

Energiesysteme mit Brennstoffzellen – von der Simulation bis zum Monitoring

**Peter Beckhaus, Angelika Heinzl, Joachim Jungsbluth,
Gerhard Krost*, Jens Mathiak, Jürgen Roes**

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH Duisburg
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg, www.zbt-duisburg.de

(*) Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Elektrische Anlagen und Netze
Bismarckstr. 81, 47048 Duisburg, www.uni-duisburg.de/fb9/ean

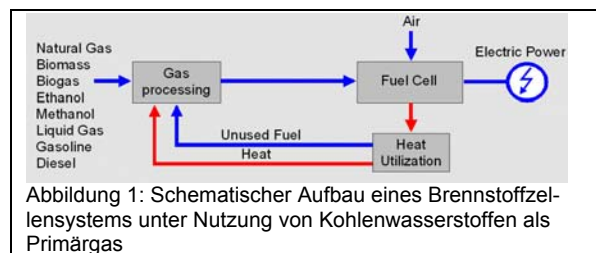


Zentrum für BrennstoffzellenTechnik Duisburg

Brennstoffzellenaggregate zur gleichzeitigen Versorgung von elektrischen und thermischen Verbrauchern werden in unterschiedlichsten Leistungsklassen und für verschiedenste Applikationen propagiert und teilweise bereits eingesetzt. Gleichzeitig ergeben sich durch unterschiedlichste Architekturen zum Beispiel in der Gasbereitstellung vielseitige Aspekte der Berechnung, der Betriebsführung und der Überwachung von Energiesystemen.

Einführung

Unter Brennstoffzellensystemen werden in der Regel technologische Einheiten aus einer Gasbereitstellung, dem Brennstoffzellenstapel selbst, einer Verbraucheranbindung und der notwendigen Peripherie verstanden. Abhängig von der Art der Gasversorgung der Brennstoffzelle ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an die Einbindung von Brennstoffzellenaggregaten in vorhandene oder neu aufzubauende Energieversorgungsstrukturen: Bei stationären Systemen, die oft Erdgas als primären Energieträger verwenden, ist die vorzuschaltende Reformereinheit die bestimmende Größe im Regelverhalten des Aggregates; zur Ermittlung der Reaktionszeiten solcher Anlagen sind entsprechende Simulationsalgorithmen notwendig, die Entwicklung und Test von übergeordneten Systemsteuerungen ermöglichen. Aber gerade auch bei Anwendungen der klassischen Wasserstofftechnik, bei der die Prozesskette aus Elektrolyse, Wasserstoffspeicherung und Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellen oder anderen Energiewandlern genutzt wird, sind für diese komplexen technischen Strukturen präzise, adaptionsfähige Energiesystemsteuerungen zu entwickeln. Diese müssen leicht an die im Energiesystem genutzten Energiewandler angepasst werden können, aber auch selbständig auf sich ändernde Lastvorgaben durch die Verbraucher reagieren können, was durch Nutzung entsprechender Prognoseverfahren realisierbar ist. Erst dadurch wird ein optimierter Betrieb unter bestmöglicher Ausnutzung der erzeugten elektrischen und der thermischen Energie möglich.



Modelle

Aus Sicht der Regelbarkeit ist die Gasprozess-technik quasi der Flaschenhals eines Brennstoffzellensystems auf Erdgasbasis. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines solchen Systems. Aus regelungstechnischer Sicht dominieren die Reaktionszeiten der Gasprozess-technik dabei die Sprungantworten des Gesamtsystems. Der Brennstoffzellenstapel selbst weist prinzipiell keine signifikante Totzeit auf, es ergeben sich nur Performanzunterschiede in Abhängigkeit zum Beispiel von Druck und Temperatur und Gasqualität.

Die Sprungantworten eines Erdgasreformers ergeben sich aus den im Reformer vorhandenen Volumina. Der Aufbau ist dabei eine Reihenschaltung aus Vorheizung, Reformierung, Kühlung und Shift-Reaktor. Jedes einzelne Bauteil kann dabei als freies Volumen, gefolgt von einem Durchflusswiderstand aufgefasst werden. Gemäß den Gesetzen der Thermodynamik idealer Gase ergibt sich der Zusammenhang zwischen Volumen und Druck gemäß Gleichung (1), bei Änderung des Durchflusses ergibt sich dann eine Druckveränderung.

$$(1) \quad \rho = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{(\dot{n}_{in} - \dot{n}_{out}) \cdot R \cdot T}{V}$$

Gleichung (2) repräsentiert das Verhalten des Ventiles.

$$(2) \quad \Delta p = K_1 \cdot \dot{n}_{out}^2$$

Die Kombination der Gleichungen 1 und 2 führt zu einer komplexen Differentialgleichung, die mittels numerischer Verfahren gelöst werden kann. Die Umsetzung erfolgte in diesem Fall mittels Matlab-Simulink [1]. Abbildung 2 zeigt das Ergebnis der Berechnungen bei entsprechend bekannten Volumina der Bauteile des Reformers im Vergleich zu realen Messungen am System.

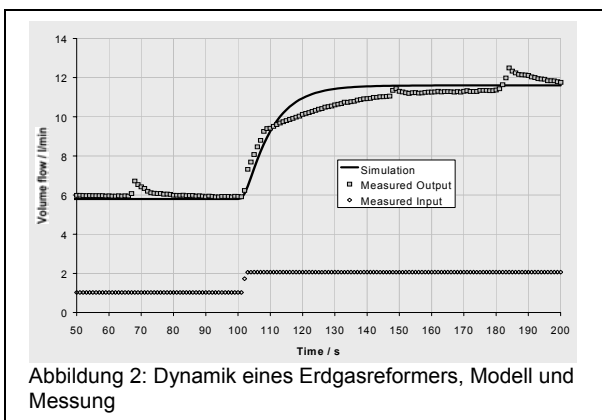


Abbildung 2: Dynamik eines Erdgasreformers, Modell und Messung

Mit diesem einfachen, aber präzisen Modell steht damit ein notwendiges Modul zur Verfügung, das sowohl für die Regelungstechnik im Brennstoffzellenaggregat selbst als auch für ein übergeordnetes Energiemanagement (EM) ständig Informationen über die zu erwartenden Sprungantworten des Reformers und damit des Gesamtsystems liefert. Bei der Konstruktion von Reformern kann mit diesem Modell zudem die Reaktionsgeschwindigkeit auf einfache Weise berechnet und optimiert werden.

Entsprechend ist auch ein Modell für das zeitabhängige Temperaturverhalten von PEFC-Brennstoffzellenstacks entwickelt worden, das die temperaturabhängige Dynamik des Stacks für intelligente Regelungssysteme ermitteln kann. Zurzeit wird dieses Modell am ZBT für Stacks verschiedener Hersteller parametrisiert und verifiziert. Die Kombination der Teilmodelle eines Brennstoffzellensystems, also bei Nutzung von Erdgas als Primärgas die Verbindung aus Reformierung und Gasreinigung mit dem Brennstoffzellenstack und der Strom- bzw. Wärmeaufbereitung bildet dann ein vollständiges Modell, das für unterschiedliche Bauformen das Klemmenverhalten des Aggregates wiedergeben kann.

Simulation von Energieversorgungssystemen

Eine Vielzahl solcher Modelle sind in den vergangenen Jahren an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg entwickelt worden und stehen nun für die Berechnung der Einflüsse von dezentralen Energiewandlern auf lokale Versorgungsstrukturen zur Verfügung. Bei der Erstellung und Auswahl der Einzelmodelle wurde besonderer Wert auf das spezifische Verhalten der einzelnen Komponenten in Hinsicht zum Beispiel auf aktive (gesteuerte) oder passive (durch äußere Einflüsse verursachte) Lastwechsel gelegt. In Abbildung 3 ist eine Übersicht der einzelnen zur Verfügung stehenden Modelle dargestellt.

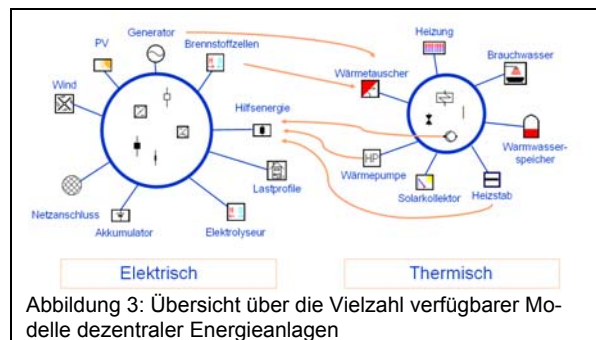


Abbildung 3: Übersicht über die Vielzahl verfügbarer Modelle dezentraler Energieanlagen

Implementiert sind diese Modelle im Simulationssystem DUress [2], einem Softwarepaket, dessen flexible Parametrierung die Berechnung verschiedenster Konfigurationen von lokalen Energieversorgungsstrukturen vom autarken Haussystem bis zur Siedlung mit Nahwärmestrukturen erlaubt.

Das im Folgenden mit dem Simulationssystem DUress untersuchte Brennstoffzellenhaus stellt ein typisches Beispiel für ein Kraft-Wärme gekoppeltes System dar. Abbildung 4 zeigt die interaktive Darstellung des elektrischen und thermischen Sub-Systems auf der Simulations-Oberfläche mit den beiden Aggregaten Brennstoffzelle und einer Wärmepumpe zur Spitzenlastabdeckung.

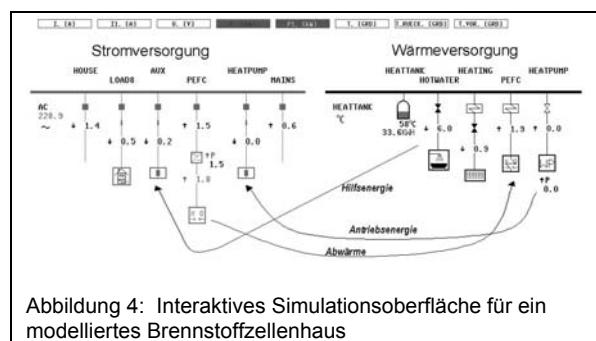


Abbildung 4: Interaktive Simulationsoberfläche für ein modelliertes Brennstoffzellenhaus

Im *thermischen* Anlagenteil sind alle Komponenten entweder direkt oder über Wärmetau-

scher an den zentralen Wärmespeicher angeschlossen. Auf *elektrischer* Seite ist die Brennstoffzelle über einen Wechselrichter, der über einen vorzugebenden Sollwert die Leistungsregelung des Stacks übernimmt, mit der Sammelschiene verbunden. Dargestellt ist außerdem die Interaktion zwischen den einzelnen Komponenten, dabei sind jedoch nicht die Energieflüsse sondern die Informationsflüsse des Simulationsalgorithmus gezeigt. Die Informationen über die Menge und das Temperaturniveau der Abwärme, die beim Betrieb der Brennstoffzelle anfällt, wird vom Berechnungsalgorithmus des elektrischen Teils an den thermischen Teil übergeben, die Information über den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe und der übrigen Pumpen in den Wärmekreisläufen wird entsprechend in den Berechnungskreis der elektrischen Komponenten zurückgeliefert.

Die hier untersuchte Konfiguration ist ein typisches Beispiel für eine Brennstoffzellenanwendung zur Hausenergieversorgung. Die Niedrigtemperaturbrennstoffzelle kann als Speisung für elektrische Grundlast oder auch für Spitzenbedarf eingesetzt werden und dient gleichzeitig als Grundlastversorgung des thermischen Bedarfs. Die Wärmepumpe, oder alternativ ein klassischer Brenner, dient im Winter zur Versorgung des großen Heizenergiebedarfs. Das DÜress-Simulationspaket erlaubt den Test verschiedener alternativer Konfigurationen und Betriebsstrategien. Alle notwendigen Daten, einschließlich Speicher und Rohrleitungstemperaturen, werden berechnet und die Interaktion zwischen elektrischen und thermischen Komponenten berücksichtigt.

Auch größere und komplexere Energieversorgungsstrukturen, wie beispielsweise auch Siedlungssysteme mit elektrischer und thermischer Vernetzung der Erzeuger und Verbraucher sind mit diesem Programm rechenbar [3]. So wurde beispielsweise in mehreren Schritten in Zusammenarbeit mit einem industriellen Partner eine Siedlung projektiert, deren Energieversorgung in Teilen auf Basis von solarer Wasserstofftechnik basiert [4].

Energiemanagement

Für die Betriebsführung von dezentralen Energiesystemen wird eine übergeordnete Regelung benötigt, die „innere“ Systemgrößen der Anlage wie aktuelle Verbraucherleistung, eingespeiste Leistung, Füllstand von Speichern usw. mit „äußeren“ Größen wie Archivdaten, Tageszeit, Wetterdaten und -prognosen, usw. verknüpft und durch Zu- bzw. Abschalten der

einzelnen Komponenten der Anlage sinnvolle und sichere Betriebszustände des Gesamtsystems herstellt unter

- vorausschauender Bewirtschaftung der Kurz- und Langzeitspeicher,
- Vermeidung der Überschreitung von Grenzwerten der Betriebsgrößen,
- schonender Betriebsweise der Anlagenkomponenten, und
- Maximierung des Energieertrages.

An das oben beschriebene Simulationsprogramm wurde daher ein externes Softwarepaket angeschlossen, mit dem auf einfache Weise unterschiedliche Betriebsführungsstrategien getestet und verifiziert werden können. Eingesetzt wurde hier ein Expertensystem, das eine flexible Strategieformulierung ermöglicht. Das Energie- und Anlagenmanagement kann dabei auch auf prognostizierte Daten, wie Last- und Wetterinformationen [5] zurückgreifen.

Dieses Managementsystem wurde als Betriebsführung verschiedener simulierter Anlagen eingesetzt. Dazu gehören zum Beispiel eine Reihe von Solar-Wasserstoffprojekten wie der PHOEBUS in Jülich, die Demonstrationsanlage KonWerl und oben angesprochene Wasserstoffsiedlungen in verschiedenen Projektstufen. Aber auch andere Energieversorgungssysteme auf Basis zum Beispiel von BHKW Technologie wurden erfolgreich mit dem sehr übersichtlich parametrierbaren Algorithmus für das Management gesteuert [2].

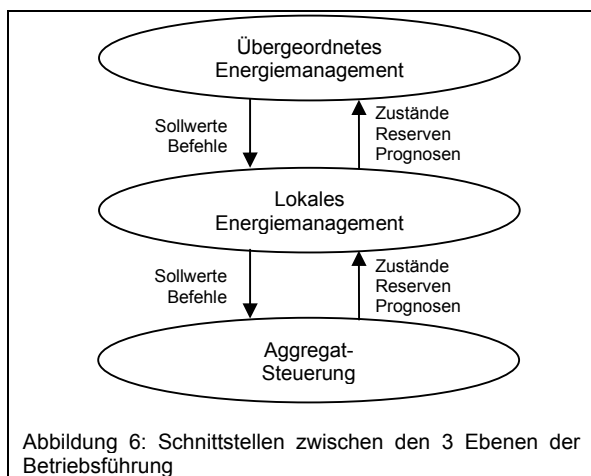


Monitoring

Die Erfahrung in der Simulation und der Betriebsführung dezentraler Energiewandler wird nun am Zentrum für Brennstoffzellen-Technik Duisburg auch zur Entwicklung entsprechender Monitoringsysteme verwendet. Monitoring bedeutet in diesem Falle die Beobachtung von Brennstoffzellensystemen und deren Einzelkomponenten durch entsprechende Softwarealgorithmen.

Beispielsweise ist für eine optimale Regelung eines Brennstoffzellenaggregates ein detaillier-

tes Wissen über die Reaktionszeiten der Einzelkomponenten wichtig. Diese sind immer auch vom deren aktuellem Zustand der abhängig. So ist zum Beispiel für das Anfahren eines Brennstoffzellenaggregates gemäß Abbildung 1 die Kenntnis über die aktuell in jedem Teilsystem vorherrschende Temperatur notwendig. Aus diesen Informationen kann dann, mittels geeigneter Modelle der Einzelkomponenten und des Gesamtsystems, rechnerisch ermittelt werden, wie schnell dieses Aggregat in Betrieb genommen werden kann. Ähnliche Anforderungen ergeben sich auch bei Lastwechseln; hier ist zum Beispiel, neben der Performanz des Reformersystems, die Temperatur des Stacks eine entscheidende Größe, da mit zunehmender Temperatur auch eine höhere Leistung vom Stack geliefert werden kann. Gleichzeitig können Komponentenmodelle hier die Messtechnik des Systems minimieren: Wenn die bereitgestellte Menge Reformatgas nicht gemessen sondern errechnet wird, entfallen kostenintensive Messgeräte in diesem Bereich.



Aus der Erfahrung zum Beispiel mit der Entwicklung von Bleibatteriebeobachtern zur Ladestandsentwicklung [2] heraus werden am ZBT intelligente Aggregatsteuerungen unter Nutzung von Komponentenmodellen zur Beobachtung der Einzelkomponenten generiert. Gleichzeitig liefern diese Aggregatsteuerungen notwendige Informationen an das lokale Energiemanagement, das die Koordination zwischen der lokal vom Verbraucher benötigten elektrischen und thermischen Leistung und dem Brennstoffzellenaggregat übernimmt. Zu diesen Informationen gehören der aktuelle Zustand des Aggregates und seine derzeitigen Energiereserven, aber auch Daten über kurz- und mittelfristig erreichbare Leistungen des Aggregates. Diese Informationen werden vom lokalen Energiemanagement mit den Daten der Verbraucher abgeglichen, entsprechende Prognosen erstellt und wiederum dem überge-

ordneten Management (Steuerzentrale eines so genannten „virtuellen Kraftwerks“) zur Verfügung gestellt. Je nach Betreiberkonzept gibt dieses übergeordnete Management direkte Steuerbefehle oder nur Informationen über aktuelle Vergütung an das lokale Energiemanagement zurück.

Zusammenfassung

Mit der Brennstoffzellentechnologie befindet sich ein dezentraler Energiewandler auf dem Weg zur technologischen Reife, der durch seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und seine positiven ökologischen und ökonomischen Bilanzen als neuer Hoffnungsträger angesehen wird. Die Einbindung von Brennstoffzellen mit ihren charakteristischen Eigenschaften in vorhandene Versorgungsstrukturen mit gegebenen Anforderungen erfordert allerdings sorgfältige Voruntersuchungen, die auf Basis der vorgestellten vielseitigen Simulationsmöglichkeiten vorgenommen werden können. Darüber hinaus erfordern die stark individuellen Anforderungen in den unterschiedlichen Einsatzbereichen der Brennstoffzellen ein flexibles Betriebsmanagement; dieses kann durch Kopplung mit der Anlagen-Simulation bereits im Vorhinein getestet und optimiert werden. Im Zuge der Realisierung von Energieversorgungsanlagen muss eine sichere, wirtschaftliche und komponentenschonende Steuerung dieser Anlagen gewährleistet werden. Um dies zu erreichen wird am ZBT Duisburg mittels Beobachtermodellen eine intelligente Regelung entwickelt, die gleichzeitig Status- und Reserveinformationen an das zugehörige Energiemanagement liefert. Damit wird die Grundlage für eine technisch schlanke, aber trotzdem fundierte Steuerung des Brennstoffzellensystems gelegt.

Literatur

- [1] Mathiak, J.; Beckhaus, P.; Heinzel, A.; Roes, J.: „Dynamics of H₂ Production by Steam Reforming“, Electrochemical Talks, Ulm, 20.-21. Juni 2002
- [2] Beckhaus, P.: „Simulation und Anlagenmanagement für dezentrale Energieversorgungssysteme“, 2002, ISBN 3-89722-992-7, Logos-Verlag Berlin
- [3] Beckhaus, P., Krost, G.: „Flexible Simulation Tool for Planning and Optimization of Decentralized Power Systems with Renewables Based Sources and Energy Storage“, Proceedings of IEEE Porto Power Tech. 2001 Conference, Porto - Portugal, 10-13 of September 2001
- [4] Buchholz, G.; Beckhaus, P.; Graw, A.; Krost, G.; Matrics, J.: „Solar Hydrogen Based Energy Supply For Residential Area“, World Renewable Energy Congress VII, July 2002
- [5] Krost, G.; Beckhaus, P.: „Intelligent forecasting energy management for hybrid photovoltaic systems“, Proc. of IEEE ISAP2001 Conference, Budapest, Hungary, June 18-21, 2001