

PEM-Elektrolyse als Technologie zur Verbindung der Sektoren Strom, Gas und Wärme

Dr.-Ing. Clemens Schneider, Fraunhofer IEG
19.02.2026

Inhalt

01 Vorstellung Fraunhofer IEG

02 Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H2giga

03 Verbindung zum Wärmesektor und Wärmebedarfe in Deutschland

04 Das Projekt IntegrH2ate

Inhalt

01 Vorstellung Fraunhofer IEG

02 Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H2giga

03 Verbindung zum Wärmesektor und Wärmebedarfe in Deutschland

04 Das Projekt IntegrH2ate

Fraunhofer IEG – Forschungsfelder im Überblick

»Wir gestalten die klimaneutralen Energiesysteme der Zukunft«

- Integrierte **Energieinfrastrukturen**
 - Transport-/Übertragungs- und **Verteilnetze**
 - Sektorengekoppelte, integrierte **Quartiersplanung** (Open District Hub)
 - **Wasserstoffinfrastrukturen** (Netze und Speicher)
 - **Systemtransformation** und Technologietransfer
- Exploration und Erschließung von **Georessourcen**
 - **Geothermale Energie**, flache bis tiefe geothermale Systeme
 - **Geotechnologien**, Bohrtechnologien und -verfahren
 - **Untergrundspeicher** für Stoffe und Energien, Bergbaufolgenutzung
 - Carbon Capture & Storage/Utilization (**CCS/CCU**)
- Einbindung **thermodynamische Wandler zur Wärmeversorgung**
 - Entwicklung von **Hochtemperatur-Wärmepumpen**
 - **Wärme-/Kältenetze** der 4. und 5. Generation
 - **Wärme-/Kältequellen** und -speicher
- **Steuerung, Regelung, Automatisierung** & Betriebsführung von Energiesystemen
 - Dezentrale, **intelligente Netze** und Systeme
 - Integrierte **Gebäudeenergietechnik**



Inhalt

01 Vorstellung Fraunhofer IEG

02 **Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H2giga**

03 Verbindung zum Wärmesektor und Wärmebedarfe in Deutschland

04 **Das Projekt IntegrH2ate**

Elektrolyseurentwicklung

- Neue Stack-Generationen in Bezug auf Kosten, Performance und Lebensdauer signifikant weiterentwickelt
- AEL: Druck-Alkali Elektrolyseur mit 30 bar, 20 MW und 30 % reduzierten Herstellungskosten
- HTEL: Neue Stack-Designs, Module bis 10 MW, 10.000 h Dauertest bei verbesserter Leistung und niedriger Degradation
- PEM: Flourfreie Membran im Dauertest mit 2000 h und vergleichbare Leistung mit PFAS-Membran
- PEM: Membran-Elektroden-Einheit (MEA) effizienter und bis zu achtmal weniger Iridium
- PEM: Verbesserung und Vereinfachung des Systemperipherie (Gas-Flüssig-Trennung und Wasserstoff-Aufreinigung)
- PEM: Versuchsanlage zur Untersuchung von Degradations- und Schadensmechanismen im Industriemaßstab am FZJ
- AEM: Erste Anlage im MW-Bereich mit 420 Stacks sehr flexibel regelbar

Scale Up und Serienfertigung

- Skalierung von Anlagen in GW-Maßstab
- Methoden zur automatisierten Serienfertigung von Komponenten, Zellen und für das Stack-Assembling entwickelt
- Zell- und Stack-Design wurden auf die Eignung für Scale-up und ein Design for Manufacturing hin optimiert
- Automatisierte Stack-Fertigung besonders für AEL und PEM
- Fertigungskapazität von mehr als 19 GW/a in Deutschland bis 2030 sichergestellt

Offene Querschnittsthemen

- kritische Verfügbarkeit von Iridium sobald pro Jahr global mehr als 20 GW PEM-Elektrolyseure vermarktet
- → Recycling: offene Forschungsfragen in Demontage, Rückgewinnung, Konzepte zur Wiederverwendung von Einzelteilen, Recycling usw.
- Verbesserung von Lebensdauerprognosen und Prüfungen unter realitätsnahen Betriebsbedingungen (Senkung CAPEX)
- Erhöhung für Langzeitstabilität und Systemleistung in den Bereichen Material, Design, Betrieb

- Betriebssicherheit verbessern und damit technische Risiken des Betriebs im großen Maßstab minimieren
- Integration von Elektrolyseuren in volatilen Strombezug in Bezug auf Stack, Systemkomponenten und Steuerung dem umgebenden System (Strom, Wärme, Gas)
- Für PEM-Elektrolyseure: PFAS-Austrag vollständig zu vermeiden → Langfristig: Forschung und Entwicklung für fluorfreie Membranen und Ionomere
- Skalierung und Kostensenkung bei Ely-Technologien mit hohem TRL (AEL, PEM) sowie Weiterentwicklung Elektrolysetechnologien mit niedrigerem TRL (HTEL, AEM-Elektrolyse)

Nutzungsoptionen der Elektrolyseprodukte

Gefördert durch:



Wasserstoff

- Speicherung
- Rückverstromung in Brennstoffzellen
- Hochtemperaturprozesse
- Stahlherstellung
- Mathanisierung
- Methanolsynthese
- Ammoniaksynthese

Sauerstoff

- Sekundärstahlherstellung
- Chemieindustrie
- Raffinerie
- Lebensmittelindustrie
- Kupferraffinierung
- Zementherstellung
- Medizin
- Abwasserbehandlung

Wärme

- Prozesswärme in
 - Chemieindustrie
 - Lebensmittelindustrie
 - Papier- und Textilindustrie
 - Raffinerieprozessen
- Heizwärme
 - Nah- und Fernwärme

Inhalt

01 Vorstellung Fraunhofer IEG

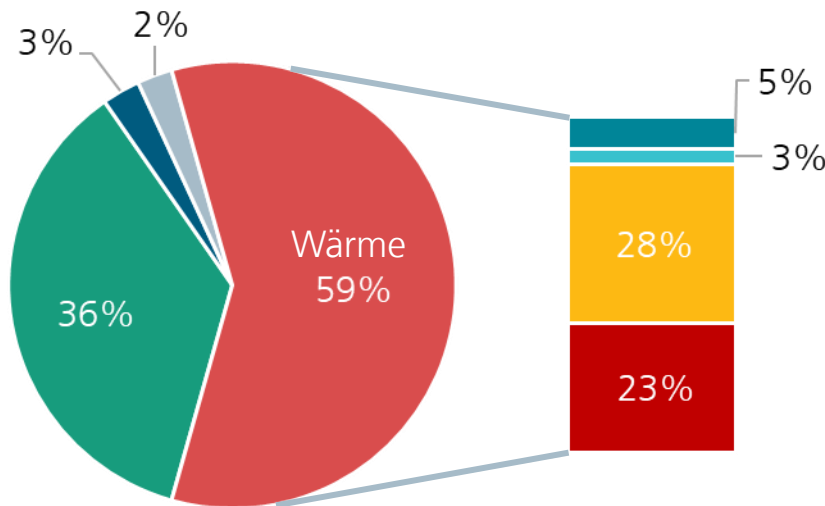
02 Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H2giga

03 Verbindung zum Wärmesektor und Wärmebedarfe in Deutschland

04 Das Projekt IntegrH2ate

Energie- und Wärmebedarf in Deutschland

Endenergiebedarf 2021: 2.406 TWh/a
(Vergleich 10.000 kWh = 0,00001 TWh)



■ Mechanische Energie
■ Beleuchtung
■ IKT
■ Kühlung
■ Prozesswärme
■ Warmwasser
■ Raumwärme

Status Quo (2021)

Wärme/Kälte 1.403 TWh/a

Raumwärme	674	TWh/a
Prozesswärme	543	TWh/a
Warmwasser	132	TWh/a
Kühlung	64	TWh/a

Städtischer Wärmebedarf:

- Raumwärme 674 TWh/a
- Warmwasser 132 TWh/a

Gesamt (städtisch): 806 TWh/a

Industrieller Wärmebedarf

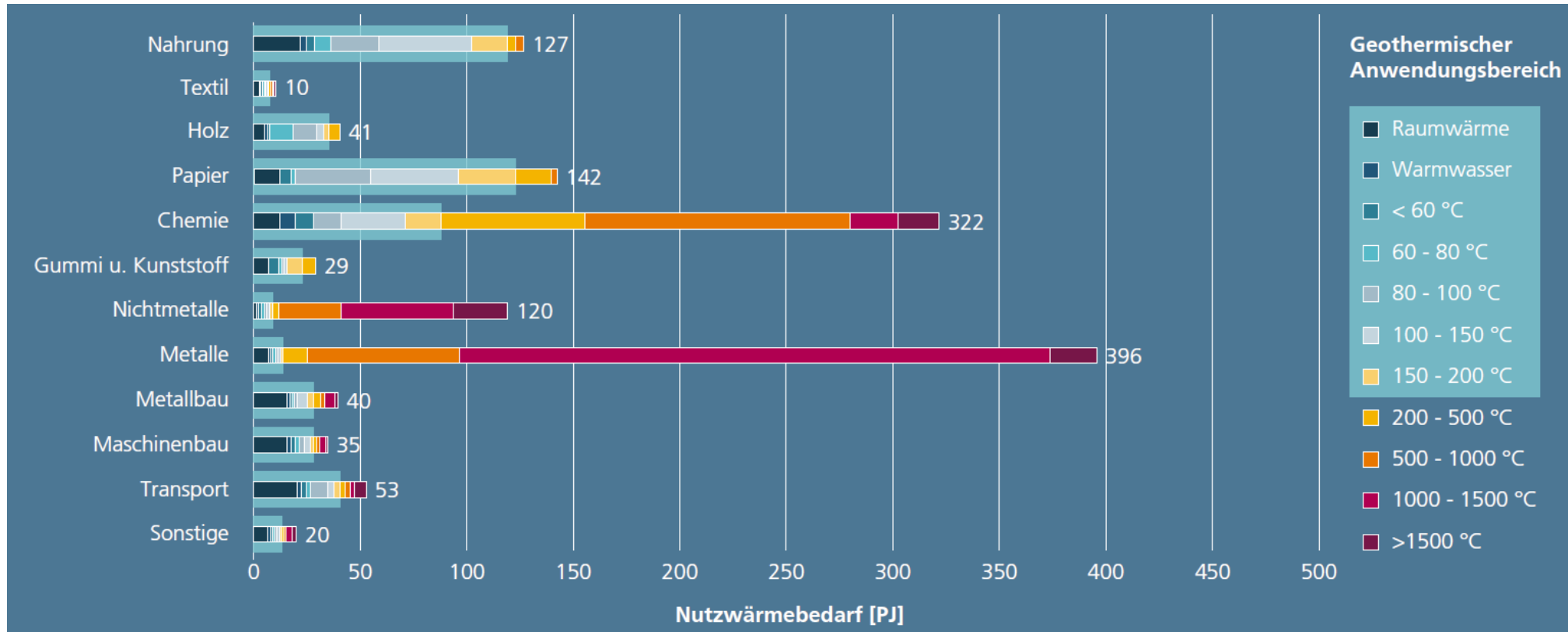
- Prozesswärme 543 TWh/a
- Prozesskühlung 54 TWh/a

Gesamt (industriell): 597 TWh/a

- Wärme wird in Deutschland noch größtenteils fossil erzeugt
- Wärmebedarfe bis 200 °C (ca. 80% des gesamten Wärmebedarfs) sind verantwortlich für 3/4 des deutschen Gasverbrauchs und über 1/4 der deutschen Emissionen (2021)

[Quelle: AGEb]

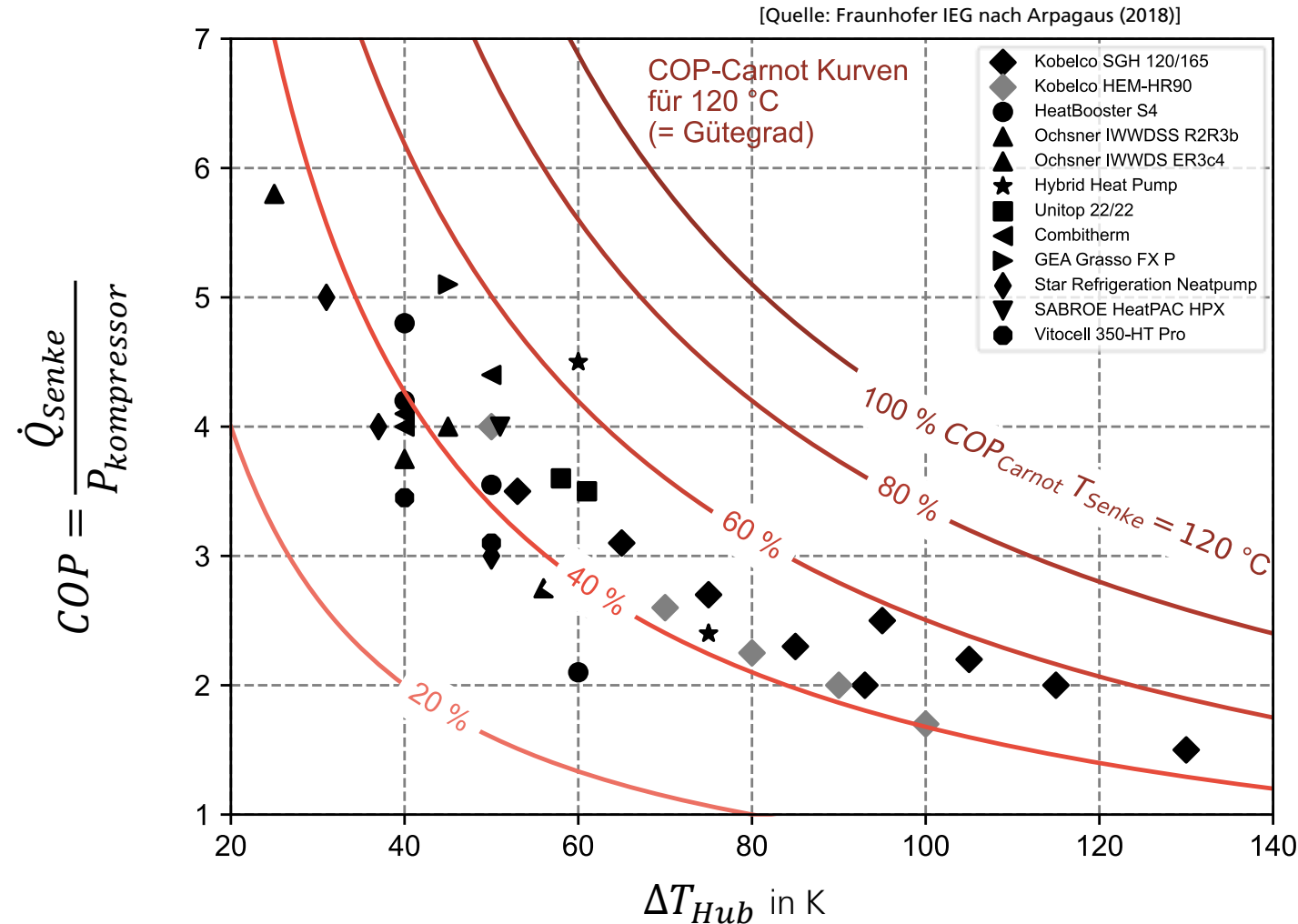
Wärmebedarfe in der Industrie



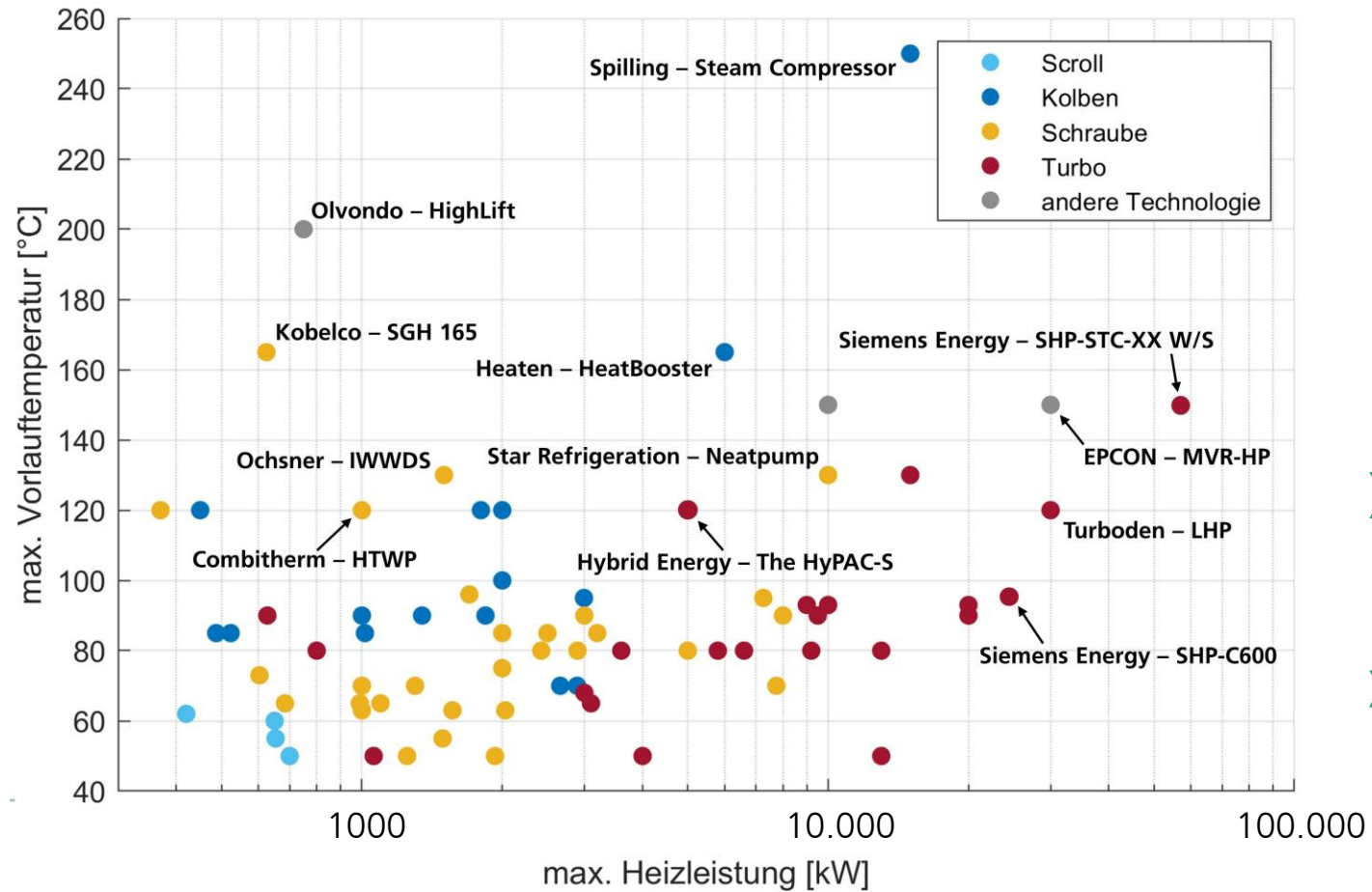
→ Rund 25% der Prozesswärme wird unter 200°C benötigt und kann über Hochtemperatur-Wärmepumpen erzeugt werden

Effizienz von Hochtemperatur-Wärmepumpen

- Beispielhaftes Diagramm: Fernwärmenetz bei 120 °C bei Variation der Quellentemperatur
- Wie bei „kleinen“ Wärmepumpen: COP sinkt mit steigendem Temperaturhub
- Temperatur der Wärmequelle ist für Effizienz und Wirtschaftlichkeit entscheidend
- Beispiel: Abwärme auf 60°C, Fernwärme auf 120°C:
 - $\Delta T = 60K$
 - $COP \approx 3$
 - Aus 1 kWh Strom werden 3 kWh Wärme



Verfügbare Groß- und Hochtemperatur-Wärmepumpen



[Quelle: Fraunhofer (2023)]

Prozesswärme:

- Forschungs- und Entwicklungsprojekte
- Kaum Produkte etabliert
- Erste Prototypen in der Anwendung

Fernwärme:

- Technologie ausgereift
- Umsetzungsprojekte

Raumwärme

Inhalt

01 Vorstellung Fraunhofer IEG

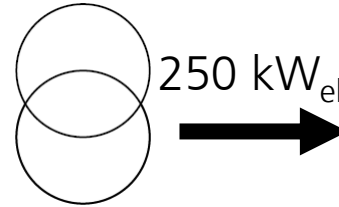
02 Ergebnisse aus dem Wasserstoff-Leitprojekt H2giga

03 Verbindung zum Wärmesektor und Wärmebedarfe in Deutschland

04 Das Projekt IntegrH2ate

Experimentelle Untersuchung und Modellvalidierung der Nutzung von Nebenprodukte Wärme und Sauerstoff an konventionellen H₂ Erzeugungsanlagen

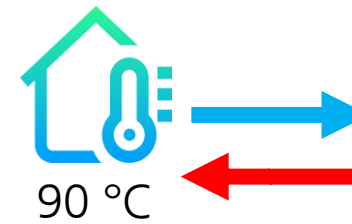
- Nachweis der gekoppelten Betriebsweise eines PEM Elektrolyseurs mit einer Wärmepumpe
- Entwicklung skalierbarer Simulationsmodelle zur Systemauslegung von Wärmepumpensystemen
- Betriebsstrategien für die dynamische Bereitstellung von Wärme, Sauerstoff und Wasserstoff
- Validierung der Simulationsergebnisse am skalierten Versuchsaufbau für Großanlagen
- Aufbau am Standort Zittau



70 – 80 kW_{th}

55°C

50 - 52°C



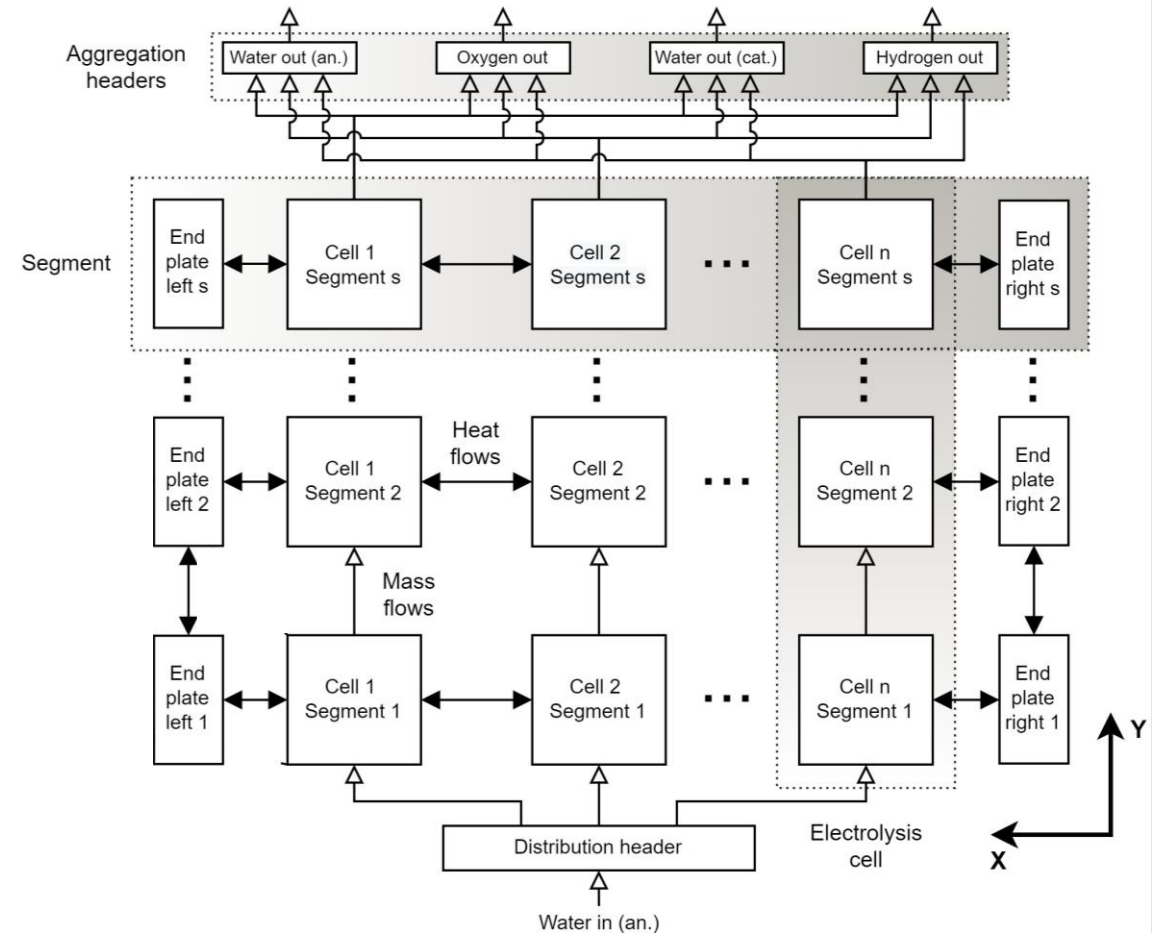
Simulation der Abwärmeaufwertung

Ziel: Entwicklung eines Modells zur simulativen Untersuchung der Abwärmeaufwertung aus der PEM-Elektrolyse

Ergebnisse:

- Entwicklung eines Quasi-2D-Simulationsmodells & Validierung an einem 1-kW-Stack der Hochschule Bremen [1]

[1] Reimann, A.; Kohlenbach, P.; Röntzsch, L. & Schneider, C. (2025): Development and validation of a quasi-2D electrolysis stack model with a focus on dynamic thermal behavior. International Journal of Hydrogen Energy.



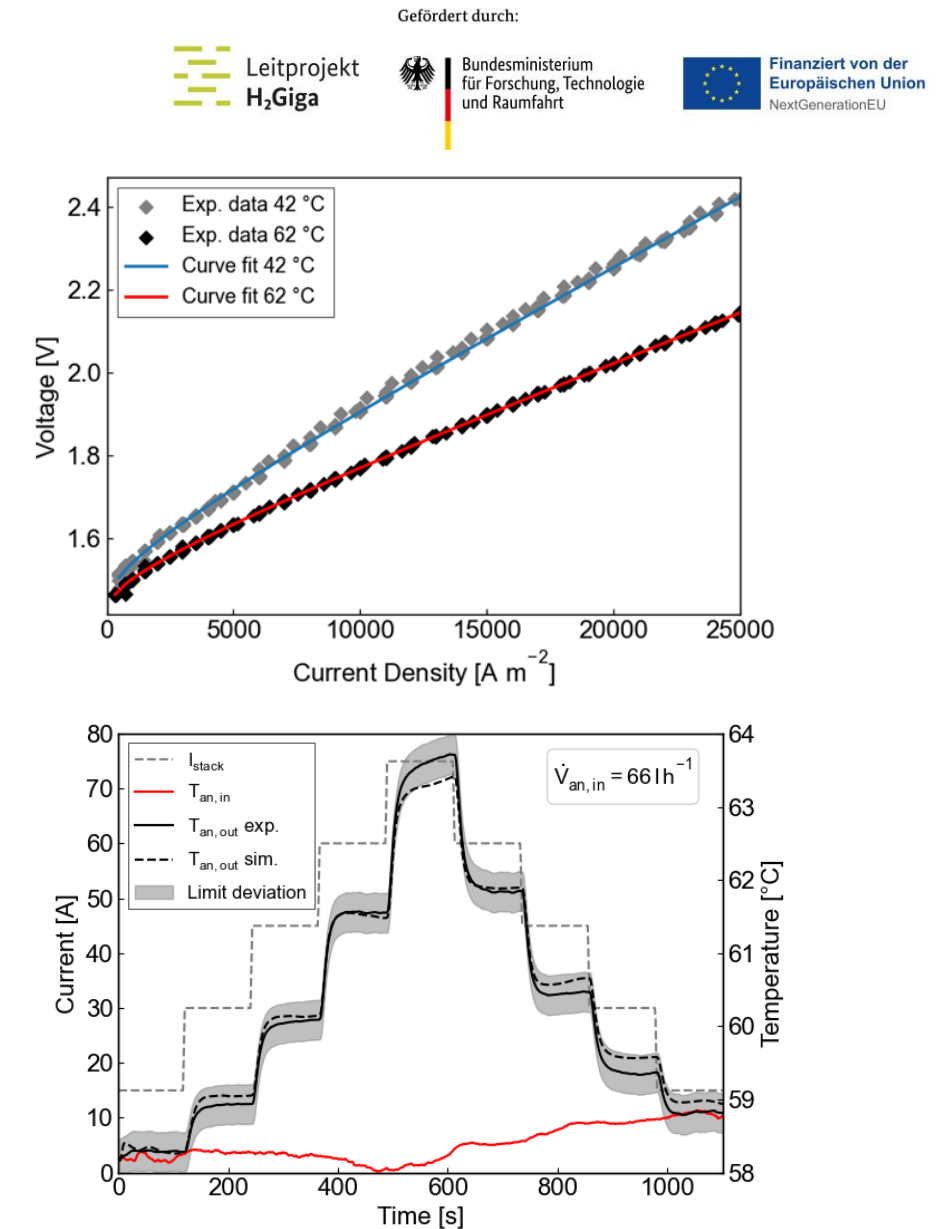
Simulation der Abwärmeaufwertung

Ziel: Entwicklung eines Modells zur simulativen Untersuchung der Abwärmeaufwertung aus der PEM-Elektrolyse

Ergebnisse:

- Entwicklung eines Quasi-2D-Simulationsmodells & Validierung an einem 1-kW-Stack der Hochschule Bremen [1]

[1] Reimann, A.; Kohlenbach, P.; Röntzsch, L. & Schneider, C. (2025): Development and validation of a quasi-2D electrolysis stack model with a focus on dynamic thermal behavior. International Journal of Hydrogen Energy.



Simulation der Abwärmeaufwertung

Ziel: Entwicklung eines Modells zur simulativen Untersuchung der Abwärmeaufwertung aus der PEM-Elektrolyse

Ergebnisse:

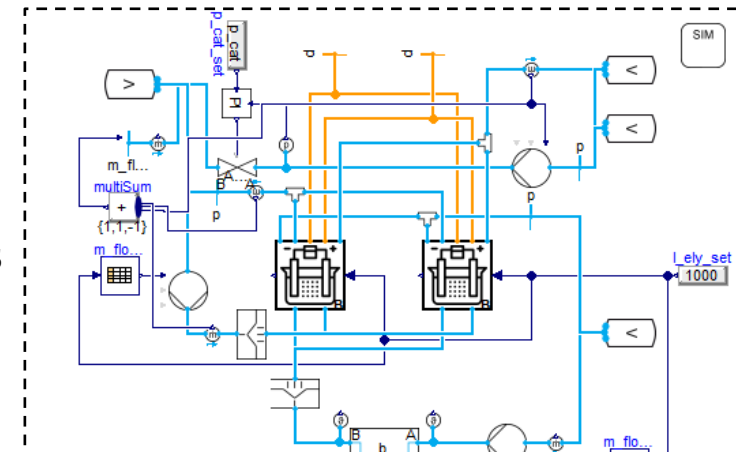
- Entwicklung eines Quasi-2D-Simulationsmodells & Validierung an einem 1-kW-Stack der Hochschule Bremen [1]
- Aufbau & Parametrisierung des Simulationsmodells der Versuchsanlage
- Nächster Schritt: Umfassende Validierung nach Inbetriebnahme der Versuchsanlage

[1] Reimann, A.; Kohlenbach, P.; Röntzsch, L. & Schneider, C. (2025): Development and validation of a quasi-2D electrolysis stack model with a focus on dynamic thermal behavior. International Journal of Hydrogen Energy.

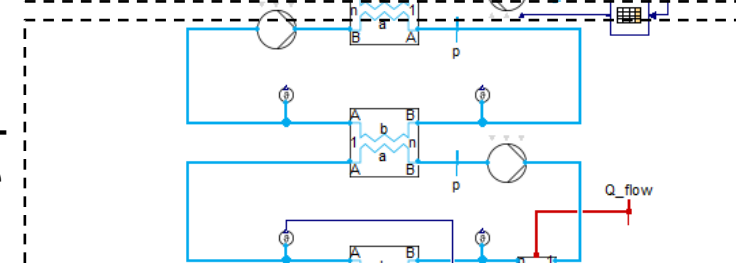
Gefördert durch:



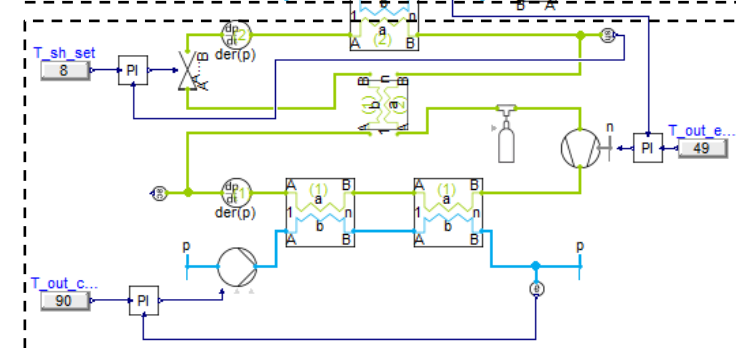
BoP PEM-Elektrolyse



Zwischenkreisläufe



Wärmepumpe

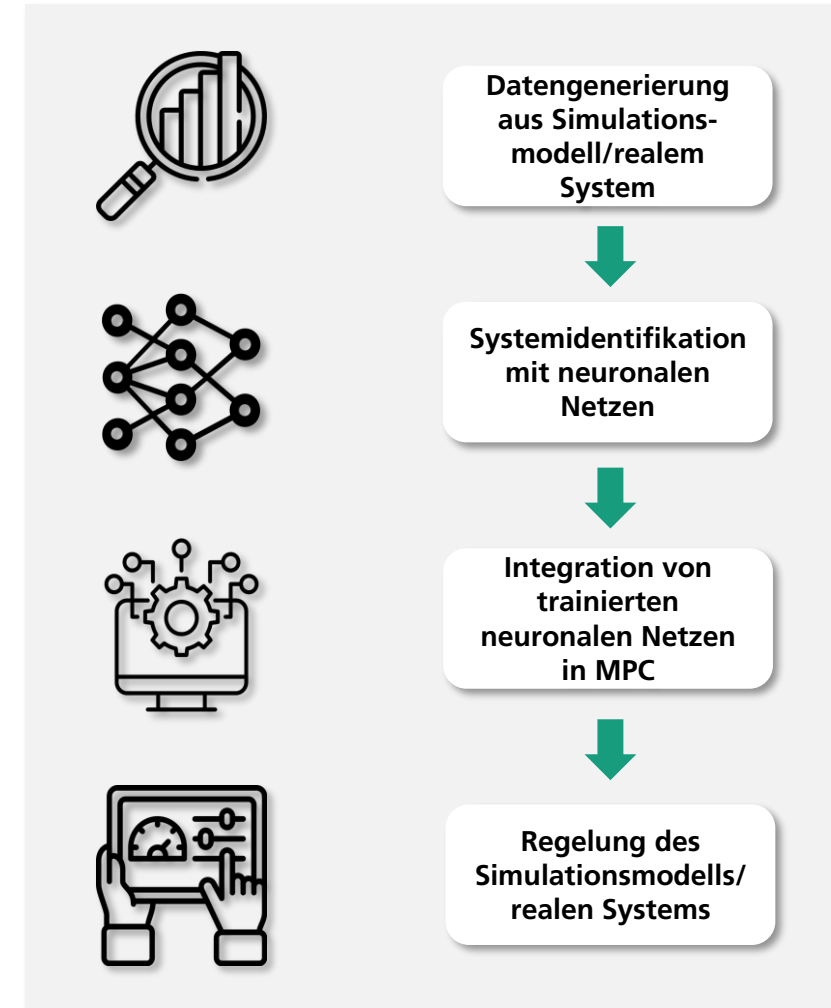


Ziel: Entwicklung einer Regelungsstrategie für das gekoppelte System unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsarten des Elektrolyseurs

Ergebnisse:

- Entwicklung einer modellprädiktiven Regelungsstrategie (MPC) auf Grundlage neuronaler Netze [2]

[2] Reimann, A.; Kohlenbach, P.; Röntzsch, L. & Schneider, C. (2025): Neural network-based model predictive control for waste heat recovery from PEM electrolysis with heat pumps. Energy Conversion and Management (In Review).

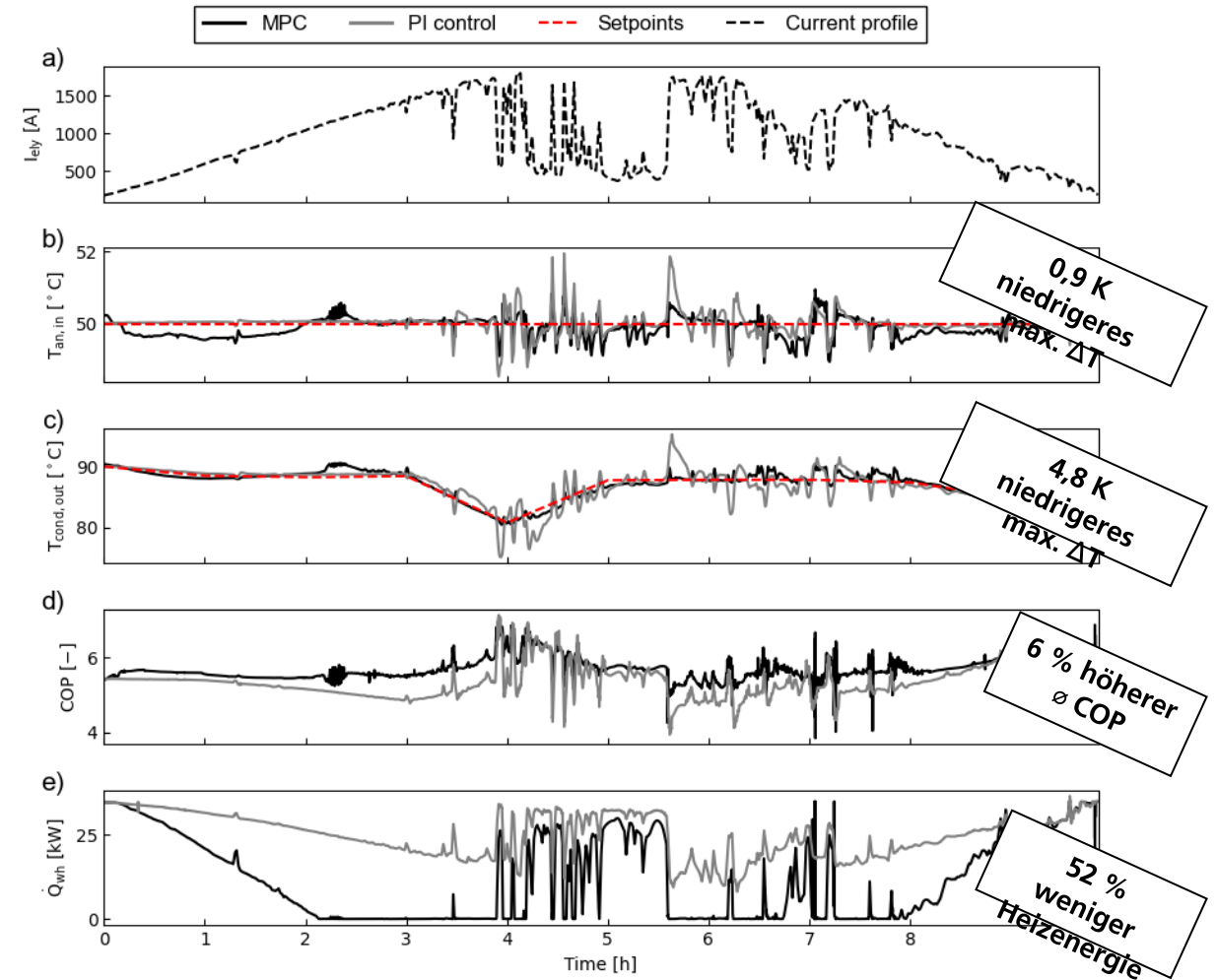


Ziel: Entwicklung einer Regelungsstrategie für das gekoppelte System unter Berücksichtigung der verschiedenen Betriebsarten des Elektrolyseurs

Ergebnisse:

- Entwicklung einer modellprädiktiven Regelungsstrategie (MPC) auf Grundlage neuronaler Netze [2]
- Software-in-the-Loop-Validierung und Vergleich mit PI-Regelung
- Nächster Schritt: Anwendung auf die Versuchsanlage

[2] Reimann, A.; Kohlenbach, P.; Röntzsch, L. & Schneider, C. (2025): Neural network-based model predictive control for waste heat recovery from PEM electrolysis with heat pumps. Energy Conversion and Management (In Review).

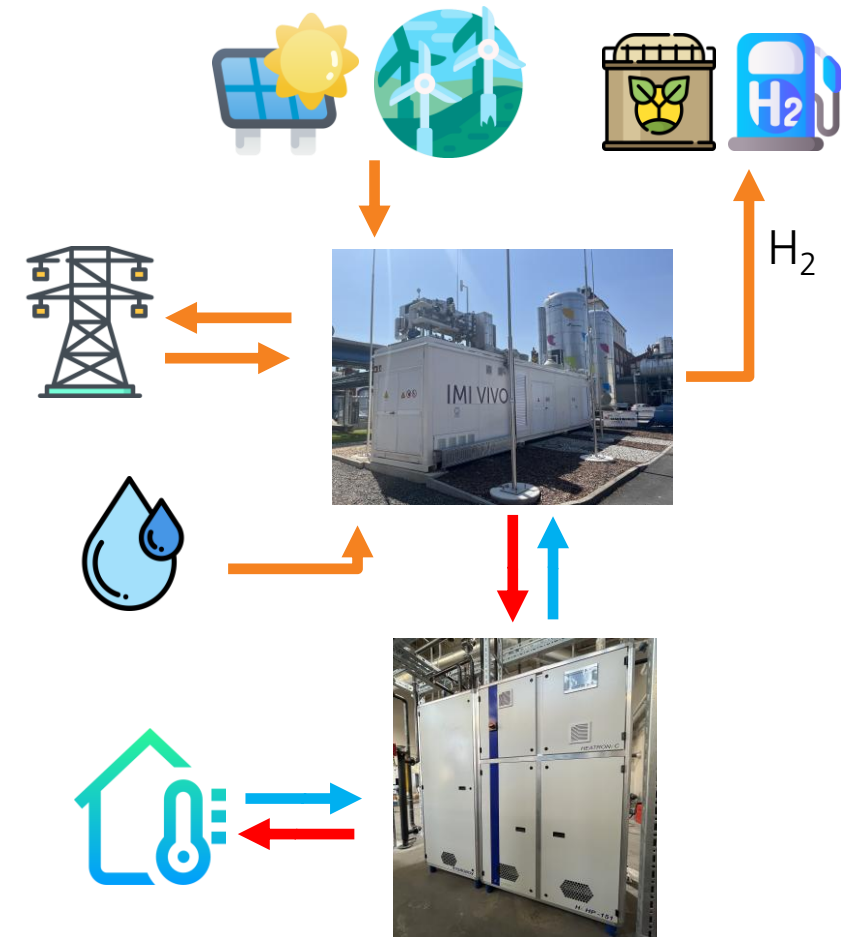


Projekt - IntegrH2ate – La-SeVe

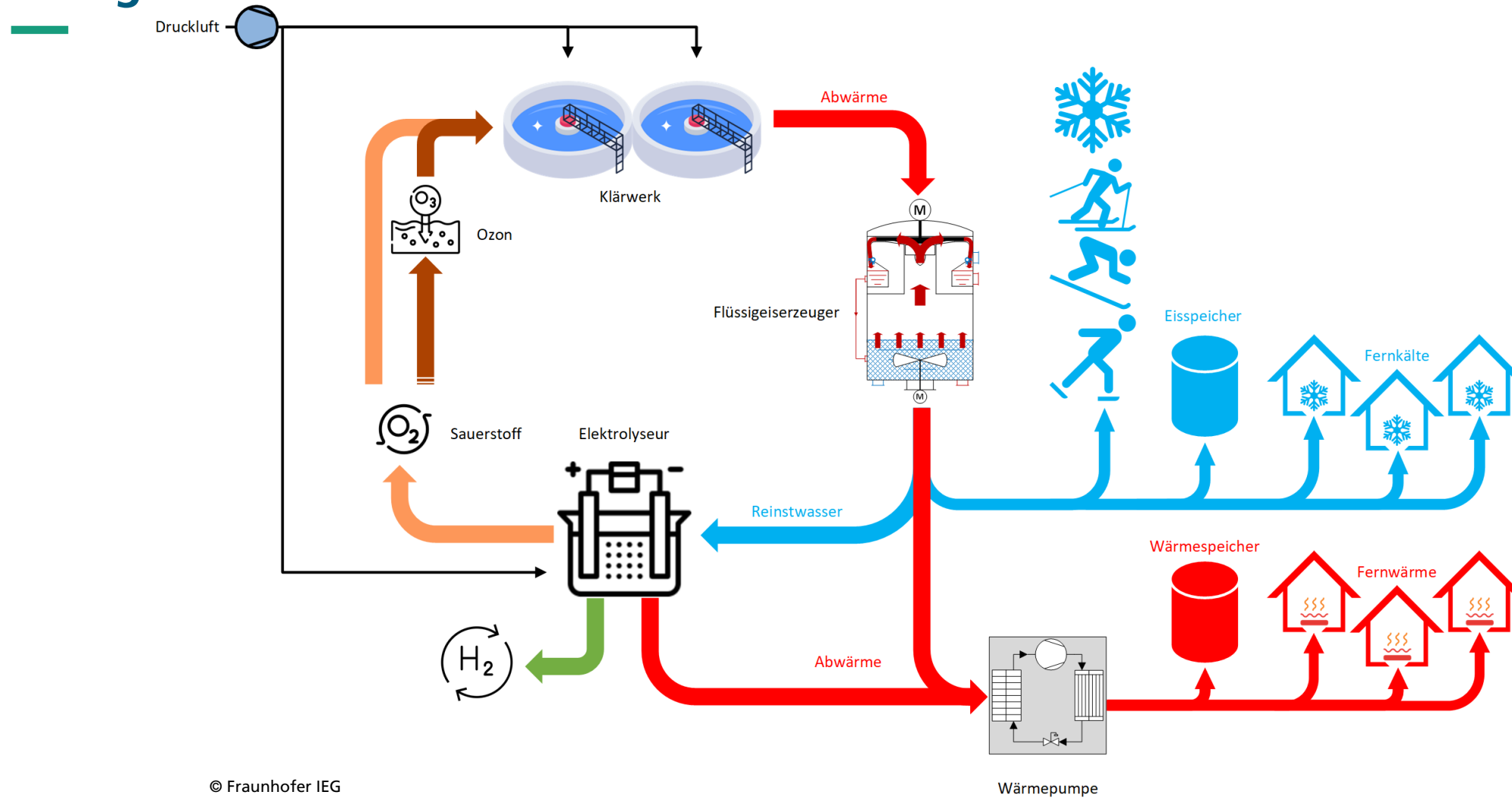
Gefördert durch:



- Grundlage für weitergehende sektorenübergreifende Fragestellungen
 - Biomethan + H₂ zur Produktivitätserhöhung und CO₂-Methanisierung
 - Erprobung von Wasserstoff- und Sauerstofftechnologien (Verdichtung, Speicherung, Reinigung, Verbrennung)
 - Monitoring, Steuerung und Regelung sektorenkoppelter Betriebsweisen zur Integration unterschiedlicher Wärmequellen, -Senken und Speicherpotentiale
 - Sauerstoffnutzung in Kläranlagen und Krankenhäusern
 - Kondensat aus Flüssigeisergezeuger AQVA-heat als Nebenprodukt für Elektrolyse



Projekt - IntegrH2ate – Anschlussvorhaben NEXUS-Wasser-Energie



© Fraunhofer IEG

Inbetriebnahme der Versuchsanlage La-SeVe

Leitprojekt
H₂Giga

Gefördert durch:



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU



© Paul Glaser/Fraunhofer IEG

Inbetriebnahme der Versuchsanlage La-SeVe

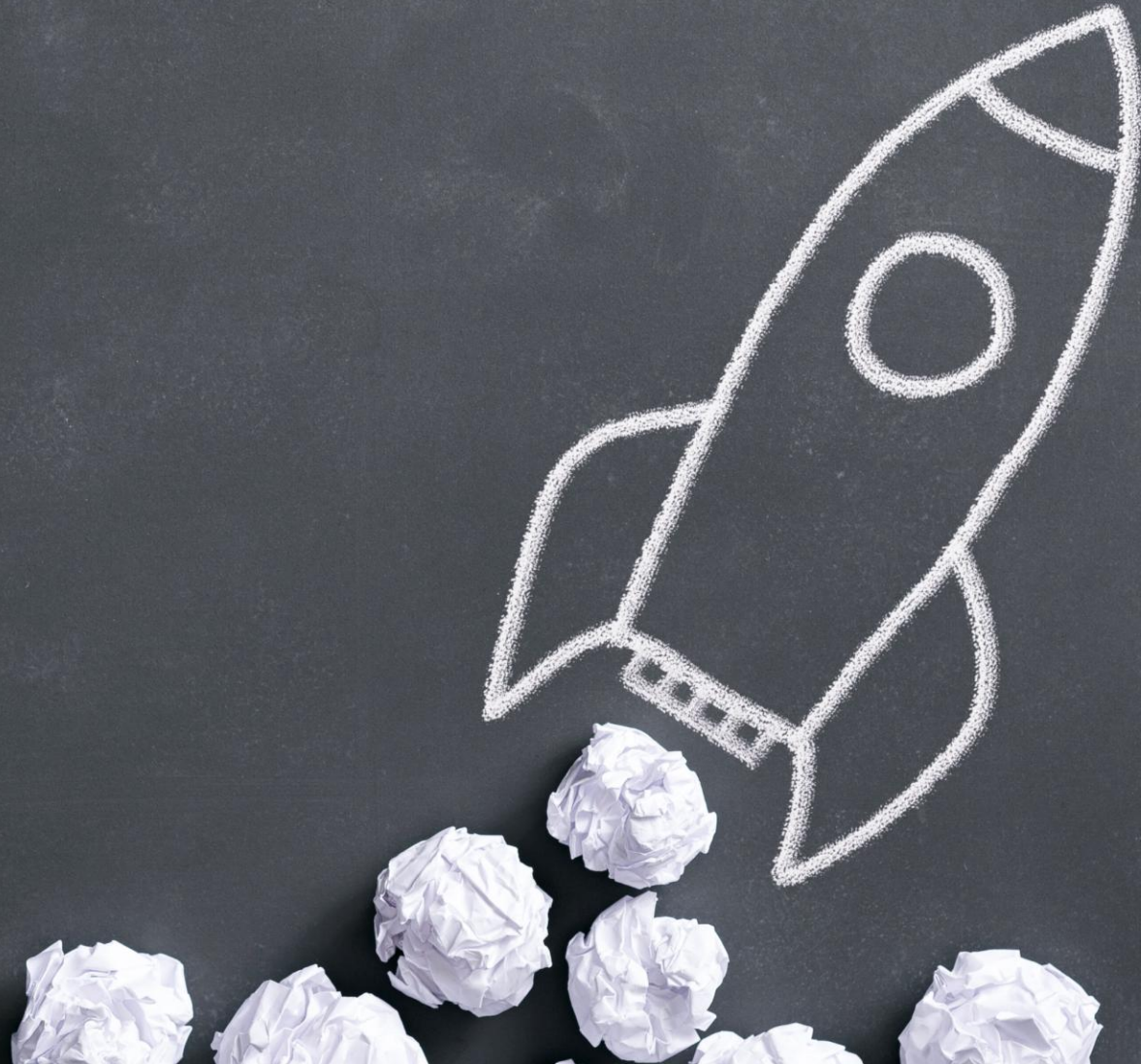
Gefördert durch:



© Paul Glaser/Fraunhofer IEG



—
Fragen?



© iStck.com/Thomas Vogel

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Dr.-Ing. Clemens Schneider
Clemens.schneider@ieg.fraunhofer.de

Fraunhofer IEG
Äußere Oybiner Straße 16
02763 Zittau
www.ieg.fraunhofer.de