

Dezentrales Wasserstoff-Microgrid für Forschung, Lehre und Transfer an der Hochschule Reutlingen

**Daniel Jentsch, Martin Winter, Mohamad Hazem Aref, Anian Bühler,
Antony Dominic, Bernd Petereit, Karin Pfister, Bernd Strohmaier,
Gernot Schullerus , Bernd Thomas, Thorsten Zenner**

Reutlinger Energiezentrum, Hochschule Reutlingen, Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen,
+49 7121 2717036, daniel.jentsch@reutlingen-university.de,
www.tec.reutlingen-university.de/forschung/rez-reutlinger-energiezentrum

Kurzfassung:

Auf dem Weg zur Klimaneutralität wird das deutsche Energiesystem vom zentralisierten Großkraftwerk-Modell zu dezentralen, fluktuierenden erneuerbaren Energiesystemen transformiert. Um Versorgungssicherheit zu gewährleisten, werden flexible Verbraucher, Erzeuger und Speicher zu Schlüsseltechnologien. Insbesondere Wasserstoffspeicher können saisonale Energiemengen aufnehmen. Der Aufbau, Betrieb und die Regelung solcher Wasserstoffsysteme sind zentrale Forschungsfragen der nächsten Jahre.

Die Hochschule Reutlingen hat eine vollständige Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut und forscht an diesen Fragestellungen. Das System verbindet bislang isoliert betrachtete Methoden, Modelle und Konzepte erstmals in einem integrierten Rahmen und macht ihre Wechselwirkungen experimentell sichtbar.

In diesem Beitrag wird die Infrastruktur des Reutlinger Wasserstoff-Microgrids als experimentelle Forschungsplattform vorgestellt. Sie adressiert vier zentrale Forschungsfragen:

- (1) Analyse der Wasserstoffqualität mittels kontinuierlicher und diskontinuierlicher Messtechniken;
- (2) Entwicklung dezentraler Betriebsstrategien durch selbstorganisierende Algorithmen;
- (3) Auslegung und Betriebsführung hybrider Batterie-Wasserstoff-Systeme;
- (4) Standardisierte Quantifizierung der Flexibilität wasserstoffbetriebener Geräte über verschiedene Betriebszustände.

Der Mehrwert dieser Forschung liegt in der erstmaligen hardware-validierten Integration dieser vier Forschungsfelder in einer einzigen Infrastruktur.

Keywords: Wasserstoff, Microgrid, Optimierung, Betriebscharakteristik, Flexibilisierung

1 Einleitung und Forschungsstand

Das deutsche Energiesystem befindet sich in einer strukturellen Transformation. Dabei werden zentrale, fossile Großkraftwerke zurückgebaut und dezentrale, fluktuierende erneuerbaren Energiequellen wie Wind- und Photovoltaik (PV) vermehrt genutzt [1]. Die damit verbundene Volatilität und Dezentralisierung stellen neue Anforderungen an die Systemstabilität und Netzregelung [2]. Zwei komplementäre Technologien adressieren diese Herausforderungen: Batteriespeicher puffern Energie kurzfristig im Sekunden- bis Stundenbereich; Wasserstoffspeicher dienen als langfristige und saisonale Speicher mit sektorenübergreifenden Anwendungen in Wärme, Mobilität und Industrie [3]. Die Kombination beider Technologien ist vielversprechend, doch die simultane Auslegung und Betriebsführung hybrider Systeme ist wissenschaftlich noch wenig erforscht.

Eine weitere Forschungslücke ist die fehlende Hardware-Validierung dezentraler Konzepte [4]. Algorithmen für dezentralisierte Betriebsführung, wie z.B. modellprädiktive Regelung und schwarmbasierte Optimierung, wurden bislang primär in der Simulation getestet. Ein realer Versuchsaufbau mit mehreren heterogenen Wasserstoffsystemen ermöglicht die praktische Validierung unter unterschiedlichen Realbedingungen.

Zudem ist die Charakterisierung der Flexibilität wasserstoffbetriebener Systeme zu Energieerzeugung, wie Brennstoffzellen oder Blockheizkraftwerken (BHKW), unzureichend [5]. Die Flexibilität von wasserstoffbetriebenen Geräten ist nicht standardisiert quantifizierbar und deshalb schlecht vergleichbar. Zudem fehlen reale Messdaten. Dies behindert die Planung von Energiesystemen mit hohem Wasserstoffanteil.

Ferner werden die Gasanalytik, die Modellierung und die Betriebsführung meist isoliert betrachtet. Eine integrierte Infrastruktur kann deren Wechselwirkungen sichtbar machen. Weitere Gründe, die für eine praxisbezogene Forschung sprechen, sind die fehlende vollständige Systemintegrationen von Erzeugern, Speichern, Transport und Verbrauchern in einem realen Aufbau.

Hinzu kommt, dass eine didaktische Aufbereitung der Ergebnisse zur Förderung der Akzeptanz in der Bevölkerung zumeist nicht mitgedacht wird.

Da insbesondere Forschungslücken zur praktischen Anwendung bestehen, wurde der Aufbau eines Wasserstoff-Microgrids, im Folgenden H2-MG genannt, an der Hochschule Reutlingen initiiert.

Das Reutlinger H2-MG unterscheidet sich von bisherigen Arbeiten durch die in Tabelle 1 dargestellten Merkmale:

Tabelle 1: Unterscheidungsmerkmale des H2-MG an der Hochschule Reutlingen verglichen mit anderen Forschungsarbeiten

Aspekt	Stand der Forschung	Reutlingen H2-MG
Systemintegration	Meist Einzelkomponenten-Demonstratoren	Integriertes, vollständiges Microgrid
Gasanalytik	Offline-Messungen oder einzelne Parameter	GC-MS (kontinuierliche ppm-Auflösung) und In-situ-Sensoren
Regelungvalidierung	Meist rein simulativ	Validierung im Realbetrieb
Betriebsflexibilität	Qualitativ beschrieben oder für einzelne Technologien	Standardisiertes Testkonzept für diverse Wasserstoff-Technologien
Modellvalidierung	Simulation mit generischen Annahmen	Experimentelle Parametrierung mit gemessenen Betriebsdaten
Didaktischer Mehrwert	Kaum berücksichtigt	Integrierte Teaching-Labore für die Hochschullehre und Schulprojekte

Somit ergeben sich vier zentrale Forschungsfragen, die das H2-MG adressiert:

F1: Wie können kontinuierliche und diskontinuierliche Gasanalytik kombiniert werden, um Wasserstoffqualität zuverlässig zu überwachen und die Anforderungen von Brennstoffzellen und BHKW sicherzustellen?

F2: Wie lassen sich dezentrale, selbstorganisierende Betriebsstrategien für heterogene Elektrolyseur-Flotten implementieren und unter realistischen Netzrandbedingungen validieren?

F3: Wie können Batteriespeicher und Wasserstoffspeicher in hybriden Systemen simultan optimal ausgelegt und betrieben werden? Mögliche Optimierungsziele sind dabei die Wirtschaftlichkeit und der Autarkiegrad.

F4: Wie unterscheiden sich die Flexibilitätscharakteristika (Startzeit, Rampenfähigkeit, Teillastbetrieb) von wasserstoffbetriebenen Geräten, und wie lassen sich diese standardisiert quantifizieren?

Ziel dieses Beitrags ist es, das H2-MG als integrierte Forschungsinfrastruktur vorzustellen und seinen Mehrwert für die vier zentralen Forschungsfelder zu zeigen. Im Abschnitt 2 wird das Wasserstoff-Microgrid detailliert beschrieben. Der Abschnitt 3 stellt Forschungsergebnisse aus vier Teilprojekten vor, bevor in Abschnitt 4 der Mehrwert für Forschung, Lehre und Gesellschaft diskutiert wird. Zum Schluss folgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

2 Vorstellung des Reutlinger Wasserstoff-Microgrids H2-MG

Das H2-MG besteht aus verschiedenen Teilsystemen: Wasserstoffherzeuger und Speicher, Wasserstoffverbraucher, Wasserstoffverteilung, sowie die zugehörige Mess- und Steuerungstechnik einschließlich der Datenerfassung.

Als Wasserstoffherzeuger sind eine 19,2 kW Anionenaustausch-Membran- (kurz AEM) - und eine 20 kW Protonenaustausch-Membran- (kurz PEM) Elektrolyse in einem Überseecontainer im Außenbereich installiert (vgl. Abbildung 1). Beide Elektrolyseure sind modular aufgebaut. Der AEM-Elektrolyseur besteht aus acht Stacks mit einer Leistung von jeweils 2,4 kW; die PEM-Elektrolyse ist aus zwei Stacks mit einer Leistung von jeweils 10 kW aufgebaut. Mit beiden Elektrolyseuren lassen sich ca. 19 kg Wasserstoff pro Tag erzeugen, die in vier Flaschenbündeln mit je 800 l Fassungsvermögen gespeichert werden können. Dabei dient eines der Flaschenbündel als Pufferbündel. Es wird direkt von den Elektrolyseuren mit dem Ausgangsdruck von ca. 30 bar befüllt. Die weiteren drei Bündel fungieren als Hochdruckbündel mit einem maximalen Druck von 300 bar. Ein Kompressor verdichtet den Wasserstoff, sobald der Druck im Pufferbündel zu hoch werden würde und speichert ihn in den Hochdruckspeichern. Umgekehrt wird das Pufferbündel ab einem ermittelten Schwellwert wieder von den Hochdruck-Bündeln befüllt. Die maximale Speicherkapazität beträgt ca. 65 kg, was einer Energiemenge (unterer Heizwert ist 33,33 kWh/kg) von über 2,166 MWh entspricht. Der Überseecontainer wird durch eine PEM-Brennstoffzelle mit 8 kW elektrischer Leistung ergänzt, mit welcher der erzeugte Wasserstoff rückverstromt werden kann.



Abbildung 1: Überseecontainer mit AEM- und PEM-Elektrolyse, sowie PEM-Brennstoffzelle. Rechts davon sind die vier Speicherbündel sowie der Kompressor zu sehen.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung des erzeugten Wasserstoffs ist durch die Anbindung an einen BHKW-Prüfstand innerhalb des Laborgebäudes gegeben. Dafür wurde eine Gasleitung mit einer Länge von ca. 100 m installiert, um den Pufferspeicher und den BHKW-Prüfstand miteinander zu verbinden. Die aus austenitischem, korrosionsbeständigem Stahl (EN 14435) bestehende Gasleitung wird mit dem Betriebsdruck vom Pufferspeicher betrieben, und ermöglicht die effiziente und direkte Nutzung des erzeugten Wasserstoffs ohne die Kompressionsverluste.

Die Abbildung 2 zeigt den BHKW-Prüfstand der Hochschule Reutlingen. Links ist der Prototyp des Mephisto G50H von der Firma „Kraftwerk dezentrale Energiesysteme GmbH“ mit 50 kW elektrischer und 100 kW thermischer Leistung zu erkennen. Rechts im Bild steht das kleinere BHKW Dachs Gen2 G5.5 von der Firma „SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH“ mit 5,5 kW elektrischer und 14,8 kW thermischer Leistung im Erdgasbetrieb. Das Dachs-Aggregat wurde mithilfe eines herstellenseitig bereitgestellten Umrüstkits für den Wasserstoffbetrieb adaptiert und betrieben. Im Wasserstoffbetrieb erreicht das Gerät eine maximale elektrische Leistung von 3,7 kW. Die verminderte maximale elektrische Leistung im Vergleich zum Erdgasbetrieb ist auf das hohe Verbrennungsluftverhältnis von $\lambda = 2,4$ zurückzuführen, bei dem der Brenngasanteil im Zylinder durch die Luftverdrängung begrenzt wird. Eine weitere Absenkung von λ ist aufgrund steigender NO_x -Emissionen und eines erhöhten Rückzündungsrisikos nicht möglich. Der Mephisto G50H ist hingegen als Neuanlage für den Wasserstoffbetrieb ausgelegt und mit einem Turbolader sowie einem Ladeluftkühler ausgestattet, wodurch auch bei hohen Luftverhältnissen eine ausreichende Zylinderfüllung sichergestellt ist. Die Erfassung der Emissionen, insbesondere der NO_x -Konzentrationen, erfolgt durch das auf dem Dachs installierte kontinuierliche Abgasmesssystem.



Abbildung 2: BHKW-Prüfstand mit dem Mephisto G50H (links) und dem auf Wasserstoff umgerüsteten Dachs Gen 2 G5.5 (rechts)

Erweitert wird das H2-MG durch einen zusätzlichen 2,4 kW AEM-Elektrolyse-Stack inklusive einer Analytik zu Prozessüberwachung. Dieser Elektrolyseur ist mit einer Batterie, einem PV-Wechselrichter, einer elektronischen Last sowie weiterer Messtechnik verbunden, um Erzeuger, Verbraucher und Speicher im Netz abzubilden. Alle Komponenten werden durch eine Speicher-Programmierbare Steuerung (SPS) gesteuert. Die anonymisierte Kommunikation erfolgt über das Netzprotokoll „Message Queuing Telemetry Transport“, kurz MQTT. Damit ist das gesamte H2-MG steuerbar und die für die Forschungsarbeit relevanten Daten können gespeichert und verarbeitet werden.

Eine Gasanalytik dient der Überwachung der Wasserstoffreinheit durch kombinierte Messverfahren. Die an dem 2,4 kW AEM-Elektrolyse-Stack angebrachten In-Situ-Sensoren ermöglichen eine kontinuierliche Echtzeiterfassung: Zur Erfassung des Sauerstoffanteils im Wasserstoff kommen zwei elektrochemische O₂-Sensoren vom Typ OxyTrans1 (PRO-CHEM ANALYTIK GmbH) zum Einsatz, die Messbereiche von 0 ppm bis 20 ppm sowie 0 % bis 1 % abdecken. Der Wassergehalt im Wasserstoff wird mit einem Feuchtigkeitstransmitter ProDew (Alpha-Moisture-Systems) erfasst, der den H₂O-Anteil über den Taupunkt im Bereich von 0,01 ppm bis 23 % misst.

Für eine präzise Detektion anderer Nebenbestandteile in einer Messung wird ein Gaschromatograph mit Massenspektrometer (GC-MS) als Detektor genutzt. Dieser GC-MS „GC2030“ von der Firma Shimadzu Deutschland GmbH kann relevante Nebenbestandteile (O₂, N₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O) einer sehr hohen Messgenauigkeit und Messwertauflösung erfassen, mit Bestimmungsgrenzen (LOQ) deutlich unter den gängigen ISO-14687-2-Grenzwerten.

Die Tabelle 2 stellt in der zweiten Spalte die LOQ für den GC-MS und in der dritten Spalte die geforderten Grenzwerte für die unterschiedlichen Substanzen dar. Diese Grenzwerte stammen aus der ISO 14687:2025 und gelten für PEM-Brennstoffzellen in stationären Anwendungen [6].

Tabelle 2: Bestimmungsgrenzen des GCMS vs. Grenzwerte nach ISO 14687 Typ I, Grad E, Kategorie 2

Substanz	LOQ GCMS in ppm	Grenzwerte in ppm nach ISO 14687 Typ I, Grad E, Kategorie 2
O ₂	1,0	50,0
Summe von N ₂ , Ar, He	1,0	1000,0
CO	0,1	0,2
CO ₂	1,0	2,0
CH ₄	5,0	100,0
H ₂ O	5,0	-

Die Abbildung 3 zeigt ein exemplarisches Chromatogramm des analysierten Wasserstoffs. Darin sind typische Verunreinigungen wie Stickstoff N_2 und Kohlenstoffdioxid CO_2 detektiert.

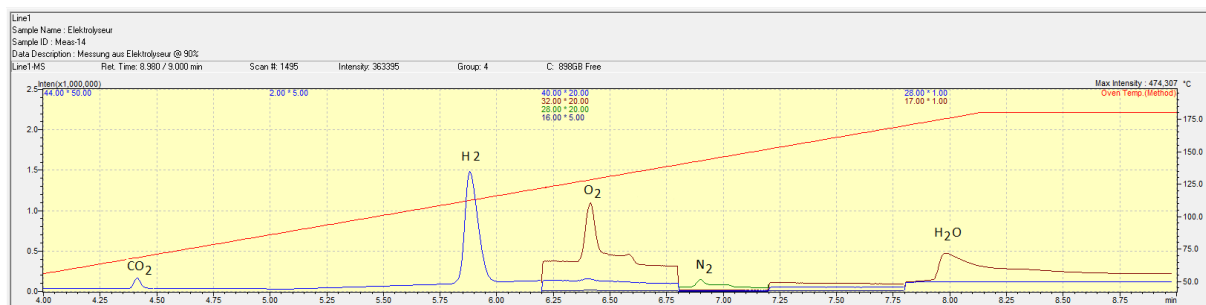


Abbildung 3: Exemplarisches Chromatogramm des GC-MS mit typischen Verunreinigungen im Wasserstoff

Nachteil dieser Messmethode ist die Messzeit von etwa 15 Minuten pro Messdurchgang. Die Bestimmung der Wasserstoffreinheit ist somit nur in längeren Zeitintervallen möglich und bietet deshalb keine kontinuierliche Messwerterfassung. Weitere Nachteile gegenüber der In-situ-Analytik sind zum einen die hohen Anschaffungskosten und zum anderen die intensive Wartung des Gaschromatographen.

Ein Vorteil des GC-MS ist die flexible Nutzung durch den mobilen Teststands Aufbau. Diese Mobilität ermöglicht Messungen an verschiedenen Positionen im Microgrid (am Ausgang der Elektrolyseure, am Speicherausgang, am BHKW-Eingang), um Wasserstoffqualitätsveränderungen in der Infrastruktur zu dokumentieren.

Die Kombination beider Verfahren adressiert die Forschungsfrage F1: kontinuierliche Sensoren ermöglichen operative Überwachung und schnelle Erkennung von Anomalien, während GC-MS-Messungen mit hoher Auflösung validieren und flexibel an unterschiedlichen Messorten aufgenommen werden können.

3 Forschungsergebnisse der Einzelbeiträge

Der vorliegende Abschnitt stellt die Vorgehensweise zur Beantwortung der Forschungsfragen F2-F4 unter Verwendung des H₂-MG dar.

Zunächst werden in Abschnitt 3.1 und 3.2 zwei Konzepte für dezentrale, selbstorganisierende Betriebsstrategien für heterogene Elektrolyseur-Flotten zur Beantwortung der Forschungsfrage F2 vorgestellt. Anschließend wird in Abschnitt 3.3 die simultane Auslegung und Betriebsführung von Wasserstoff und Batteriesystemen diskutiert. Im Zusammenhang mit der Forschungsfrage F4 werden in Abschnitt 3.4 die Flexibilitätscharakteristika von wasserstoffbetriebenen Geräten und ihre standardisierbare Quantifizierung beschrieben.

3.1 Kompetitiver Steuerungsalgorithmus

Zukünftige dezentrale Stromnetze erfordern dezentrale Regelstrategien, die die klassische Top-Down-Hierarchie ablösen. Für die Umsetzung dieser dezentralen Regelstrategien ist eine entsprechende Kommunikationsinfrastruktur erforderlich, die den Austausch der für die dezentralen Regelungssysteme notwendigen Informationen ermöglicht. Im Rahmen der Forschungsaktivitäten am H2-MG wurde ein MQTT-basierter Marktplatz als vollautomatisierter Verteilungsmechanismus entwickelt: Jedes Energiesystem veröffentlicht anonymisierte Leistungsangebote und -nachfragen wie Menge, Preis und Lieferzeitpunkt in einem offenen Orderbuch. Alle Teilnehmer können diese Daten einsehen. Bei preislicher Übereinstimmung erzeugt das Nachfragesystem automatisch einen rechtsverbindlichen Liefervertrag mit Power Purchase Agreement (PPA) - Charakter.

Darauf aufbauend optimiert eine modellprädiktive Regelung die individuellen Angebots- und Nachfragemengen eines jeden Systems. Die zugrunde liegenden Modelle erfassen sowohl das Verhalten der digitalen Plattform und der automatisierten Orderausführung als auch die physikalische Systemdynamik, insbesondere bei Wasserstoffsystemen mit charakteristischen Anfahrtrampen und peripherem Hilfsenergiebedarf sowie ökonomischen Parametern. In Kooperation mit der TH Ulm ist auf dieser Basis ein realitätsnahes System-Modell entstanden, das über die alleinige Betrachtung des Elektrolyse-Stacks hinausgeht [7].

3.2 Kooperativer Verteilungsalgorithmus

Grüner Wasserstoff ist nur dann klimaneutral, wenn seine Produktion direkt mit der Verfügbarkeit erneuerbarer Energien synchronisiert wird. Deshalb wird ein zweites Verfahren entwickelt, das auf die Steuerung einer heterogenen Gruppe von Elektrolyseuren, einer sogenannten Elektrolyseur-Flotte, abzielt. Berücksichtigt werden dabei Wirkungsgrade, Flexibilitätsgrenzen, das dynamischen Ansprechverhalten und der Reifegrad der Technologie.

Das entwickelte Verfahren basiert auf Prinzipien der Schwarmintelligenz. Für jedes Optimierungsintervall wird eine hierarchische Struktur aufgebaut, die die Priorität der einzelnen Elektrolyseure bezogen auf die Verteilung der verfügbaren elektrischen Energie festlegt. Der Aufbau dieser hierarchischen Struktur erfolgt selbstorganisiert unter Verwendung sogenannter stigmergischer Koordinationsprinzipien.

Eine Equal-Return-on-Investment-(EROI)-Strategie stellt sicher, dass alle Teilnehmer, unabhängig von ihrer Leistungsfähigkeit, einen vergleichbaren Kapitalrückfluss erzielen, wodurch wirtschaftliches Risiko in der frühen Einführungsphase reduziert und der Markthochlauf gefördert wird.

Das Reutlinger H2-MG kombiniert drei reale Elektrolyseure mit software-simulierten Einheiten über die MQTT-Kommunikationsplattform im Realbetrieb, wodurch das Framework unter realistischen, skalierbaren Betriebsbedingungen validiert werden kann [8].

3.3 Hybrid-Speicher Optimierung

Bei der Energiewende verschiebt sich die zentrale Planungsfrage von der reinen Leistungsdeckung hin zur simultanen Optimierung von Erzeugung, Netzintegration und Speicherung unter multiplen Zielkonflikten. Batteriespeicher adressieren kurzfristige Volatilität mit hoher Dynamik und hohem Wirkungsgrad; grüner Wasserstoff ermöglicht saisonale Speicherung und sektoralen Energietransfer. Komplementäre Einschränkungen, wie die hohen Kosten bei langen Entladezeiten bei Batterien im Vergleich zur geringeren Dynamik und Effizienz bei Wasserstoffspeichern, machen eine gemeinsame Betrachtung von Systemdimensionierung und Betriebsstrategie erforderlich.

Ein modularer Optimierungsansatz löst dieses simultane Design- und Betriebsproblem: Zeitreihenbasierte Last- und Erzeugungsprofile von PV und Wind werden mit techno-ökonomischen Komponentenparametern von Batterie, Elektrolyseur, H₂-Speicher, Brennstoffzelle und Netzanbindung verknüpft. Optimierungsgrößen umfassen operative Entscheidungen wie beispielsweise Lade- und Entladezyklen sowie strukturelle Dimensionierungen (Kapazitäten, Leistungsskalierung). Pareto-optimale Lösungen balancieren Versorgungssicherheit, Autarkiegrad, thermische Effizienz und Investitionskosten aus. Das Reutlinger H₂-MG liefert empirische Randbedingungen für Leistungs- und Teillastgrenzen, Betriebsdynamik und die thermoelektrische Kopplung sowie Validierungsdaten aus realen Komponenten. Die Anwendung auf Deutschland-Szenarien in einer Prognose für das Jahr 2045 sowie auf Daten aus 40 Unternehmensprofilen belegt die Robustheit gegenüber parametrischen Unsicherheiten [9].

3.4 Flexibilität von BHKW

Flexible, wasserstoffbereite BHKW sollen in erneuerbaren Energiesystemen kontrollierbare Restlastdeckung leisten. Ihre Flexibilität ist jedoch nicht standardisiert quantifizierbar und damit technologieübergreifend schwer vergleichbar.

Anhand des in das H₂-MG integrierten BHKW-Prüfstands wurde ein generisches Flexibilitätsprüfkonzept für Motor-, Brennstoffzellen- und Gasturbinen-basierte BHKW im Wasserstoffbetrieb entwickelt und experimentell validiert [10]. Das Indikatorenset erfasst Leistung-, Reaktions-, Lastanpassung- und Autonomie-Fähigkeiten, in dem es Indikatoren wie Start-/ Stoppzeiten, Rampenraten, Teillastbereiche und Hilfsenergiebedarfe messbar macht.

Bei der Anwendung des Flexibilitätsprüfkonzepts an sieben kommerziellen BHKW zwischen 3,7–112 kW elektrischer Ausgangsleistung wird zwischen standardisierten Startbedingungen für Kalt-, Warm-, und Heißstart unterschieden. Es konnte gezeigt werden, dass sich beispielsweise Startzeiten um den Faktor drei bei einem Kalt- im Vergleich zu einem Heißstart unterscheiden. Daher ist die Angabe bestehender Flexibilitätskennzahlen unpräzise und nicht vergleichbar, sofern dieser Effekt nicht berücksichtigt wird. Außerdem kann beim Vergleich von BHKW-Technologien gezeigt werden, dass Motor-BHKW meist kurze Anfahrzeiten und hohe Rampenraten aufweisen, während Brennstoffzellen- und Gasturbinen-BHKW breite Teillastbereiche bei längeren Startzeiten bieten. Die bisherigen Analysen zeigen zudem, dass sich alle Einheiten sowohl beim Anfahren als auch nach dem Abfahren als Nettolasten verhalten.

Für die Netzintegration ist es daher unabdingbar, die Dauer und die Leistung des Hilfsleistungsbezugs zu kennen. Mit den am H₂-MG erhobenen Messdaten kann das reale Anlagenverhalten nun in das Energiesystem realistisch eingeplant werden und das Potential von wasserstoffbetriebenen BHKW realistischer eingeschätzt werden.

Das Reutlinger H₂-MG bietet damit die Grundlage für die Parametrisierung von BHKW-Modellen im flexiblen, netzdienlichen Betrieb. Erhaltene Flexibilitätskennzahlen im Wasserstoffbetrieb schaffen wirtschaftliche Anreize für leistungsorientierte statt rein thermischer Nutzung und bilden die Grundlage für technologie-spezifische Investitionsentscheidungen sowie Geschäftsmodellbewertungen in wasserstoffdominierten Märkten. Sie bieten zudem einen wichtigen Überblick über die Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Technologien und geben eine wichtige Datengrundlage für Simulationen und Investitionsentscheidungen.

4 Mehrwert für Lehre, Transfer und Perspektiven

Für eine Verbreitung des Wissens über die neuen Technologien in der Bevölkerung im Sinne der Förderung der Akzeptanz wurden die wissenschaftlichen Erkenntnisse in unterschiedliche Transferformate übersetzt.

4.1 Demonstrator "Energiesystem mit Wasserstoff"

Die Abbildung 4 stellt ein Gleichstrom-Microgrid im Kleinmaßstab dar, das Photovoltaik-, Wind- und Wasserstoff-Speicherbetrieb visualisiert. Die variablen Lichtquellen und Handgeneratoren simulieren eine realistische Fluktuation aufgrund von Sonneneinstrahlung und Wind. Ein Zeigerinstrument zeigt die Spannungsabweichungen an. Eine visuelle Rückmeldung von Elektrolyseur- und Brennstoffzellenbetrieb verdeutlicht das Systemverhalten. Ein beleuchtetes Gebäudemodell und ein Industrieroboter-Modell veranschaulichen Verbraucherseiten und Lastarten. Eine vereinfachte Regelstrategie macht damit Grundprinzipien verständlich.

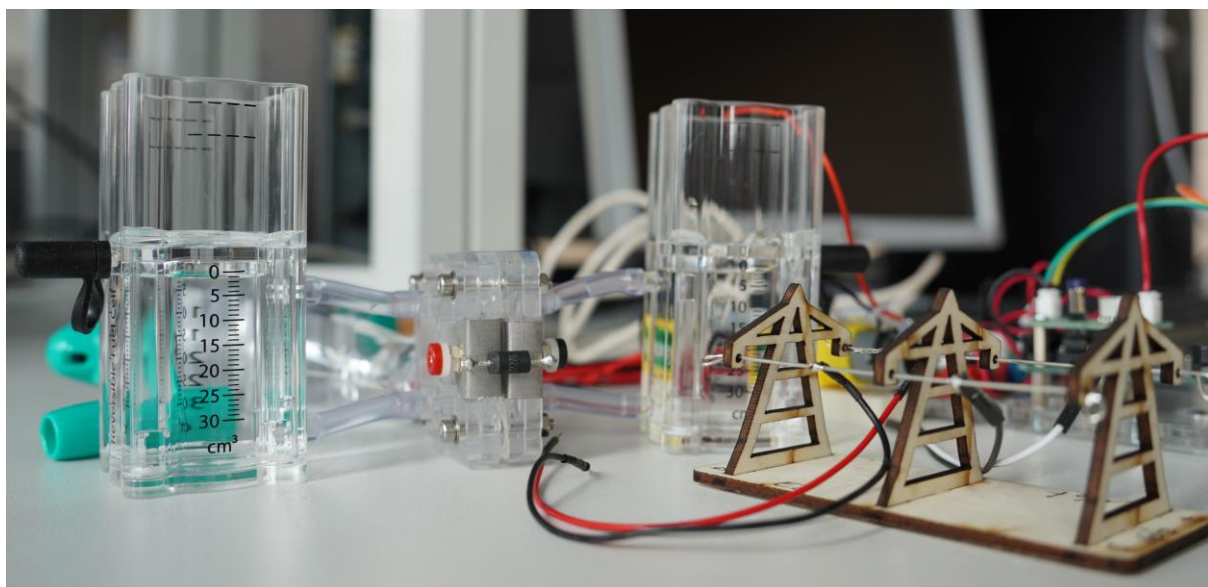


Abbildung 4: Reversible Brennstoffzelle und Stromnetzsimulator aus Schülerpraktika

4.2 Laborpraktikum für Schulklassen

Schüler untersuchen experimentell Netzregelungsstrategien mit adaptiver Elektrolyseur-Ansteuerung zur Stabilisierung der Netzspannung unter variablen Lasten und Erzeugungsschwankungen. Echtzeit-Datenerfassung und grafische Visualisierung unterstützen den Lernprozess. Die gewonnenen Erkenntnisse können mit dem H2-MG an der Hochschule Reutlingen verglichen werden.

4.3 Wimmelbild

Das in der Abbildung 5 dargestellte Wimmelbild ist ein plattformunabhängiges, webbasiertes Bild, das Nutzern über 50 Elemente im Bezug zum Wasserstoffprojekt interaktiv entdecken lässt. Erklärvideos zeigen reale Prozesse, mehrstufige Pop-Ups erklären Systemzusammenhänge; hochwertige Grafiken visualisieren Daten. Das Wimmelbild stellt alle Projektpartner dar und erklärt wissenschaftliche Erkenntnisse wie Systemauslegung, Regelstrategien und Skalierungseffekte in niederschwelliger Art und Weise für die breite Öffentlichkeit [11].

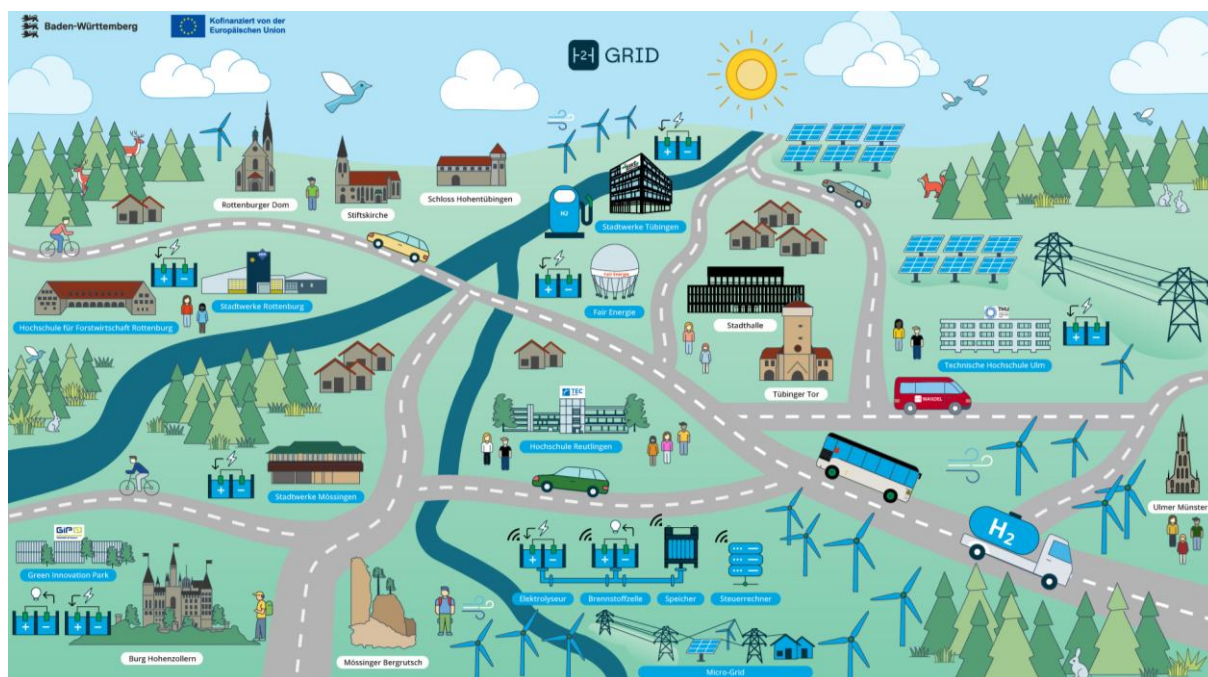


Abbildung 5: Ausschnitt aus dem Wimmelbild

Diese Transferleistungen adressieren ein fundamentales Hemmnis bei der Einführung neuer Technologien: „Die erfolgreiche Umsetzung von baulichen Maßnahmen, die langfristige Akzeptanz und das Vertrauen in Entscheidungsträger hängen nicht zuletzt davon ab, wie gut es gelingt, Betroffene vor Ort frühzeitig in den Dialog einzubinden“ [12]. Durch Demonstrator, Praktikum und Wimmelbild werden Energiesystem-Mechanismen anschaulich, experimentell zugänglich und öffentlich verständlich gemacht. Damit wird eine Brücke zwischen Forschung, technischer Anwendung und Gesellschaft gebildet.

5 Zusammenfassung und Fazit

Das Reutlinger Wasserstoff-Microgrid adressiert vier zentrale Forschungsfragen an der Schnittstelle von Energieversorgung, Regelungstechnik und Wasserstoff-Technologie.

Die kombinierte In-Situ- und GC-MS-Analytik ermöglicht eine Echtzeitüberwachung sowie ppm-genaue Validierung der Wasserstoffqualität. Der GC-MS bietet die Möglichkeit der Messung verschiedener Verunreinigungen an flexiblen Messpunkten in ppm-Auflösung.

Der Beitrag stellt zwei Verfahren zur Betriebsführung dezentraler Elektrolyseursysteme vor. Ein kooperativer Ansatz sichert allen Einheiten identische ROI-Werte bei optimaler Nutzung von Überschussstrom aus Erneuerbaren Energie und motiviert so frühzeitige Investitionen. Der kompetitive Ansatz schafft einen MQTT-basierten Marktplatz für vollautomatisierte Lieferverträge unter Berücksichtigung realer physikalischer Energieströme.

Die simultane Optimierung hybrider Batterie-Wasserstoff-Speicher zeigt wirtschaftliche Break-even-Punkte und unterstreicht die Bedeutung saisonaler Wasserstoffspeicher.

Die Flexibilitätsanalyse wasserstoffbetriebener BHKWs macht technologische Unterschiede transparent, bildet eine Basis für Standardisierung und ermöglicht eine realistische Einplanung dieser Geräte in Energiesysteme.

Das integrierte H₂-MG ermöglicht die Parametrierung von Energiesystemmodellen mit realen Daten, standardisierte Tests neuer Wasserstofftechnologien und deren didaktische sowie gesellschaftliche Vermittlung.

Die Erfahrungen bei Aufbau und Betrieb des H₂-MG werden mit Partnern aus der Industrie geteilt. Damit erfolgt ein Wissens- und Erfahrungstransfer in die Unternehmen; gleichzeitig wird ein realistisches Bewusstsein zum aktuellen Stand der Technik bei den Entscheidungskräften geschaffen. Über den wissenschaftlichen Beitrag der am Wasserstoff-Microgrid durchgeführten Forschungsarbeiten hinaus ist dieser Transfer unabdingbar für das Gelingen der Transformation des Energiesystems.

Kurzfristig ist der Ausbau des H₂-MG und die vermehrte Testung der Steuerungsalgorithmen in der Hardware vorgesehen. Mittelfristig sind Transferprojekte im größeren Industrie-Maßstab geplant. Langfristig soll das System vermehrt in die Lehre integriert werden, um Studierende bestmöglich auf die Zukunftstechnologie Wasserstoff in dezentralen Microgrids vorzubereiten.

6 Danksagung

Diese Arbeiten werden durch den Europäischen Fond für Regionale Entwicklung (EFRE) Baden-Württemberg, das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und das Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg gefördert.

7 Referenzen

- [1] K. Hansen, B. V. Mathiesen, and I. R. Skov, "Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 102, pp. 1–13, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.11.038.
- [2] M. Kendzioriski, L. Göke, C. von Hirschhausen, C. Kemfert, and E. Zozmann, "Centralized and decentral approaches to succeed the 100% energiewende in Germany in the European context – A model-based analysis of generation, network, and storage investments," *Energy Policy*, vol. 167, p. 113039, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.113039.
- [3] R. Khakimov, A. Moskvina, and O. Zhdaneev, "Hydrogen as a key technology for long-term & seasonal energy storage applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 68, pp. 374–381, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.066.
- [4] L. Ahmethodzic and M. Music, "Comprehensive review of trends in microgrid control," *Renewable Energy Focus*, vol. 38, pp. 84–96, 2021, doi: 10.1016/j.ref.2021.07.003.
- [5] C. A. Salman, H. Li, P. Li, and J. Yan, "Improve the flexibility provided by combined heat and power plants (CHPs) – a review of potential technologies," vol. 1, p. 100023, 2021, doi: 10.1016/j.prime.2021.100023.
- [6] *ISO 14687:2025; Hydrogen fuel quality — Product specification*, International Organization for Standardization, Feb. 2025.
- [7] S. -L. Steinacker, P. Renze, M. Winter, G. Schullerus, and T. Zenner, "Efficiency Analysis based on a Balance of Plant Model for a Modular Electrolysis System," in *2025 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2025, pp. 659–664.
- [8] A. Dominic, T. Zenner, M. Winter, and G. Schullerus, "A Coalition Framework for Increasing Market Participation of Electrolysers and Renewable Energy Sources," in *2025 21st International Conference on the European Energy Market (EEM)*, 2025, pp. 1–6.
- [9] M. H. Aref, T. Zenner, and G. Schullerus, "Integration of a Battery System Into a Hydrogen-Based Energy Storage System and Impact Analysis of Different System Designs and Operating Strategies," in *2025 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East)*, 2025, pp. 1–5.
- [10] D. Jentsch and B. Thomas, "Flexibility Characteristics of Hydrogen Ready Combined Heat and Power (CHP) Units: Experimental Test Concept and Practical Investigations for Engines, Fuel Cells and Gas Turbines as Prime Movers," *Hochschule Reutlingen*, 2026. [Online]. Available: unveröffentlichtes Manuskript
- [11] Hochschule Reutlingen, *Wimmelbild*. [Online]. Available: <https://www.tec.reutlingen-university.de/wimmelbild-1> (accessed: Jan. 22 2026).
- [12] O. Renn and A. M. Ernst, Eds., *Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive*, 2015th ed. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V, 2015. [Online]. Available: http://web.archive.org/web/20181115011658/http://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/ESYS_Analyse_Aspekte_der_Energiewende.pdf