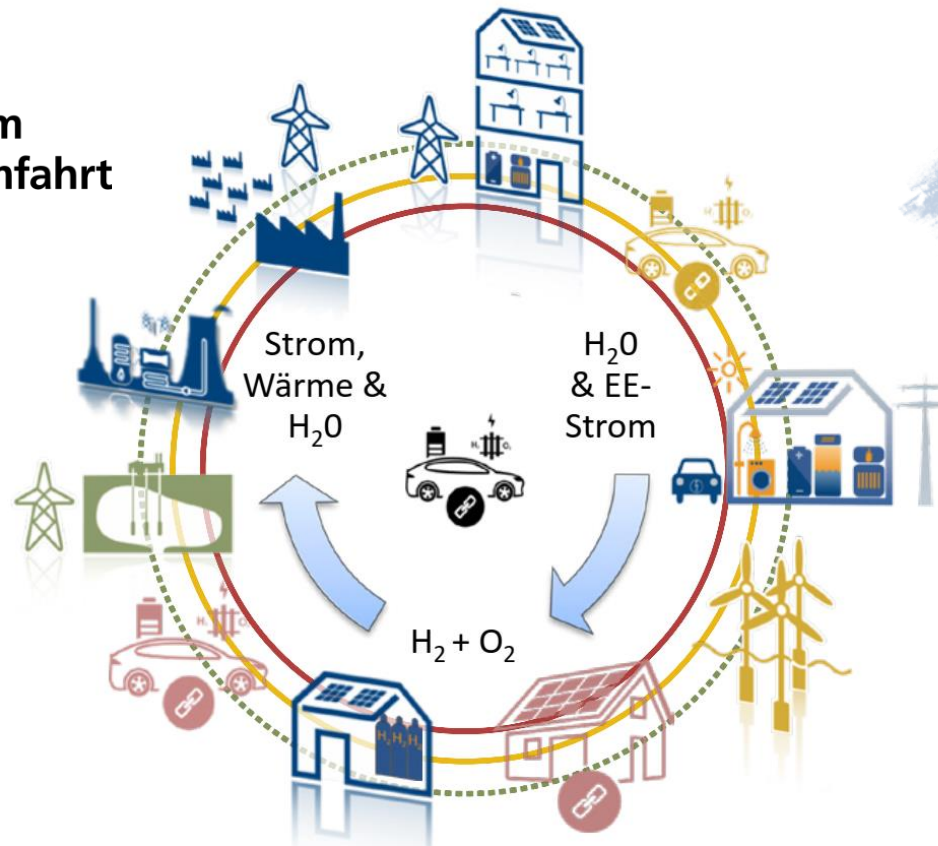


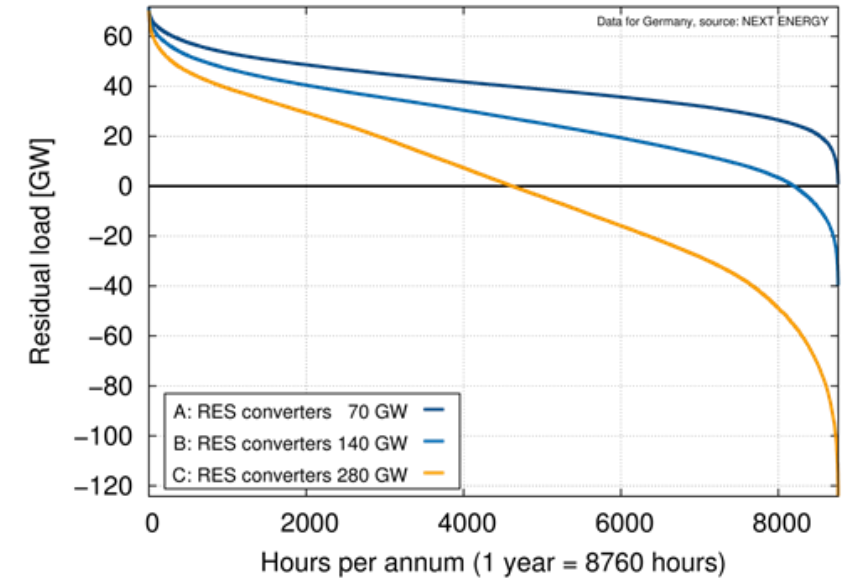
# Wasserstoff als zentraler Baustein der Sektorenkopplung

Andreas Rosenstiel, Martin Vehse (DLR), Florian Peterssen (ISFH), Christoph Kost, Christopher Voglstätter (Fraunhofer ISE), Thomas Kolb, Thomas Jordan (KIT), Frazer Musonda, Daniela Thrän (UFZ)



# Motivation

- Ziel Klimaneutralität erfordert massiven Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung, vor allem Wind und PV (>> 500 GW)<sup>1</sup>
- Fluktuierender EE-Strom wird zur wichtigsten Primärenergie
- Zunehmend negative Residuallasten, 2019 Abregelung von 6,5 TWh EE-Strom<sup>2</sup>
- Bedarf Langzeitspeicher (>> 100 TWh) zur Überbrückung von Dunkelflauten



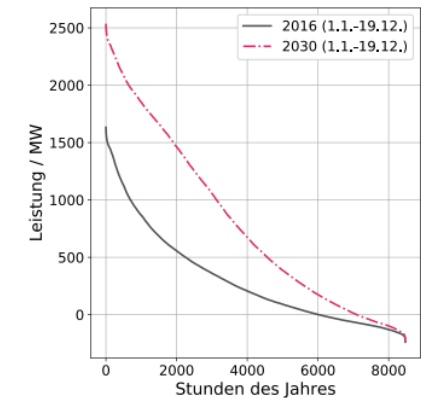
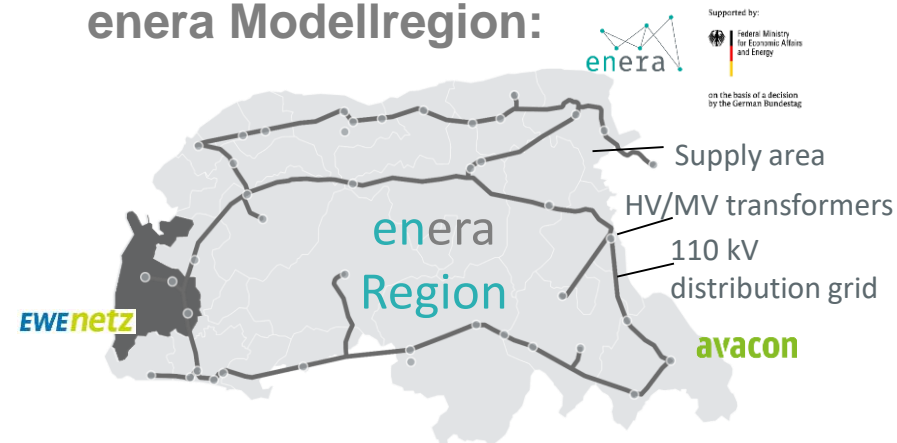
## Herausforderung:

Wie kann ein ganzjährig stabiler Systembetrieb mit regenerativer Energie unter Minimierung des Gesamtkosten gewährleistet werden?

Wie können nicht elektrifizierbare Branchen CO<sub>2</sub>-neutral werden?

➤ Wasserstoff als chem. Energiespeicher kann die Energiewirtschaft mit den Verbrauchssektoren verknüpfen und dort Emissionen reduzieren

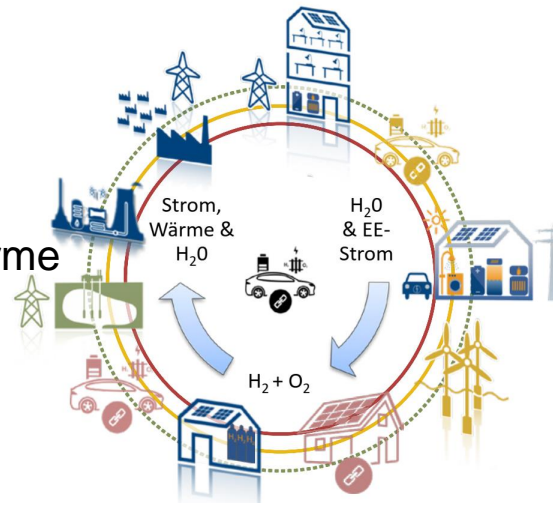
## enera Modellregion:



<sup>4</sup> D. Peters et al., 2018: D. Peters, et al.: *Einspeisemanagement in der enera Region, Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien*, Berlin, (2018)

# Rolle von Wasserstoff für die Sektorenkopplung

- Mit grünem Strom aus Wasser ohne Treibhausgase synthetisierbar
- Langfristig und in großen Mengen speicherbar
- Im Gasnetz transportierbar
- Höhere Energiedichte im Vergleich zu Batteriespeichern
- Effiziente Rückverstromung (Brennstoffzellen, Wasserstoffturbinen) mit Wärmenutzung
- Hohe Verbrennungstemperaturen für Prozesswärme > 1000 °C
- Reduktionsmittel
- Rohstoff für die chemische Industrie
- Als stofflicher Energieträger wird H<sub>2</sub> zur zweiten Säule des Energiesystems



➤ H<sub>2</sub> für den Ausgleich offer/demand bei EE-Strom (zeitlich und räumlich)

➤ H<sub>2</sub> als Kraftstoff im Verkehrssektor

➤ H<sub>2</sub> im Wärmesektor

➤ H<sub>2</sub> für die Defossilisierung nicht elektrifizierbarer Industrieprozesse (z. B. Stahl- und Glasindustrie)

➤ H<sub>2</sub> als Edukt für chemische Synthese

➤ H<sub>2</sub> als Ausgangsstoff für Produktion von synthetischen Kraftstoffen, z.B. SNG (Substitute Natural Gas)

# Rolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft:

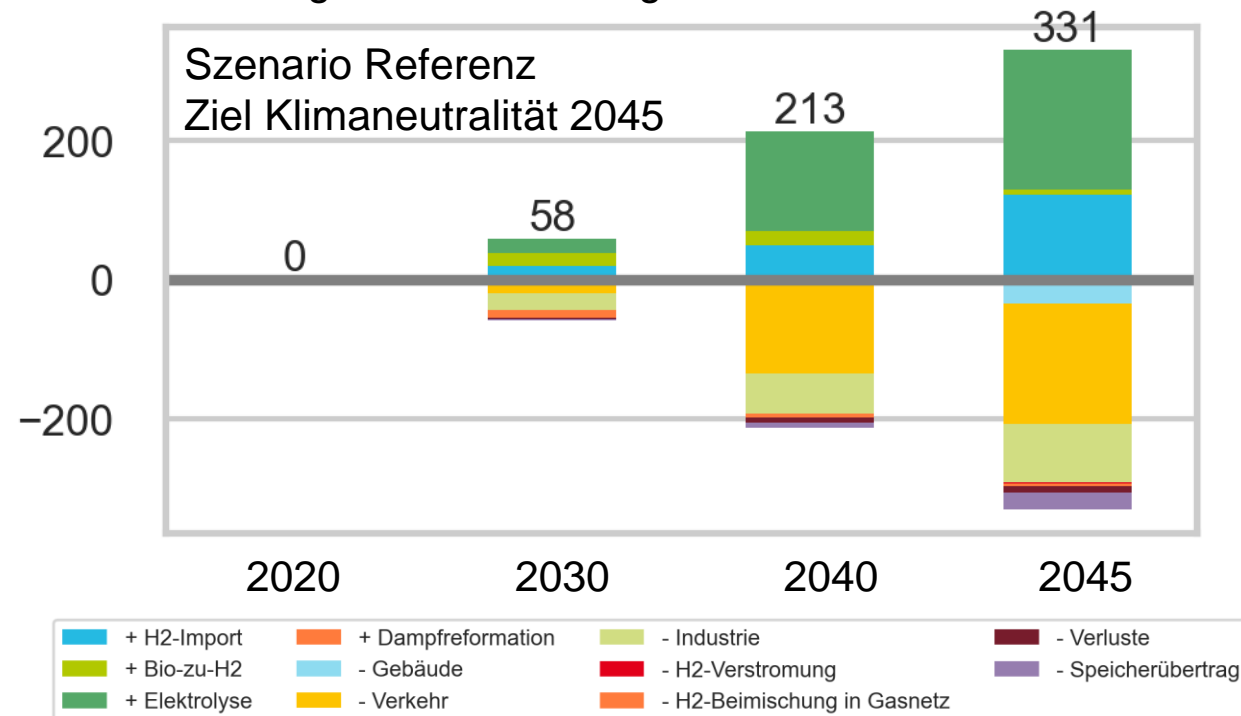
## Studie 1 des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) zu Bedarf und Wasserstoffbereitstellung

- Sektorenkopplung mit Wasserstoff führt zu niedrigeren Gesamtkosten für das erneuerbare Energiesystem<sup>1</sup>
- Techno-ökonomische Modellierung des zukünftigen Energiesystems mit Randbedingungen:
  - 1) Einhaltung der CO<sub>2</sub> Reduktionsziele
  - 2) Gewährleistung Energieversorgung

Ergebnisse Klimaneutralität 2045, Szenario Referenz:

- EE-Kapazität: 199 GW Onshore Wind, 66 GW Offshore Wind, 429 GW PV
- ≈ 80 GW installierte Elektrolyseurleistung
- ≈ 2/3 Deckung des H<sub>2</sub> Bedarfs (331 TWh) durch inländische Produktion
- zusätzlich SynFuel- und SynGas-Import (≈ 200 TWh)

Bereitstellung und Verwendung von Wasserstoff in TWh



Fraunhofer ISE 2021

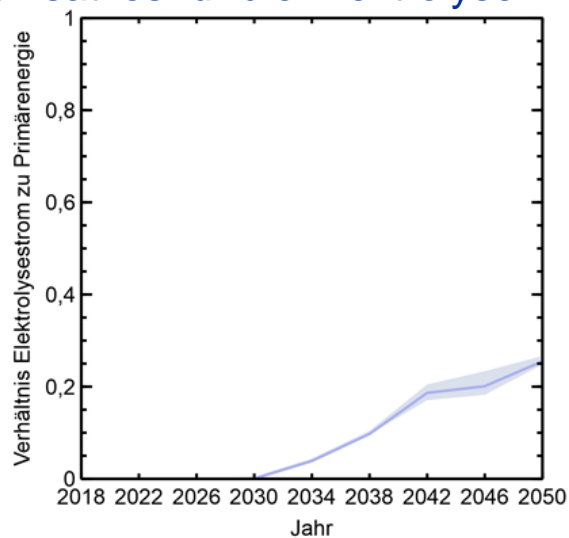
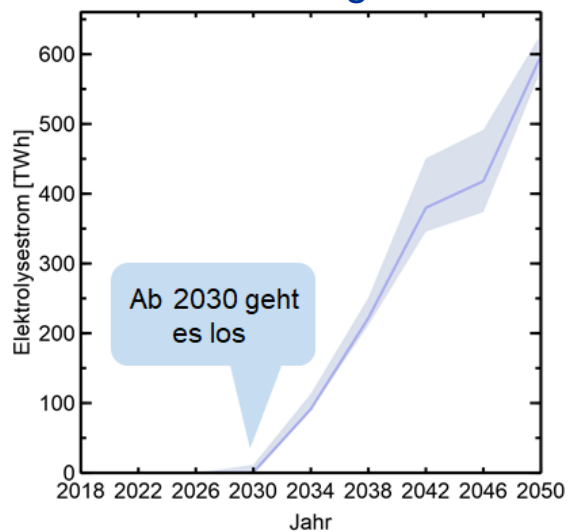


# Rolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft:

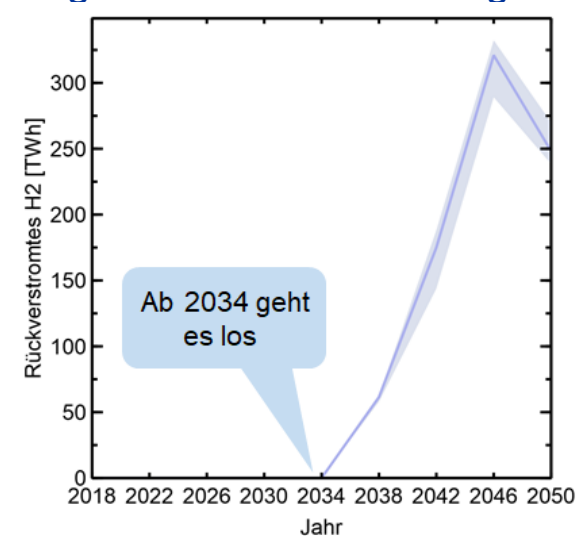
## Studie 2 des Instituts für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH)

- Zentrale Rolle von Wasserstoff: 1200 TWh
  - 400 TWh inländische Wasserstoffproduktion, 800 TWh Import
  - Installierte EE-Kapazität: 210 GW Onshore Wind, 54 GW Offshore Wind, 700 GW PV
  - 2050 nutzen Elektrolyseure 25 % der Primärenergie, insgesamt 600 TWh
  - Wasserstoff wichtig für saisonale Speicherung im Energiesektor mit Rückverstromung (300 TWh)

Entwicklung des Stromeinsatzes für die Elektrolyse



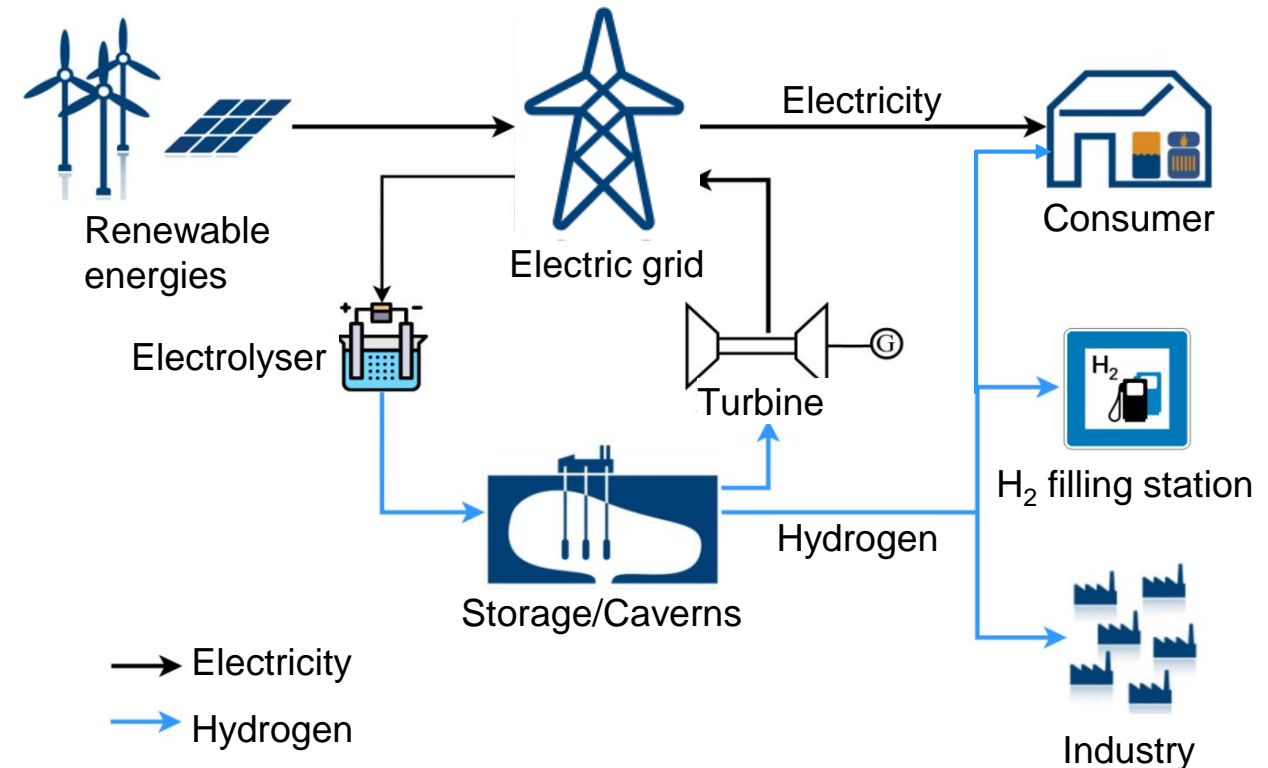
Entwicklung der Rückverstromung in Wasserstoffturbinen



ISFH 2021, (unveröffentlicht, vergleichbare Studie für Niedersachsen verfügbar)5

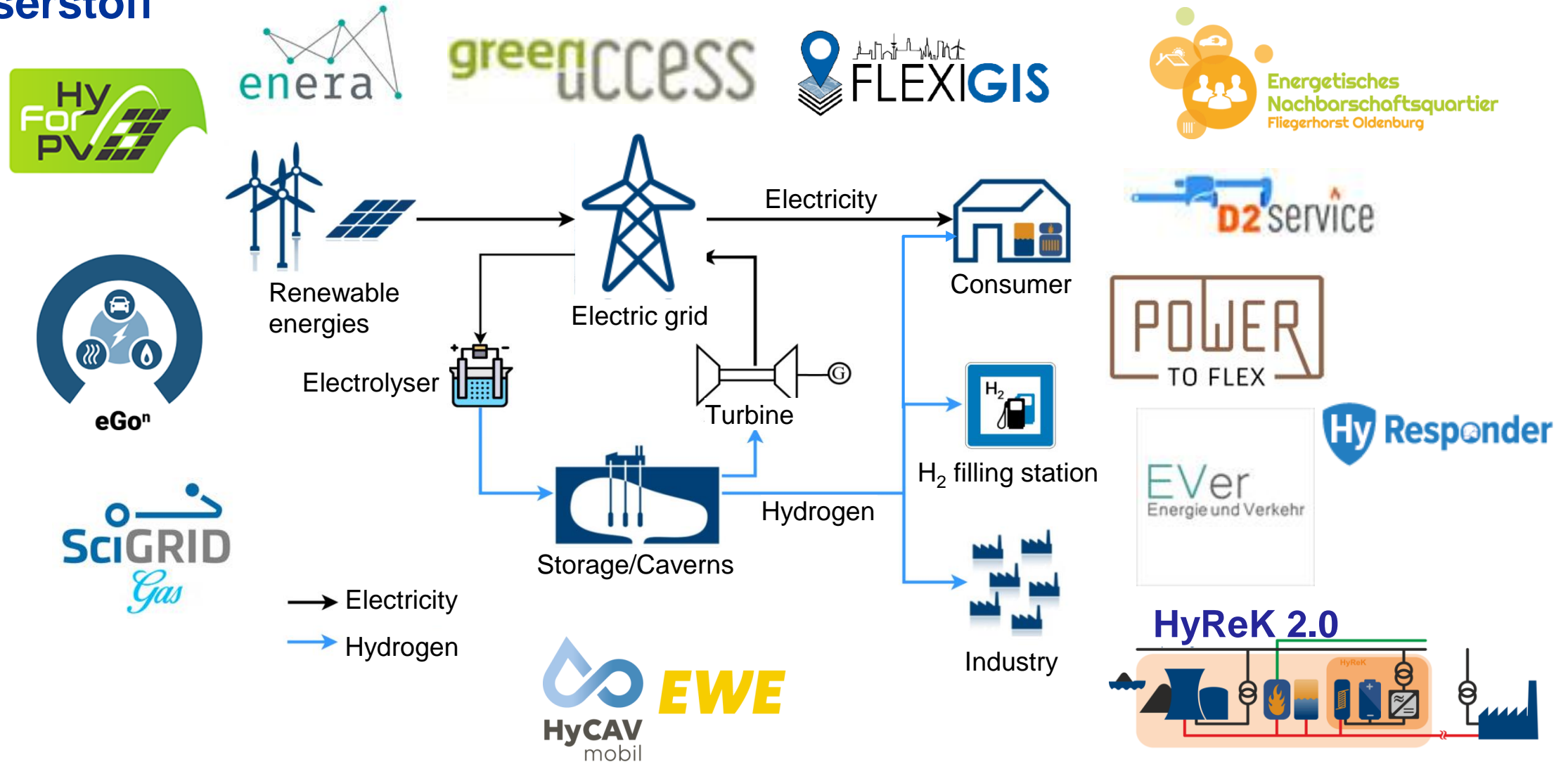
# Zentrale Fragestellungen zur Sektorenkopplung mit Wasserstoff

- Wie sehen mögliche saisonale Energiespeicheroptionen im > 100-TWh-Bereich aus und welche Anforderungen ergeben sich daraus an die Infrastruktur?
- 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?
- Welche technologischen Entwicklungen sind zur effizienten dezentralen Wasserstoff-Rückverstromung (unter Nutzung der Abwärme) erforderlich?



Zentraler/Dezentraler Ansatz?

# Exemplarische Projekte mit DLR Beteiligung zur Sektorenkopplung mit Wasserstoff



# Umsetzung der Sektorenkopplung

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

Koordiniert durch:



**EWE**



## Speicherung und Transport von Wasserstoff: HyCavMobil: Hydrogen Cavern for Mobility

**Motivation:** Die Speicherung von Wasserstoff in Salzkavernen erfordert eine hohe Reinheit des Wasserstoffs (“mobility grade”), wenn dieser später in BZ-Fahrzeugen rückverstromt werden soll

### Projekthalte:

Untersuchung der Wasserstoff-Reinheit nach der Speicherung in Versuchssalzkavernen für Anwendungen in BZ-Fahrzeugen

Konzeptionierung und Aufbau von Infrastruktur zur Messung der Wasserstoff-Reinheit

Materialtest unter nachgestellten Kavernenbedingungen in Hochdruck-Testreaktoren in Laborumgebung

Modellierung des Stromnetzes in der Kavernenumgebung zur Optimierung der Betriebskonzepte und Integration der Kaverne ins Energiesystem





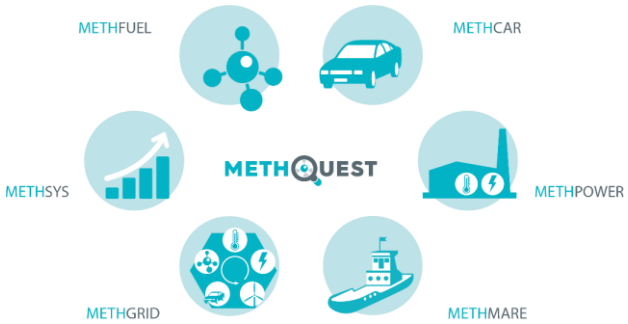
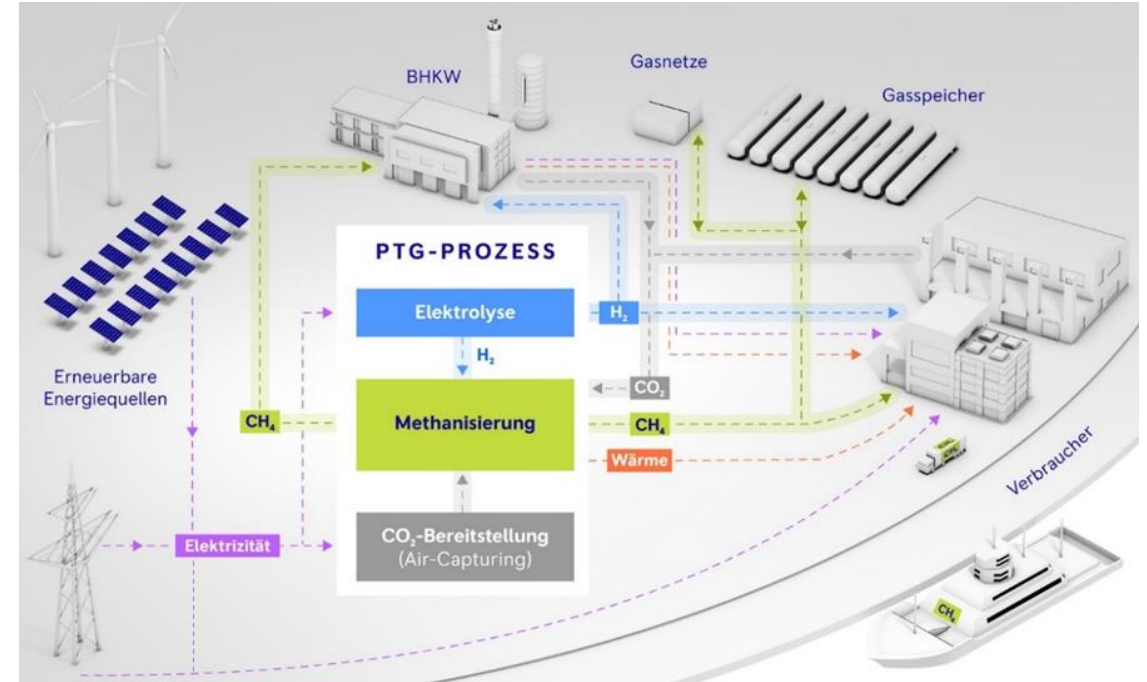
# Umsetzung der Sektorenkopplung

## Speicherung und Nutzung von Methan (SNG): Projekt MethQuest

- H<sub>2</sub> (eingeschränkt) / SNG (uneingeschränkt) für den Einsatz in vorhandenen Energiesystem-Strukturen
- Höhere Energiedichte → ≈ 3x Speicherkapazität

### MethQuest

Erzeugung und Einsatz von Methan aus erneuerbaren Quellen in mobilen und stationären Anwendungen



**Projektbudget: 32 Mio. €**  
 Gefördert durch:  
  
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

[www.methquest.de](http://www.methquest.de)

**26 Partner aus Industrie und Wissenschaft**  
**Koordination: MTU Friedrichshafen & DVGW-EBI**





# Umsetzung der Sektorenkopplung

## Wasserstoff im Stromsektor: H<sub>2</sub>-ReNoWe (Wasserstoff-Region Nord-West-Niedersachsen)

- Konzepte für **nachhaltige Wasserstoffwirtschaft** in der Region Wesermarsch
- **Sektorenkopplung** zwischen Gas- und Stromnetzen
- Analyse und Bewertung der **Standortpotenziale** des Kraftwerks Huntorf
- **Saisonale Speichermöglichkeiten** durch Kavernenspeicher vor Ort
- **Überschuss** an erneuerbar erzeugter Energie **in den Stromnetzen der Region**
- Das Druckluftspeicherkraft Huntorf hat bereits jetzt Zugriff auf die **Schlüsselemente einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft**



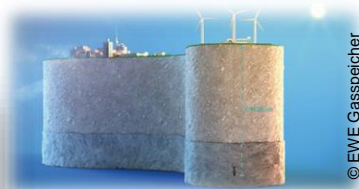
© Tennet

Überschuss an erneuerbarer Energie in der Netzregion



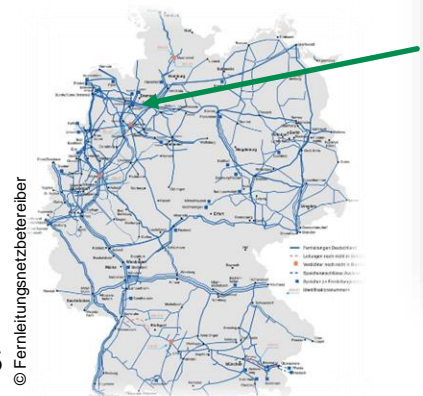
© Jade-Weser Port

Hafenanlagen zum Import von Wasserstoff in der Nähe



© EWE Gasspeicher

Speicherkapazitäten für Wasserstoff am Ort



© Fernleitungsnetzbetreiber

Anschluss an das Gas-Fernleitungsnetz



© Tennet

Anbindung an das Strom-Übertragungsnetz

► Ein hervorragender Standort für ein Innovationslabor Wasserstoff!

# Umsetzung der Sektorenkopplung

## Wasserstoff im Stromsektor: H<sub>2</sub>-ReNoWe (Wasserstoff-Region Nord-West-Niedersachsen)

### Aufgabe DLR:

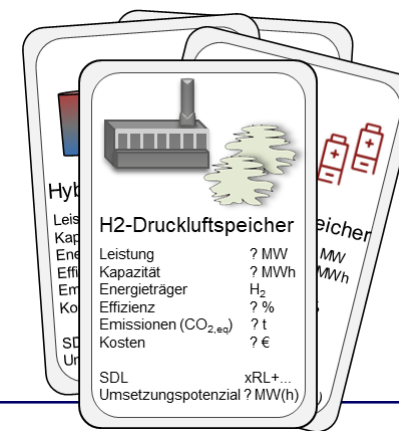
- Konzeptionierung eines neuartigen, hochflexiblen Wasserstoff-Druckluft-Speicherkraftwerks
- Betriebsweisen des Speicherkraftwerks für Netzdienlichkeit und Wirtschaftlichkeit

### Methodik:

- Stromnetzmodellierung und Simulation, Adaption von Zukunftsszenarien und Übertragung auf eine neue Kraftwerksgeneration

### Ergebnisse: Mehrwert des Speicherkraftwerks 4.0 im mittel- und langfristigen Kontext der Energiewende

- Beitrag zur Versorgungssicherheit
- Abgrenzung zu anderen Speicherkraftwerkskonzepten
- Umsetzungspotentiale in Niedersachsen anhand von Netzverknüpfungspunkten und vorhandenen Salzkavernen

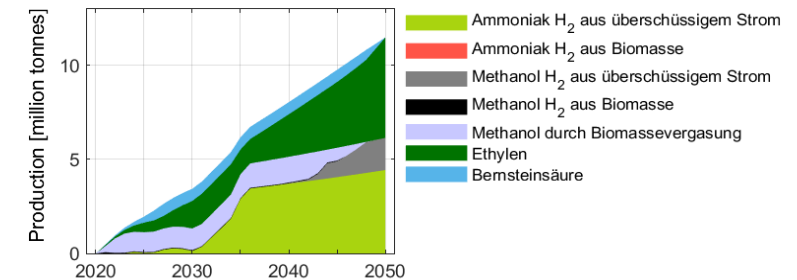
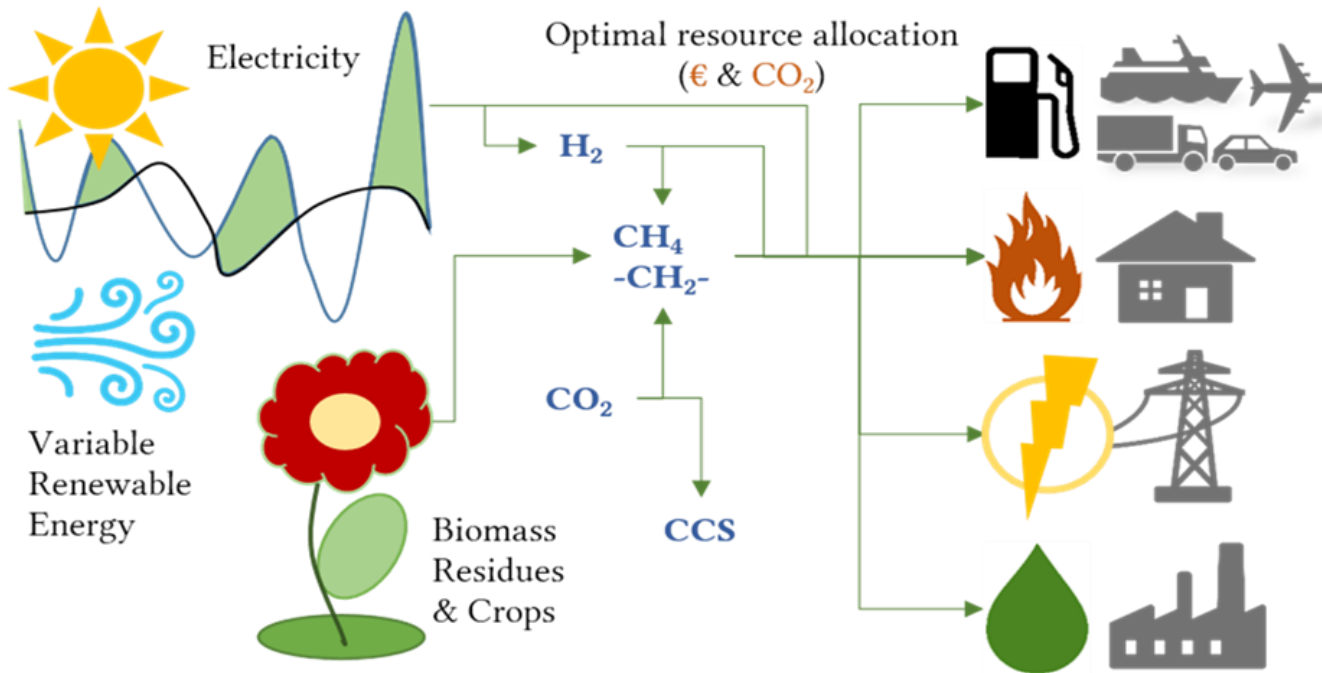



H2-Druckluftspeicher	
Leistung	? MW
Kapazität	? MWh
Energieträger	H <sub>2</sub>
Effizienz	? %
Emissionen (CO <sub>2,eq</sub> )	? t
Kosten	? €
SDL	xRL+...
Umsetzungspotenzial	? MW(h)

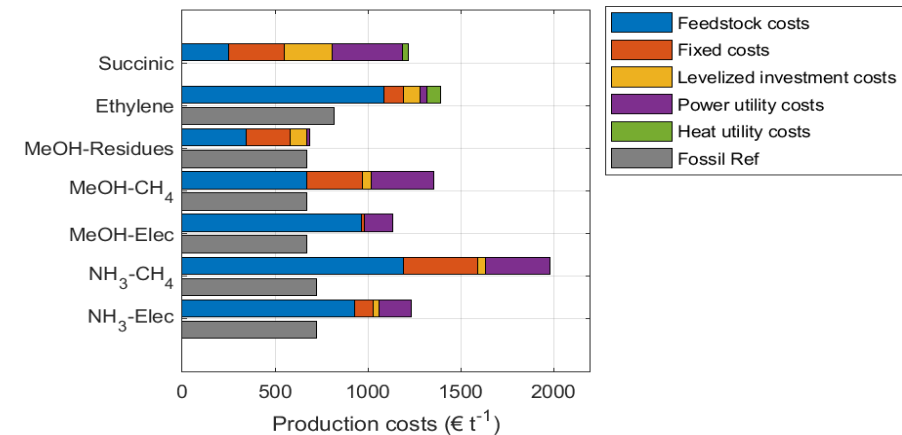
# Umsetzung der Sektorenkopplung

## Wasserstoff als Rohstoff in der Industrie

- Forschungsprojekt am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ)
- Kombination von grünem Wasserstoff und Biomasse zur Produktion von Grundchemikalien und Kraftstoffen



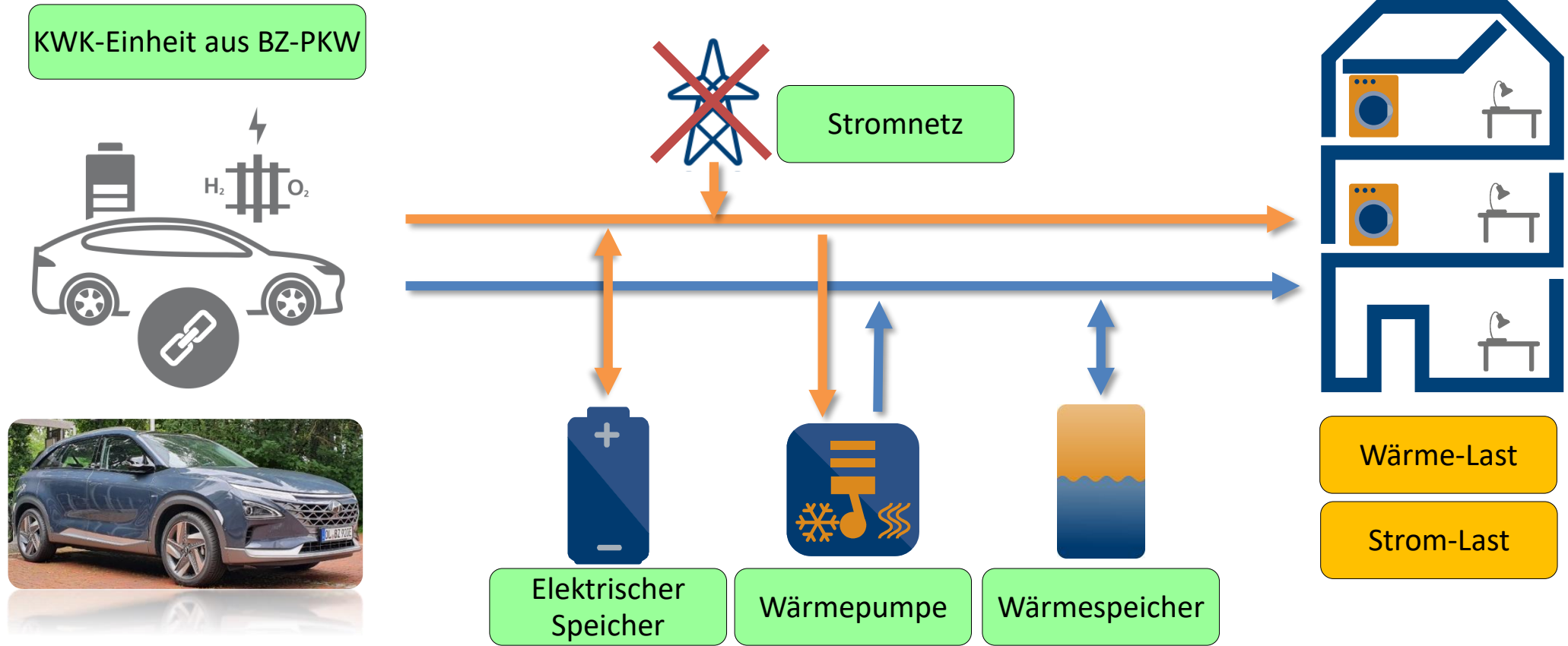
Produktion von erneuerbaren Chemikalien



Vergleich der Produktionskosten von erneuerbaren Chemikalien mit der fossilen Referenz

# Umsetzung der Sektorenkopplung

## Wasserstoff zur Kopplung des Verkehrssektor an Gebäude und Quartiere



Potential für Strom- und Wärmeversorgung von Gebäuden und Quartieren mit dezentral verteilten BZ-Fahrzeugen

# Umsetzung der Sektorenkopplung

## Wasserstoff zur Kopplung des Verkehrssektor an Gebäude und Quartiere

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

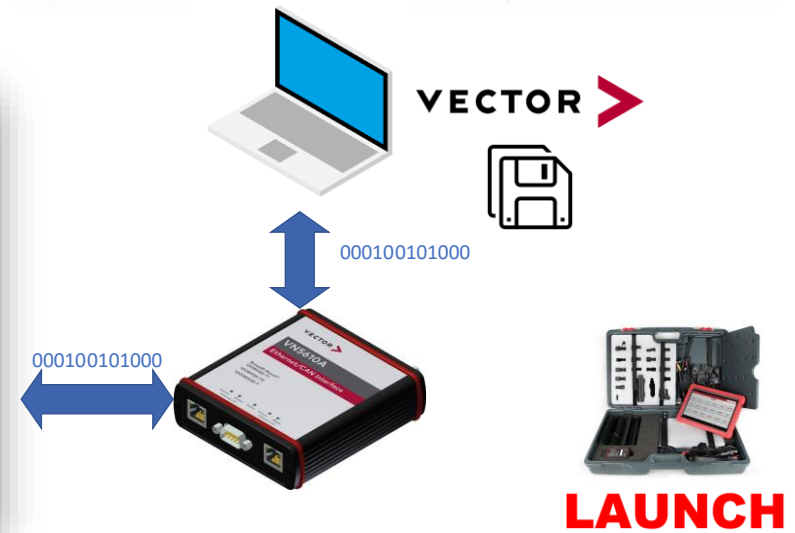
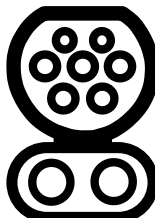
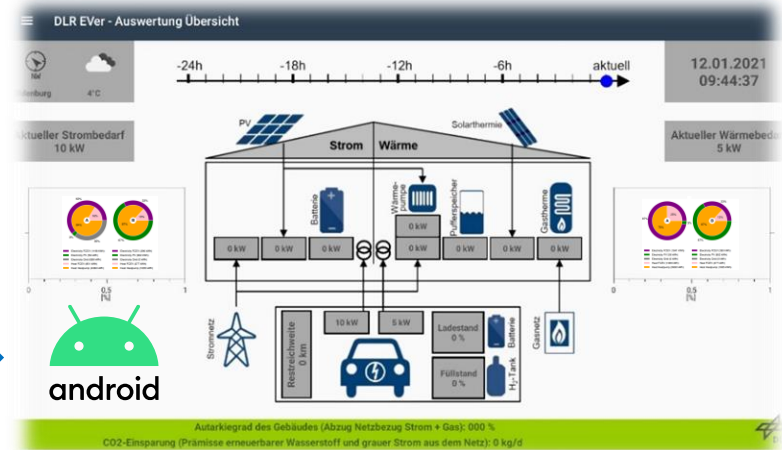
EVer  
Energie und Verkehr



Wireless

100111010001

Kommunikation



# Wichtige Faktoren bei der Umsetzung der Sektorenkopplung

## 1) Wirtschaftlichkeit:

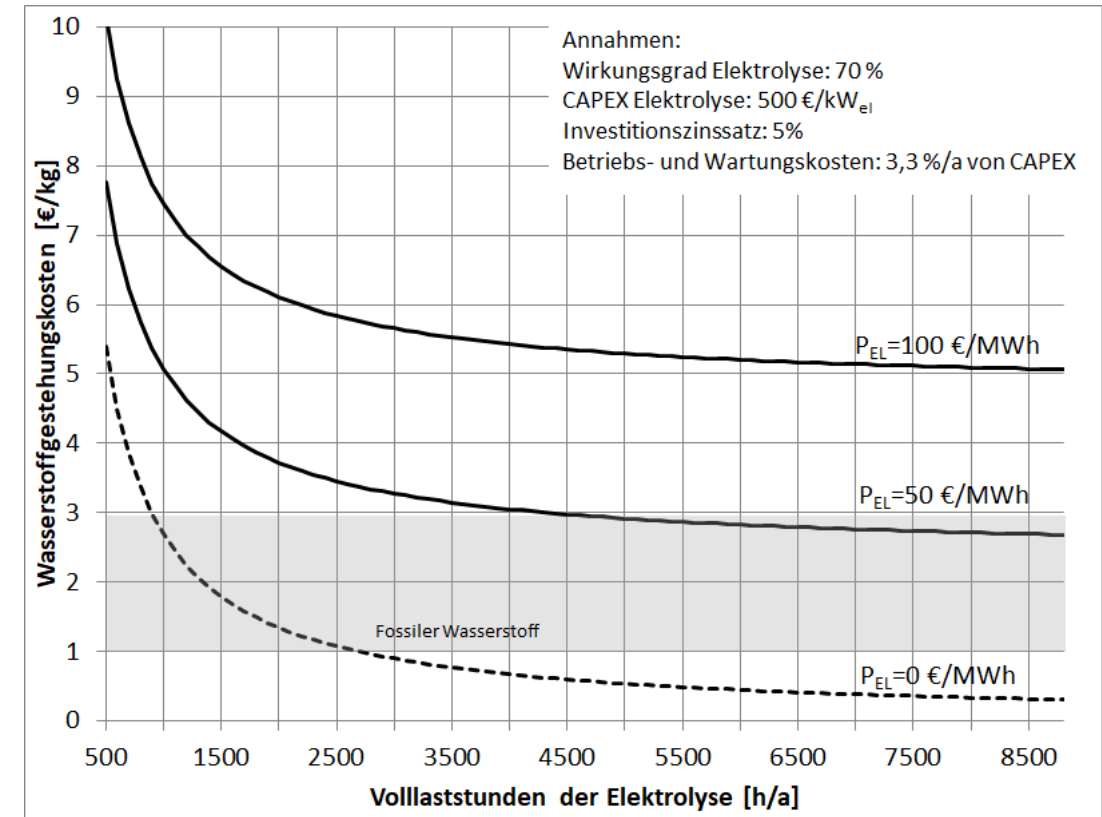
- Senkung Elektrolyseurkosten (Automatisation durch Markthochlauf)
- Stromkosten (neben EEG-Umlage andere Netzentgelte)

## 2) Erhöhung Systemeffizienz, z.B. durch Integration von Elektrolyseuren in Wärmenetze

- Rahmenbedingungen

## 3) Systemtransformation und Investitionssicherheit: Ausgleich H<sub>2</sub> Angebot / Nachfrage

- Reallabore + zunehmend vernetzte Modellregionen
- Schrittweise Umstellung Gasnetz



Etwa 4000 Volllaststunden mit EE-Strom

Annahme 50 % Kostensenkung CAPEX Elektrolysesystem gegenüber 2020

# Umsetzung der Sektorenkopplung

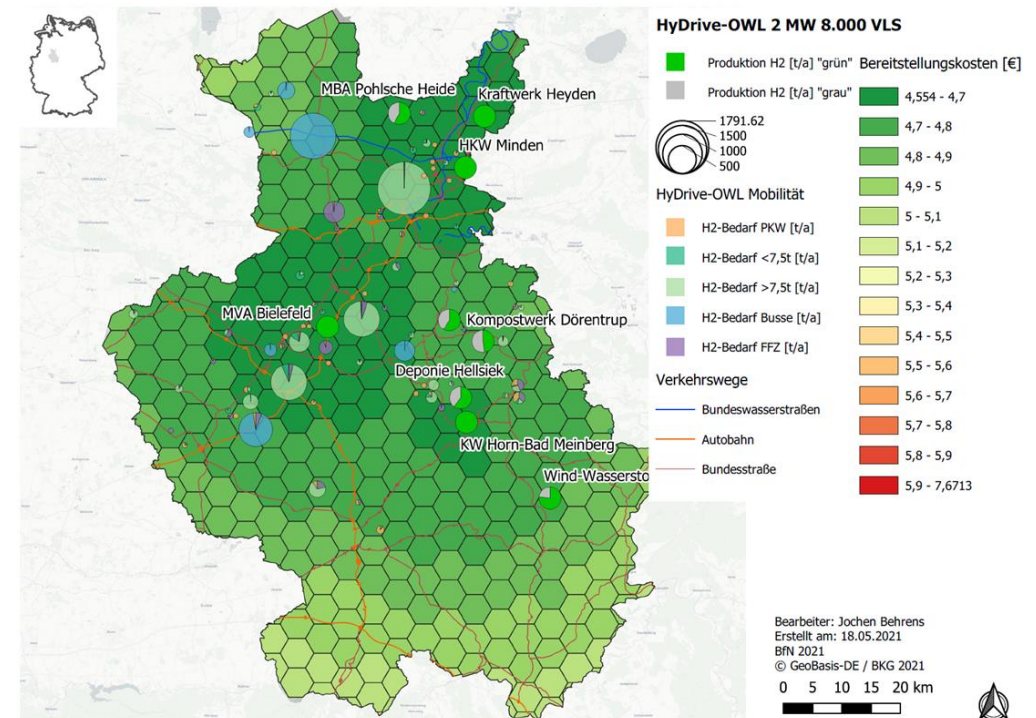
## „Kick-Off für grünen Wasserstoff“ oder Lösung des Henne-Ei-Problems: Wasserstoff-(Modell)regionen

In der Praxis zeigt sich:

- Umsetzung grüner Wasserstoff scheitert oft immer noch daran, dass regionale Tankstellen, Elektrolyseure oder Verbraucher fehlen
- Bis 2030 / 2040 keine flächige H<sub>2</sub>-Versorgung
- Einzelaktivitäten oder Eigenbetrieb von Infrastruktur ist teuer und schwierig (neue Technologie)!

Lösung:

- Gemeinsames Vorgehen / Planung (ca. 4 Landkreise bzw. 1 Metropolregion)
- Unterstützung durch Experten – bspw. gefördert durch Hyexperts-Mittel (BMVi)
- Gemeinsame Planung reduziert Kosten, löst Henne-Ei-Problem, senkt Hemmnisse



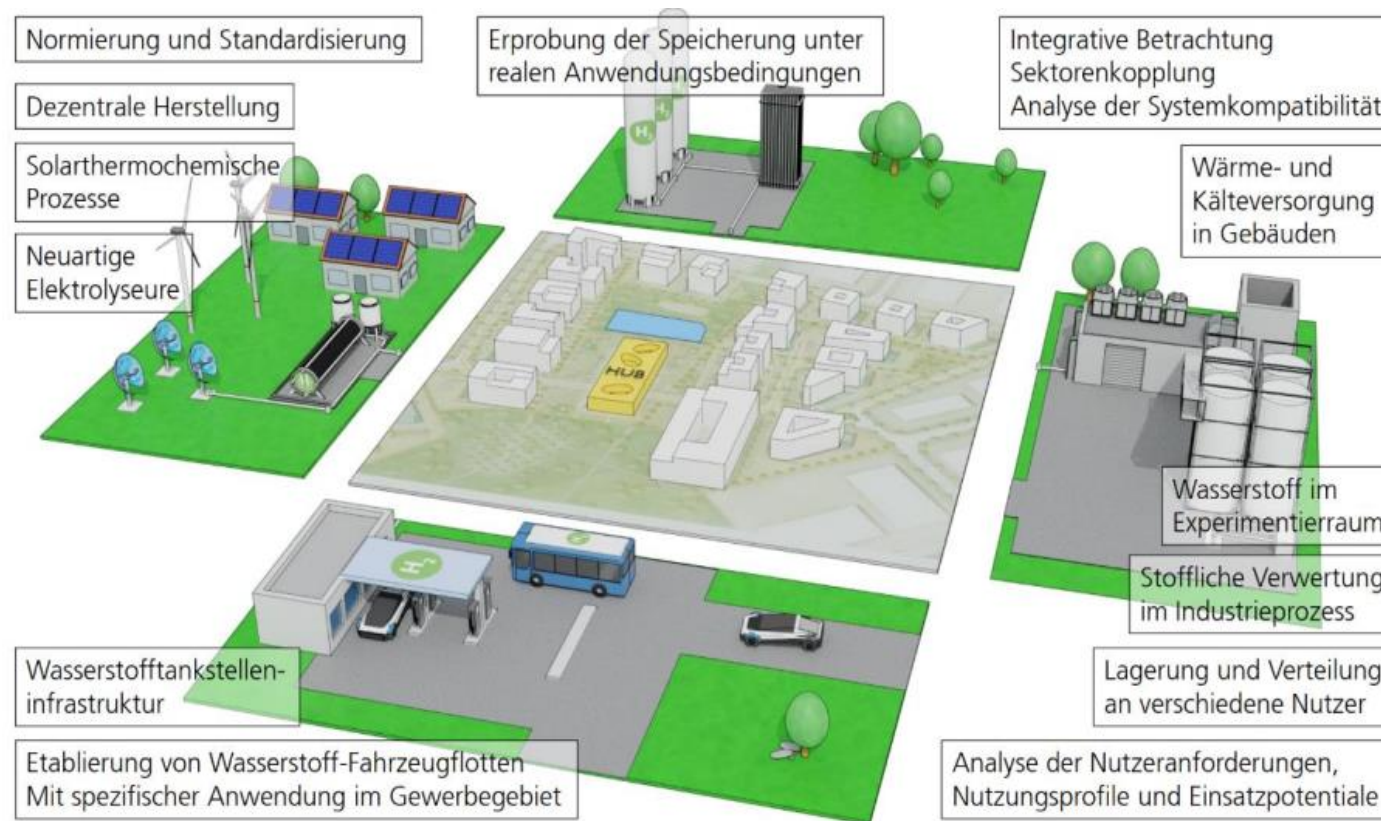
Zwischenergebnis der Konzeptentwicklung einer Wasserstoff-Modellregion durch das Fraunhofer ISE im Rahmen einer Hyexperts-Förderung für Stadt Bielefeld sowie die Kreise Lippe und Minden-Lübbecke: Mögliche Verbraucher, Erzeugungsanlagen und minimal erreichbare Bereitstellungskosten (Grenzkosten) unter Berücksichtigung von Fördermitteln<sup>1</sup>. Tankstellenkosten (ca. 1 – 2 €/kg wenn ohne Fördermittel gebaut wird) sind hier noch nicht enthalten.

<sup>1</sup> Hinweis: Die Regulatorik und Förderlandschaft ist aktuell massiv im Umbruch. Die hier dargestellten Kosten inklusive Förderung sind teilweise bereits überholt.



# Angewandte Sektorenkopplung: DLR Wasserstoffexperimentierraum

- Konzept zur Bündelung von DLR Forschungsaktivitäten von der Wasserstoffproduktion bis zur Nutzung
- Integration in ein innovatives Gewerbegebiet (Brainergy Park in Jülich)
- Praxisnahe Erprobung von sektorübergreifenden Anwendungskonzepten für Wasserstoff



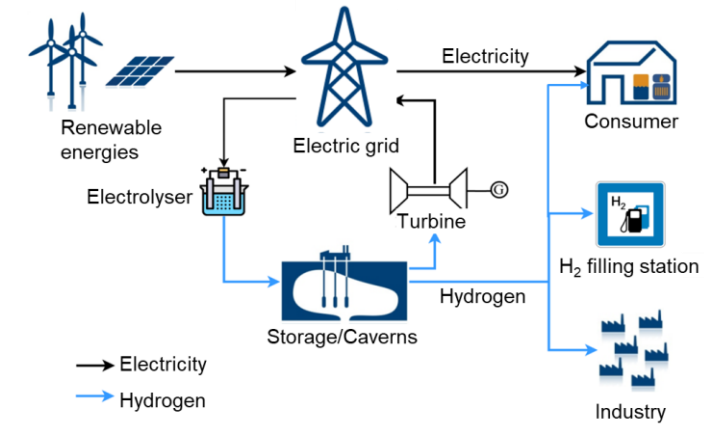
## Zusammenfassung und Fazit

Zentrale Rolle von H<sub>2</sub> im zukünftigen Energiesystem:

- Mit grünem Strom aus Wasser synthetisierbar
- Langfristig und in großen Mengen speicherbar
- Im Gasnetz transportierbar
- Vielseitig einsetzbar in den Sektoren Energie, Verkehr, Industrie und Wärmebereitstellung
- H<sub>2</sub> erhöht die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems (Transformationsmodelle)

Vielfältige Optionen der Ausgestaltung der Sektorenkopplung mit H<sub>2</sub>:

- Dezentrale/Zentrale Konzepte
  - Effizienzsteigerung durch Wärmeintegration
  - Verschwinden klassischer Sektorengrenzen (BZ-Fahrzeug wird zum Kraftwerk)
  - Weitere Energieträger neben H<sub>2</sub> (SNG, SynFuels)
- Technologieoffenheit erforderlich um wirtschaftlich und technisch beste Gesamtlösungen zu identifizieren!
- H<sub>2</sub> ersetzt nicht einfach fossile Energieträger, Sektorenkopplung mit H<sub>2</sub> erfordert „Neudenken“ des Energiesystems!



# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



Andreas Rosenstiel

DLR-Institut für Future Fuels

[andreas.rosenstiel@dlr.de](mailto:andreas.rosenstiel@dlr.de)

[www.dlr.de/ff](http://www.dlr.de/ff)

[www.dlr.de/content/de/dossiers/2020/wasserstoff.html](http://www.dlr.de/content/de/dossiers/2020/wasserstoff.html)

Vielen Dank an alle Koautor\*innen:

Martin Vehse (DLR-Institut für Vernetzte Energiesysteme)

Florian Peterssen (ISFH)

Christoph Kost, Christopher Voglstätter (Fraunhofer ISE)

Thomas Kolb, Thomas Jordan (KIT)

Frazer Musonda, Daniela Thrän (UFZ)



# Literatur

- 1) Sterchele, P., et al., *Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen*. 2020, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Freiburg.  
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>
- 2) [Statista, Ausfallarbeit]: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/617949/umfrage/einspeisemanagement-in-deutschland>
- 3) Weitemeyer, S.; Kleinhans, D.; Wienholt, L.; Vogt, T.; Agert, C.: A European perspective: Potential of grid and storage for balancing renewable power systems, *Energy Technology*, 4(1), 114–122, (2016)  
doi:10.1002/ente.201500255
- 4) Peters, D.; Börries, S.; Völker, R.; Greulich, M.; Schuldt, F. und von Maydell, K.: *Einspeisemanagement in der enera Region, Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien*, Berlin, (2018)
- 5) Brendel, R.; Peterssen, F.; Schlemminger M., Niepelt, R.; Hanke-Rauschenbach, R.: *Simulative Kurzstudie zum Einsatz von Wasserstofftechnologie in Niedersachsen*, <https://isfh.de/publikationen/berichte/>
- 6) Agert, C.; Brand, U.; Deniz, Ö.; Dyck, A.; Ehrenberger, S.; Gils, H. C.; Gomez Trillos, J. C.; Jacobs, N.; Junne, T.; Kallo, J.; Kröner, M.; Kutne, P.; Lorenz, T.; Naegler, T.; Oswald, M.; Pagenkopf, J.; Pregger, T.; Riedel, U.; Simon, S.; Steck, F. Vogt, T. und Zobel, M.: *Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 2: Sektorenkopplung und Wasserstoff - Zwei Seiten der gleichen Medaille*. (2020), <https://elib.dlr.de/139867/>