

DEZENTRALES WASSERSTOFF-MICROGRID FÜR FORSCHUNG, LEHRE UND TRANSFER AN DER HOCHSCHULE REUTLINGEN

**Daniel Jentsch¹ⁱ, Martin Winter²ⁱ, Mohamad Hazem Arefi, Antony Dominicⁱ,
Bernd Petereitⁱ, Bernd Strohmaierⁱ, Karin Pfisterⁱ, Anian Bühlerⁱ,
Bernd Thomasⁱ, Gernot Schullerusⁱ, Thorsten Zennerⁱ**

Inhalt

Auf dem Weg zur Klimaneutralität wird das deutsche Energiesystem von zentralisierten Großkraftwerken hin zu dezentralen, fluktuierenden erneuerbaren Energien transformiert. Zur Sicherung der Versorgungssicherheit werden flexible Erzeuger, Verbraucher und Speicher, insbesondere Wasserstoffspeicher für saisonale Perioden, zu Schlüsseltechnologien. Die Hochschule Reutlingen hat eine vollständige Wasserstoffinfrastruktur aufgebaut, die erstmals isolierte Methoden, Modelle und Konzepte in einem integrierten Rahmen experimentell sichtbar macht.

Das Reutlinger Wasserstoff-Microgrid grenzt sich von bestehenden Arbeiten durch ein vollständig integriertes System versus Einzelkomponenten-Demonstratoren, kombinierte Gaschromatograph-Massenspektrometer-Gasanalytik mit ppm-Auflösung und In-situ-Sensoren versus manuelle Probenanalyse, Realbetrieb-Validierung dezentraler Regelung versus. rein simulative Tests, standardisierte Flexibilitätsprüfung heterogener Wasserstoff-Geräte versus. qualitative Beschreibungen, experimentelle Modellparametrierung mit Messdaten versus generische Annahmen, sowie meist in Vergessenheit geratene didaktische Formate für Lehre und Transfer.

Damit adressiert das Reutlinger Wasserstoff-Microgrid vier zentrale Forschungsfragen: (1) Kombination kontinuierlicher In-situ-Sensoren mit einem kombinierten Aufbau aus einem Gaschromatograph und einem Massenspektrometer zur Wasserstoffreinheitsmessung; (2) dezentrale, selbstorganisierende Betriebsstrategien für heterogene Elektrolyseur-Flotten über eine MQTT-Plattform; (3) simultane Auslegung und Betriebsführung hybrider Batterie-Wasserstoff-Systeme; (4) standardisierte Quantifizierung der Flexibilität wasserstoffbetriebener Blockheizkraftwerke (BHKW). Der Mehrwert liegt in der hardware-validierten Integration dieser Forschungsfelder in einem reproduzierbaren Wasserstoff-Microgrid.

Aufbau des Reutlinger Wasserstoff-Microgrids

In diesem Beitrag werden Aufbau, Charakterisierung und Betrieb eines vollständig instrumentierten Wasserstoff-Microgrids als experimentelle Plattform zur Untersuchung netzdienlicher Betriebsstrategien, qualitätsrelevanter Prozessdynamiken und simulationsgestützter Optimierungsverfahren vorgestellt. Die skalierbare Testumgebung bildet sämtliche Kernelemente dezentraler Wasserstoffenergiesysteme ab: Erzeugung durch 19,2 kW Anionenaustauschmembran- und 20 kW Protonenaustauschmembran-Elektrolyseure in einem Überseecontainer, Speicherung in vier 800-Liter-Flaschenbündeln mit 65 kg Kapazität bei maximale 300 Bar, sowie Verteilung über eine 100 m lange Edelstahl-Gasleitung zu Verbrauchern wie einer 8 kW Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle und zwei Sektoren koppelnde Wasserstoff-BHKW mit 5,5 bzw. 50 kW elektrischer Leistung. Die Wasserstoffreinheit wird durch ein In-situ-Analysesystem und mit einem gekoppelten Gaschromatograph-Massenspektrometer-System überwacht, wodurch wesentliche Nebenbestandteile wie die Anteile von O₂, CO, CO₂, H₂O im Wasserstoff in ppm-Auflösung nachgewiesen werden können. Ergänzt durch dreiphasige elektrische Vernetzung, eine Batterie, steuerbare Erzeuger und Lasten sowie SPS-/IPC-Steuerung mit MQTT-Kommunikation und Zeitreihendatenbank ermöglicht das Wasserstoff-Microgrid die Parametrierung und Validierung der Energiesystemmodelle, die für die Optimierungsverfahren genutzt werden.

¹ Reutlinger Energie Zentrum, Hochschule Reutlingen, Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen,
www.tec.reutlingen-university.de/forschung/rez-reutlinger-energiezentrum

¹ Daniel.Jentsch@Reutlingen-University.de

² Martin.Winter@Reutlingen-University.de

Forschungsergebnisse

Bei der Energiewende erfordert die Optimierung von Erzeugung, Netzintegration und Speicherung unter multiplen Zielkonflikten eine gekoppelte Betrachtung von Batterien und grünem Wasserstoff. Ein modularer Optimierungsalgorithmus verknüpft Zeitreihenprofile mit technisch-ökonomischen Parametern und erzeugt Pareto-optimale Lösungen für Versorgungssicherheit, Autarkiegrad und Investitionskosten. Anwendungen auf Deutschland-Szenarien für das Jahr 2045 quantifizieren Hybrid-Synergien und generieren transferfähige Planungsmetriken für dezentrale Energiesysteme, siehe [1].

Für den koordinierten Betrieb zahlreicher dezentraler Elektrolyseure und Stromerzeuger werden zwei strikt dezentrale Steuerungsansätze untersucht: (1) Kompetitiv: Ein marktmechanischer Ansatz, bei dem Energiesysteme über ein niedrigschwelliges, vollautomatisiertes System bilateral Stromlieferverträge abschließen. Dabei optimiert jedes System sein Verhalten modellprädiktiv unter den wirtschaftlichen und physikalischen Nebenbedingungen des Energiesystems, ohne zentrale Eingriffe, vgl. [2]. (2) Kooperativ: Ein kapitaleffizienter Ansatz, der Elektrolyseure in Echtzeit an die verfügbare erneuerbare Leistung koppelt. Eine neuartige dezentrale Regelstrategie organisiert Energiesysteme in dynamischen Gruppen und nutzt schwarmbasierte Optimierung zur fairen Erlösverteilung und zur Maximierung des erneuerbaren Energieeinsatzes [3]. Beide Algorithmen ermöglichen einen skalierbaren, adaptiven und netzdienlichen Betrieb zukünftiger fluktuierender Energiesysteme. Die Validierung der drei Algorithmen erfolgt bzw. erfolgte am Wasserstoff-Microgrid.

Zur detaillierten Analyse der Potentiale und der Betriebscharakteristika unterschiedlicher Wasserstoffnutzer wurde ein Flexibilitätsprüfkonzept entwickelt. Dieses wurde zunächst an den beiden wasserstoffbetriebenen Motor-BHKW sowie der Brennstoffzellen im praktischen Betrieb erprobt und mit den Messwerten einer wasserstoffbetriebenen Gasturbine verglichen. Die Auswertung zeigt komplementäre Flexibilitätsprofile: Während die BHKW beispielsweise hohe Rampenraten in Anfahrt- und Teillastbetrieb aufweisen, bietet die Brennstoffzelle besonders hohe Wirkungsgrade und einen fein einstellbaren Leistungsbereich.

Lehre und gesellschaftlicher Transfer

Die erzielten wissenschaftlichen Ergebnisse werden didaktisch für den schulischen Kontext aufbereitet und in einem interaktiven Stromnetzmodell implementiert. Dieses vermittelt durch experimentelles Lernen die Grundlagen der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien sowie die Netzregelung durch Wasserstoffspeicher. Ergänzend steht ein frei zugängliches, interaktives digitales Wimmelbild zur Verfügung [4], das durch explorative Interaktion zentrale Aspekte der Wasserstoffinfrastruktur und Projektergebnisse aufbereitet und so die gesellschaftliche Akzeptanz durch Aufklärung fördert.

Der Beitrag beschreibt das Reutlinger Wasserstoff-Microgrid und belegt seinen einzigartigen Mehrwert für Forschung, Lehre und Transfer durch Integration von Gasanalytik, hardware-validierte dezentrale Regelung, Hybrid-Speicheroptimierung und Flexibilitätsprüfung, sowie erste Simulations- und Messergebnisse zu Effizienz, Autarkiegrad und Betriebsstrategien.

Referenzen

- [1] M. H. Aref, T. Zenner, G. Schullerus, "Integration of a Battery System into a Hydrogen-Based Energy Storage System and Impact Analysis of Different System Designs and Operating Strategies", 2025 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), Dubai, VAE, Beitrag angenommen
- [2] M. Winter, A. Dominic, T. Zenner, G. Schullerus, „Simulation eines dezentralen Regelungssystems zur netzdienlichen Erzeugung von grünem Wasserstoff“, 19. AALE-Konferenz. Luxemburg, 08.03.-10.03.2023, pp. 1–11, doi: 10.33968/2023.38
- [3] A. Dominic, T. Zenner, M. Winter and G. Schullerus, "A Coalition Framework for Increasing Market Participation of Electrolyzers and Renewable Energy Sources," 2025 21st International Conference on the European Energy Market (EEM), Lisbon, Portugal, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEM64765.2025.11050213
- [4] <https://www.tec.reutlingen-university.de/wimmelbild-1>