoff das Bindeglied zwischen Energiewirtschaft und Verbrauchssektoren sein und in vielen Branchen eine zentrale Rolle für das Erreichen der CO₂-Neutralität einnehmen, wie zum Beispiel:

- zur Defossilisierung nicht elektrifizierbarer Industrieprozesse (z. B. Stahl- und Glasindustrie)
- als Edukt in der Chemieindustrie und zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen
- als Kraftstoff im Verkehrssektor, vor allem für den Schwerlastverkehr
- als Brennstoff im Wärmesektor
- im Stromsektor für den zeitlichen und räumlichen Ausgleich der erneuerbaren Stromerzeugung

Die klimaneutrale und gesellschaftlich tragfähige Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems wird an den FVEE-Instituten intensiv erforscht. Im Folgenden werden dazu einige Forschungsaktivitäten zur Sektorenkopplung mit Wasserstoff vorgestellt:

Das DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme entwickelt innovative Konzepte und dezentrale Technologien zur saisonalen Energieverschiebung. Damit wird unter anderem die zentrale Frage adressiert, wie ein ganzjährig stabiler Systembetrieb mit regenerativer Energie unter Minimierung des Bedarfs an konventionellen Kraftwerken in der Backup-Infrastruktur sichergestellt werden kann.

Diese übergeordnete Fragestellung lässt sich in drei wesentliche Forschungsfragen gliedern:

1. Wie sehen mögliche saisonale Energiespeicheroptionen im > 100-TWh-Bereich aus und welche Anforderungen ergeben sich daraus an die Infrastruktur?
2. Welche Konzepte und Anforderungen an Energienetze (Strom, Gas, Wärme) und Verteil-Infrastruktur ergeben sich aus der dezentralen Wasserstoff-Rückverstromung unter Wärmenutzung – und kann das bestehende Erdgasnetz für die Wasserstoff-Nutzung ertüchtigt werden?
3. Welche technologischen Entwicklungen sind zur effizienten dezentralen Wasserstoff-Rückverstromung (unter Nutzung der Abwärme) erforderlich?



DLR

Andreas Rosenstiel
andreas.rosenstiel@dlr.de

Dr. Martin Vehse
martin.vehse@dlr.de

Fraunhofer ISE

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

Christopher Voglstätter
christopher.voglstatter@ise.fraunhofer.de

ISFH

Florian Peterssen
f.peterssen@isfh.de

KIT

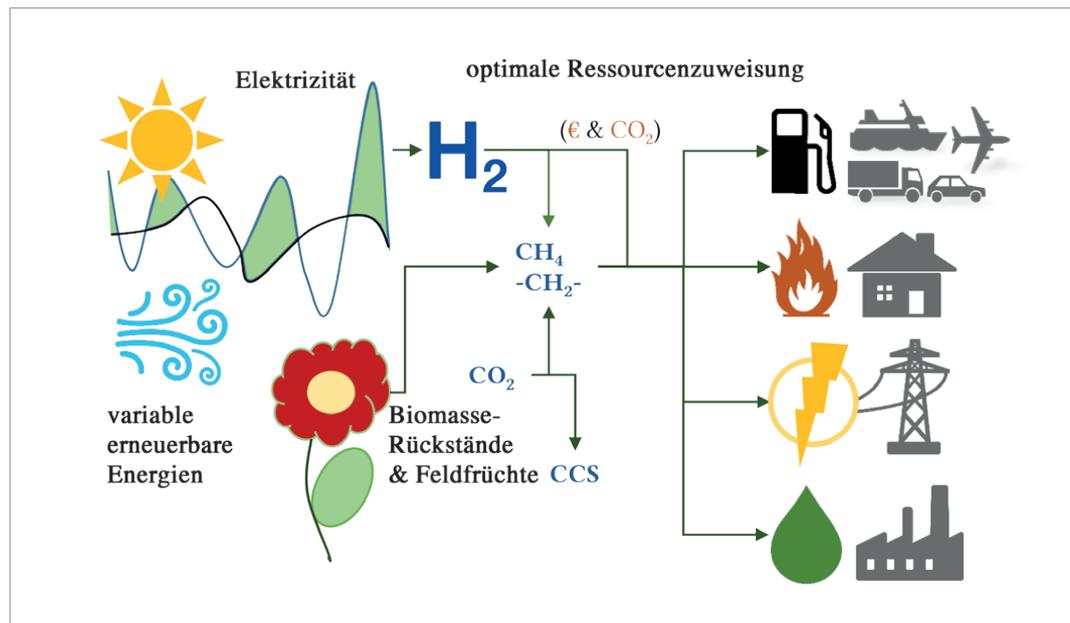
Prof. Dr. Thomas Kolb
thomas.kolb@kit.edu

UFZ

Frazer Musonda
frazer.musonda@ufz.de

Prof. Dr. Daniela Thraen
daniela.thraen@ufz.de

Abbildung 1:
Kostenoptimale Nutzung von Potenzialen an erneuerbarem Wasserstoff und Biomasse zur Produktion von erneuerbaren Chemikalien und Kraftstoffen [12]
 (Quelle: Studie des UFZ)



Saisonale Speicherung von Wasserstoff

Zur Thematik „Saisonale Energiespeicher und Infrastruktur“ wird im Rahmen des Forschungsprojekts *HyCavMobil (Hydrogen Cavern for Mobility)* die Speicherung von Wasserstoff in Salzkavernen erforscht [5, 6]. Im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern bringt Wasserstoff aufgrund seiner Flüchtigkeit neue technische Herausforderungen mit sich. Für die spätere Rückverstromung mit Brennstoffzellen muss außerdem die notwendige Reinheit des Wasserstoffes sichergestellt und daher mögliche Verunreinigungsprozesse durch die Kavernen-Speicherung untersucht werden. Für diese Untersuchungen steht im Projekt in Rüdersdorf bei Berlin eine von europaweit nur zwei Versuchssalzkavernen zur Speicherung von Wasserstoff zur Verfügung.

Eine andere Möglichkeit der großskaligen Speicherung von Energie wird am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erforscht. Das Projekt *MethQuest* verfolgt den Ansatz, Wasserstoff aus erneuerbarem Strom mit CO₂ zu Methan umzusetzen [7]. Der große Vorteil der Methanisierung ist, dass das so erzeugte SNG (Substitute Natural Gas) ohne Einschränkung und erforderliche Anpassungen in der bestehenden Erdgasinfrastruktur eingesetzt und mit Biogas gemischt werden kann. Somit kann fossiles Erdgas schrittweise durch erneuerbares Gas ersetzt werden. Zusätzlich kann Abwärme aus der Methanisierung ins Wärmenetz eingespeist und lokal genutzt werden. Das so erzeugte SNG kann in allen Sektoren direkt eingesetzt werden, auch als Kraftstoff für Fahrzeuge und Schiffe (CNG, LNG). Außerdem kann SNG in modernen Gas-Kraftwerken oder lokalen BHKW mit

hohen Wirkungsgraden zur Rückverstromung verwendet werden und so wesentlich zur bedarfsgerechten Bereitstellung von erneuerbarem Strom beitragen. Ein wesentlicher Vorteil dieses Konzepts ist die sofortige Nutzungsbereitschaft, da auf einer existierenden Infra- und Nutzerstruktur aufgebaut wird. Dadurch können schon in einer frühen Phase Treibhausgasemissionen in allen Sektoren eingespart werden.

Wasserstoff im Strom- und Wärmesektor

Ideale Bedingungen für das Erproben von Technologien der Energiewende finden sich im Nordwesten Deutschlands. Zum einen gibt es dort einen hohen Anteil an Windkraft und damit zu vielen Zeiten einen Überschuss an erneuerbarer Energie in den Stromnetzen der Region. Außerdem sind saisonale Speichermöglichkeiten in Form von Kavernenspeichern vorhanden. Im Forschungsprojekt *H2-ReNoWe (Wasserstoffregion Nord-West-Niedersachsen)* wird der Fokus auf sogenannten grünen, also nachhaltig erzeugten Wasserstoff gelegt. Innerhalb des Projekts soll ein Beitrag für die nachhaltige Wasserstoffwirtschaft in der Region Wesermarsch geleistet werden, indem das Druckluft-Energiespeicher-Kraftwerk Huntorf in eine CO₂-vermeidende Betriebsweise mit Wasserstoff überführt wird. Dabei werden u. a. die Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien sowie deren Einfluss auf die Stromversorgung erforscht. Die bestehende Infrastruktur im Kraftwerk Huntorf wird dafür genutzt und erweitert, sodass die entwickelten Szenarien direkt vor Ort simuliert und erprobt werden können.

Zum Thema „Dezentrale Rückverstromung und Wärmeerzeugung“ werden am DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme innovative Möglichkeiten zur dezentralen Sektorenkopplung und neue saisonale Flexibilitätsoptionen untersucht. Im Forschungsprojekt *EVer (Energie und Verkehr)* werden z. B. technologische Lösungen für die Kopplung der Energiesektoren Strom und Wärme mit dem Verkehrssektor erforscht [8]. Im Fokus dieser Arbeiten steht die Frage, welche technologischen Entwicklungen zur Nutzung von wasserstoffbetriebenen (mobilen) Brennstoffzellen-Systemen als dezentrale Rückverstromungsoption erforderlich sind und wie sich die Abwärme bei der Rückverstromung effizient nutzen lässt. Dazu werden Fahrzeugkonzepte und Technologien an der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Stromnetz entwickelt. Im Falle von Brennstoffzellenfahrzeugen lässt sich durch die anfallende Abwärme zudem eine Schnittstelle zum Wärmesektor herstellen.

Wasserstoff als Rohstoff in der Industrie

Neben seiner Rolle als Brennstoff für Hochtemperaturprozesse, wie beispielsweise in der Glasindustrie und als Reduktionsmittel für die Stahlindustrie, ist Wasserstoff bereits heute ein wichtiger Rohstoff in der chemischen Industrie. Wenn in Zukunft fossile Rohstoffe aus der Versorgungskette wegfallen, wird der Bedarf an Wasserstoff in der Chemieindustrie weiter zunehmen.

Am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) wird im Rahmen des Projektes *SYMOBIO (Systemisches Monitoring und Modellierung der Bioökonomie)* untersucht, wie grüner Wasserstoff in Kombination mit verfügbarer Biomasse für die Produktion von Grundchemikalien und Kraftstoffe genutzt werden kann [9]. In einer detaillierten Systemmodellierung wurde dabei ermittelt, wie verfügbare Ressourcen dafür möglichst kostenoptimal zur Erreichung der Klimaschutzziele eingesetzt werden können (► *Abbildung 1*). Dadurch ist es möglich zu ermitteln, welche fossil-produzierten Grundchemikalien aus volkswirtschaftlicher Sicht zuerst durch erneuerbare Chemikalien ersetzt werden könnten.

Bedeutung von Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem

Am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) und am Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) werden techno-ökonomische Systemstudien durchgeführt, um kostenoptimale Transformationspfade hin zu einem CO₂-neutralen Energiesystem zu ermitteln [10]. Randbedingungen bei der Modellierung des Energiesystems sind dabei die Einhaltung der gesetzten Klimaschutzziele und die Gewährleistung der Energieversorgung. Das Fraunhofer ISE und das ISFH kommen in ihren Analysen zu dem Ergebnis, dass Wasserstoff im zukünftigen Energiesystem eine zentrale Rolle einnehmen wird.

► *Abbildung 2* zeigt die Entwicklung der Nachfrage in den Sektoren und die Wasserstoffbereitstellung für das sogenannte Referenzszenario in der Studie des Fraunhofer ISE, das inzwischen auf das Ziel Klimaneutralität 2045 angepasst wurde [10]. Dabei zeigt

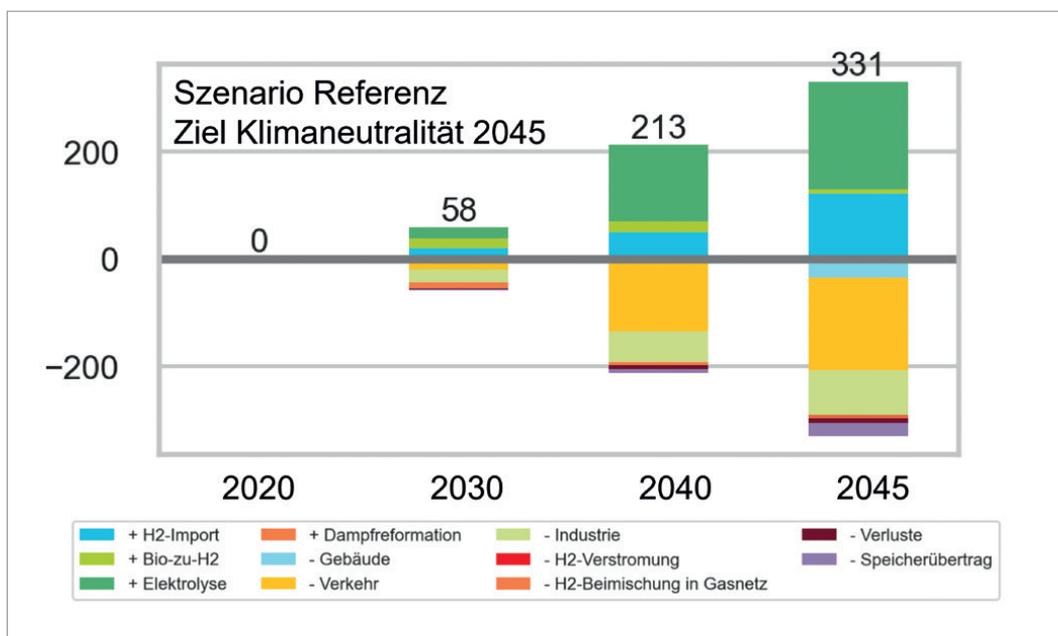


Abbildung 2:
Wasserstoffbereitstellung und Wasserstoffverbrauch:
Entwicklung in den einzelnen Sektoren (in TWh), nach einer techno-ökonomischen Systemmodellierung des Fraunhofer ISE [10].

Abbildung 3:

Stromeinsatz für die Elektrolyse:

Entwicklung nach einer techno-ökonomischen Systemmodellierung des ISFH

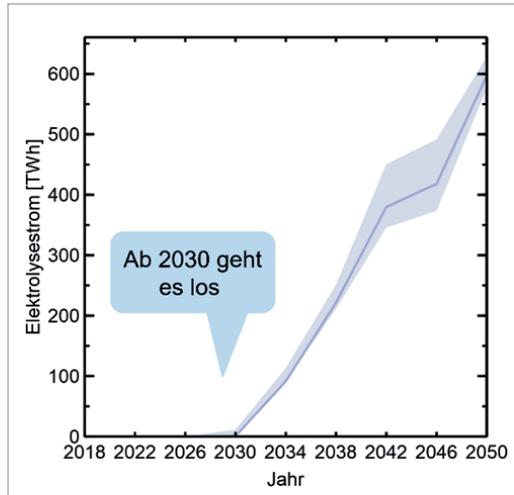


Abbildung 4:

Zwischenergebnis der Konzeptentwicklung einer Wasserstoff-Modellregion im Rahmen einer Hyexperts-Förderung für die Stadt Bielefeld sowie die Kreise Lippe und Minden-Lübbecke:

Mögliche Verbraucher, Erzeugungsanlagen und minimal erreichbare Bereitstellungskosten (Grenzkosten) unter Berücksichtigung von Fördermitteln. Tankstellenkosten (ca. 1–2 EUR/kg wenn ohne Fördermittel gebaut wird) sind hier noch nicht enthalten

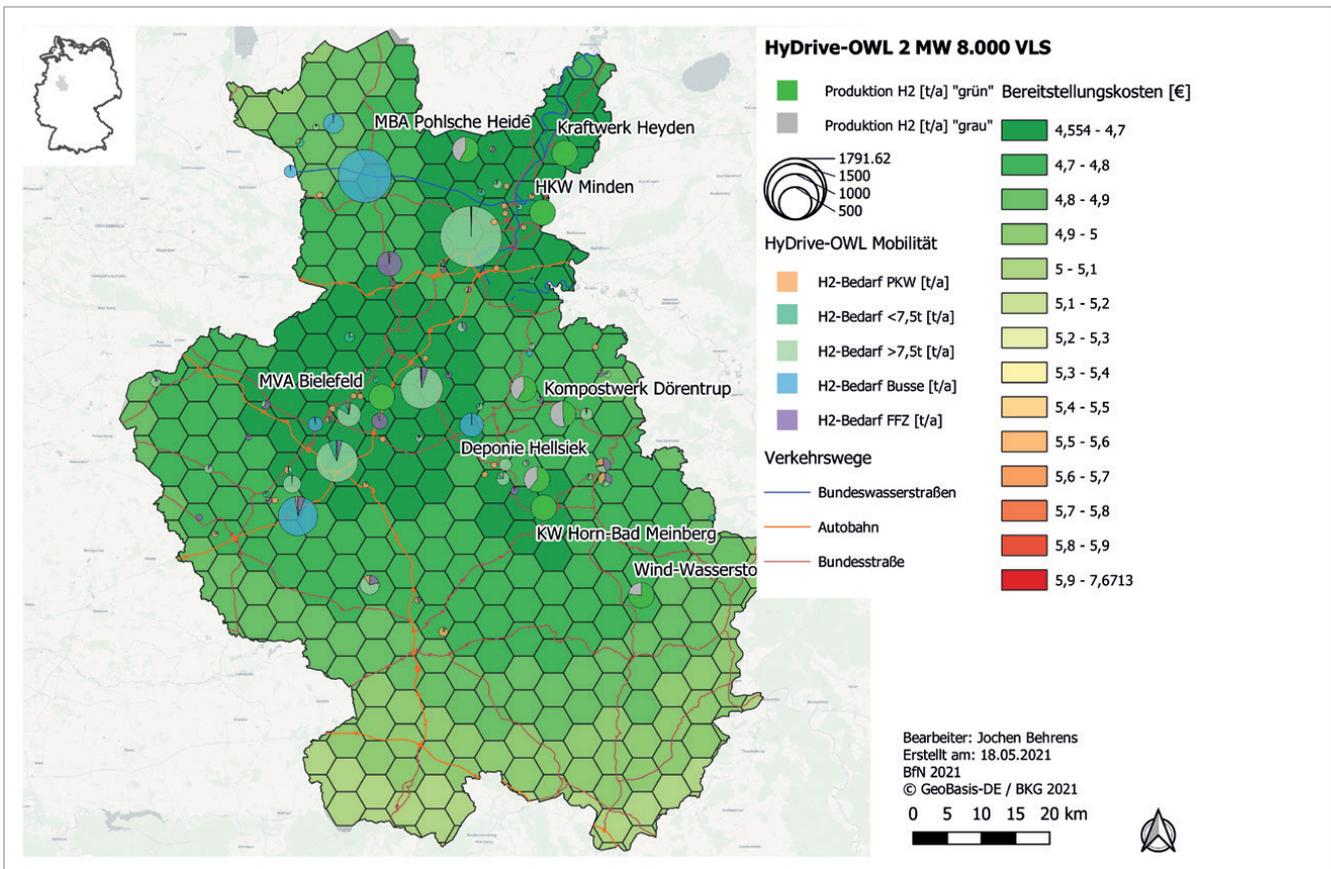
(Quelle: © Fraunhofer ISE)

sich, dass der Wasserstoffbedarf bis 2045 auf 331 TWh ansteigt, wobei Wasserstoff vor allem im Verkehrssektor und der Industrie eingesetzt wird. Laut der Studie werden 50–60% des Bedarfs durch inländische Produktion gedeckt. Neben dem Import von Wasserstoff wird zudem ein Import von weiteren 200 TWh in Form von synthetischen Kraftstoffen erwartet. Die Studie des ISFH kommt zu dem Schluss, dass der Bedarf an Wasserstoff auf bis zu 1200 TWh bis 2050 ansteigen wird, wobei dabei auch die Menge an Wasserstoff enthalten ist, die für die Produktion von synthetischen Kraftstoffen und petrochemischen Grund-

stoffen benötigt wird. Es wird erwartet, dass etwa 400 TWh durch inländische Produktion gedeckt und 800 TWh Wasserstoff importiert werden. ► **Abbildung 3** zeigt die erwartete Entwicklung des Stromeinsatzes für die Elektrolyse in Deutschland mit einem deutlichen Anstieg ab 2030.

Beschleunigung der Sektorenkopplung mit Wasserstoffregionen und Modellprojekten

Aktuell gibt es viele motivierte Akteure und Initiativen für Wasserstoffprojekte. Die Umsetzung scheitert allerdings oft daran, dass keinerlei Wasserstoffinfrastruktur wie Tankstellen und Erzeugungsanlagen vorhanden ist und eine flächendeckende Wasserstoffversorgung je nach Region erst im Zeitraum 2030 – 2040 zur Verfügung stehen wird. Da einzelne Wasserstoffanwender die Kosten für den Aufbau einer notwendigen Infrastruktur nicht tragen können, ist es notwendig, dass sich mehrere Akteure zusammenschließen und eine möglichst kosteneffiziente erste Infrastruktur aufgebaut wird. Eine gute Größe für den Aufbau einer solchen Wasserstoff-Modellregion in der aktuellen frühen Phase sind ca. 4 Landkreise oder 1 Metropolregion. Dort werden 1–3 Elektrolyseure und 4–7 Tankstellen benötigt



und es ist eine gewisse Anzahl möglichst vielfältiger Verbraucher vorhanden.

Am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme wurde ein Konzept für solch eine Modellregion entwickelt, welche die Kreise Lippe und Minden-Lübbecke sowie die Stadt Bielefeld umfasst. Dabei wurden mögliche Verbraucher und Erzeuger von Wasserstoff erfasst und die minimalen Wasserstoffbereitstellungskosten ermittelt (► *Abbildung 4*).

Modellprojekte können ebenfalls dabei helfen, Wasserstofftechnologien schnell in die Anwendung zu bringen. Am DLR wurde in diesem Kontext das Konzept eines Wasserstoffexperimentierraums entwickelt (► *Abbildung 5*). Die Idee dahinter ist, die Wasserstoff-Forschungsaktivitäten des DLR von der Wasserstoffproduktion bis zur Nutzung an einem Ort und teils durch eine virtuelle Verknüpfung zu bündeln. Durch die Integration in ein innovatives Gewerbegebiet, wie zum Beispiel in den Brainergy Park in Jülich, wäre es damit möglich, sektorenübergreifende Anwendungskonzepte für Wasserstoff praxisnah zu erproben.

Fazit und Ausblick

Techno-ökonomische Systemstudien zeigen klar, dass die Sektorenkopplung mit Wasserstoff in Zukunft eine wichtige Rolle spielen wird. Die Wasserstoffwirtschaft befindet sich jedoch noch in einer spannenden frühen Phase und es steht keineswegs fest, wie genau das zukünftige Energiesystem aussehen wird. Dies wird sich in einem Innovationswettbewerb zwischen verschiedenen Lösungsansätzen herauskristalisieren. Wichtig ist dabei auch ein schneller Start der Umset-

zungen im kleinen Maßstab, da Wasserstoff erst ab einer gewissen Verbreitung und Größe seine Potenziale zur Kostensenkung und Energiespeicherung ausspielen kann. Modellregionen können hier eine erste kosteneffiziente Anlaufaktivität sein, wenn das Gesamtkonzept abgestimmt und optimiert ist.

Für die Umsetzung und die Integration im großen Maßstab ist eine der zentralen Fragen, wie ein effizientes System bei möglichst geringen Kosten aufgebaut werden kann. Potenziale der Effizienzsteigerung sind hierbei nicht nur auf Technologie-, sondern auch auf Energiesystemebene vorhanden. Ein Beispiel hierfür ist die Nutzung von Abwärme bei der Wasserstoffherstellung und der Rückverstromung, wodurch die Energieeffizienz des Gesamtsystems enorm gesteigert werden kann. Dabei muss sich herausstellen, ob sich dies besser mit zentralen oder in dezentralen Ansätzen umsetzen lässt oder inwieweit eine Kombination aus beiden Konzepten die beste Lösung darstellt.

Klassische Sektorengrenzen werden in Zukunft jedenfalls an Bedeutung verlieren und es werden sich neue Schnittstellen für die Kopplung von Sektoren ergeben. Ein Beispiel hierfür sind die zuvor genannten Brennstoffzellenfahrzeuge, die auch bei Bedarf Strom in das Netz einspeisen können. In einer technisch sinnvoll ausgestalteten Wasserstoffwirtschaft wird es daher nicht einfach nur darum gehen, fossile Energieträger durch Wasserstoff zu ersetzen. Die Sektorenkopplung mit Wasserstoff erfordert vielmehr ein regelrechtes Neudenken des Energiesystems und weiterhin viele innovative Lösungsansätze aus der Forschung.

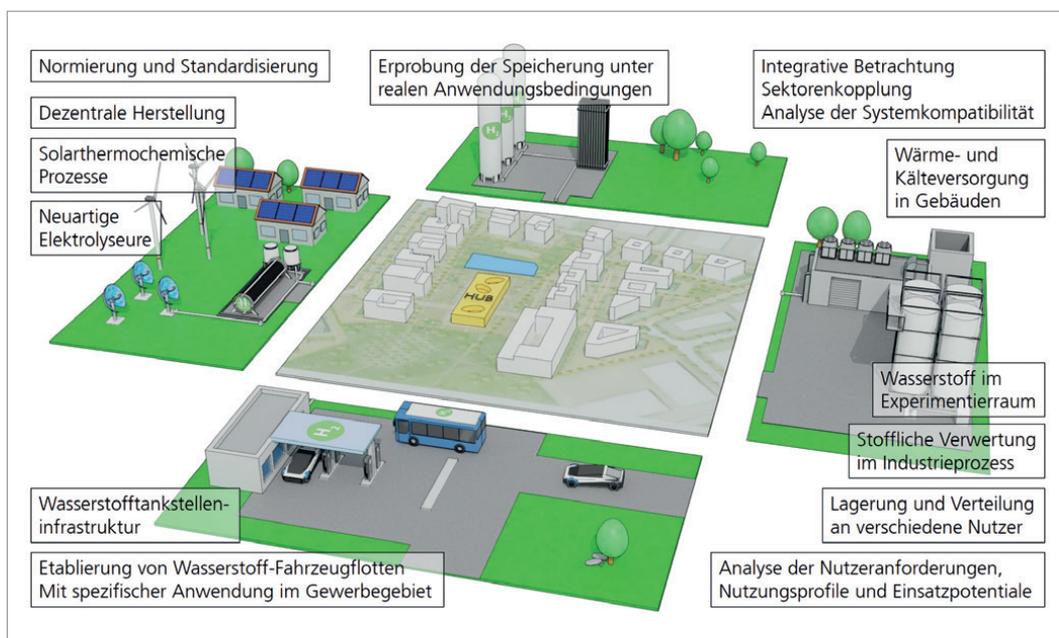


Abbildung 5: **Konzept für einen in ein innovatives Gewerbegebiet integrierten DLR-Wasserstoff-experimentierraum**

(Quelle: © 2021 Brendelberger)

Literatur

- [1] Peters, D., et al., Einspeisemanagement in der enera Region. Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. 2018: Berlin.
- [2] STATISTA. Entwicklung der Ausfallarbeit durch Abregelung der EE-Stromeinspeisung in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020. 2021 [cited 2021 29. Oktober]; Available from: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/617949/umfrage/einspeisemanagement-in-deutschland>.
- [3] Weitemeyer, S., et al., A European Perspective: Potential of Grid and Storage for Balancing Renewable Power Systems. *Energy Technology*, 2016. 4(1): p. 114-122.
- [4] Agert, C., et al., Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff: Zwei Seiten der gleichen Medaille. 2020, DLR, Institut für Vernetzte Energiesysteme.
- [5] Kröner, M. and C. Agert. Salzkavernen speichern Wasserstoff für Mobilitätswende. 2019 [cited 2021 October 25]; Available from: https://www.dlr.de/ve/desktopdefault.aspx/tabid-13776/23923_read-57990/.
- [6] Roeb, M., et al., Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung. 2020, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Köln, Germany.
- [7] MethQuest-Leitprojekt. MethQuest: Mit erneuerbarem Methan die Energiewende voranbringen 2021 [cited 2021 October 25]; Available from: www.methquest.de/.
- [8] Wulff, N., et al., Comparing Power-System and User-Oriented Battery Electric Vehicle Charging Representation and Its Implications on Energy System Modeling. *Energies*, 2020. 13(5).
- [9] Musonda, F., et al., Bioökonomie als gesellschaftlicher Wandel, Modul 2 (1): BEPASO – Bioökonomie 2050: Potenziale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien – TP UFZ 2020.
- [10] Brandes, J., et al., Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. 2021, Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme ISE.
- [11] Peterssen, F., et al., Hydrogen Supply Scenarios for a Climate Neutral Energy System in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy* (Accepted for Publication), 2022.
- [12] Millinger, M., et al., Electrofuels from excess renewable electricity at high variable renewable shares: cost, greenhouse gas abatement, carbon use and competition. *Sustainable Energy & Fuels*, 2021. 5(3): p. 828-843.