

Brennstoffzellen brennen nicht durch Lebensdauerrekord mit Mathematik

Hochtemperatur-Brennstoffzellen-Anlagen sind umweltfreundliche Energielieferanten, können sogar den nötigen Wasserstoff intern produzieren und liefern nicht nur Strom, sondern auch Abwärme. Hohe Temperaturschwankungen führen jedoch zu Materialermüdungen und verkürzen ihre Betriebszeiten. Mit Hilfe von innovativen mathematischen Methoden der Optimalen Steuerung kann ein Durchbrennen von Brennstoffzellen verhindert werden.

Brennstoffzellen besitzen wegen ihrer Effizienz und der niedrigen Schadstoffemissionen ein hohes Zukunftspotenzial. Unter den unterschiedlichen Brennstoffzellensystemen nehmen die so genannten Schmelzcarbonat-Brennstoffzellen eine Sonderrolle ein. Sie sind nämlich für die gleichzeitige Erzeugung von elektrischem Strom und Nutzwärme (bzw. Nutzkälte) in stationären Heizkraftwerken (300 – 500 kW) geeignet. Dies liegt an ihrer Betriebstemperatur von ungefähr 650°C. Diese Temperatur ist einerseits nicht zu hoch, so dass die elektrochemischen Umsetzungen an den Elektroden ohne teure Spezial-Katalysatoren ablaufen. Nickel ist ausreichend um die Brennstoffzellenreaktionen anzustoßen. Sie ist

andererseits aber auch hoch genug, so dass aus konventionellen Brenngasen (z. B. Erdgas, aber auch Deponie- oder Biogas) der benötigte Wasserstoff in der Brennstoffzelle selbst hergestellt werden kann. Diese Fähigkeit zur sogenannten internen Reformierung macht diesen Brennstoffzellentyp unabhängig vom Aufbau einer breiten Wasserstoffversorgung. Wasserstoff, der Brennstoff für alle Brennstoffzellen, kommt nämlich in der Natur nicht in reiner Form vor.

Als weltweit erstes Brennstoffzellensystem dieser Art erreichte der HotModule am Magdeburger Universitätsklinikum im Mai 2006 eine Rekord-Betriebsdauer von 30.000 Stunden und demonstrierte damit,



Abb. 1:
HotModule im Bau:
Einbau des Brennstoffzellenstapels

dass diese Technologie auf dem besten Weg zur wirtschaftlichen Nutzung ist. Diese HotModule genannte Brennstoffzellenanlage des Herstellers MTU CFC Solutions GmbH wurde 2002 im Kraftwerk des Universitätsklinikums der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg von der IPF Heizkraftwerksbetriebsgesellschaft mbH in Betrieb genommen - im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Feldversuchs.

Der Betrieb der Anlage wurde parallel dazu von Forschern der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und des Max-Planck-Institutes für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg sowie des Lehrstuhls für Ingenieurmathema-

Abb. 2:
HotModule des
Magdeburger
Universitätsklinikums



Brennstoffzellen brennen nicht durch – Lebensdauerrekord mit Mathematik

tik der Universität Bayreuth wissenschaftlich begleitet, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung. Ziel war die Entwicklung neuer Regelungsstrategien für Brennstoffzellensysteme.

Aus der Sicht der beteiligten Wissenschaftler gestaltete sich die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie bei diesem Projekt einzigartig und idealtypisch: Die industriellen Kooperationspartner gewährten den beteiligten Wissenschaftlern freien Zugang zur Anlage und ermöglichten die Erfassung der relevanten Messdaten über das Prozessleitsystem.

Mit diesem Forschungsprojekt bot sich die Möglichkeit, neue Werkzeuge für eine weitere grundlegende Brennstoffzellenforschung zu entwickeln. Der Weg für leistungsfähigere Brennstoffzellen mit längeren Laufzeiten wurde geebnet. Zudem sind im Zuge dieses Projektes erhebliche Erfolge in der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses zu verzeichnen: Die Vorlesung zum Thema Brennstoffzellensysteme fand unmittelbar

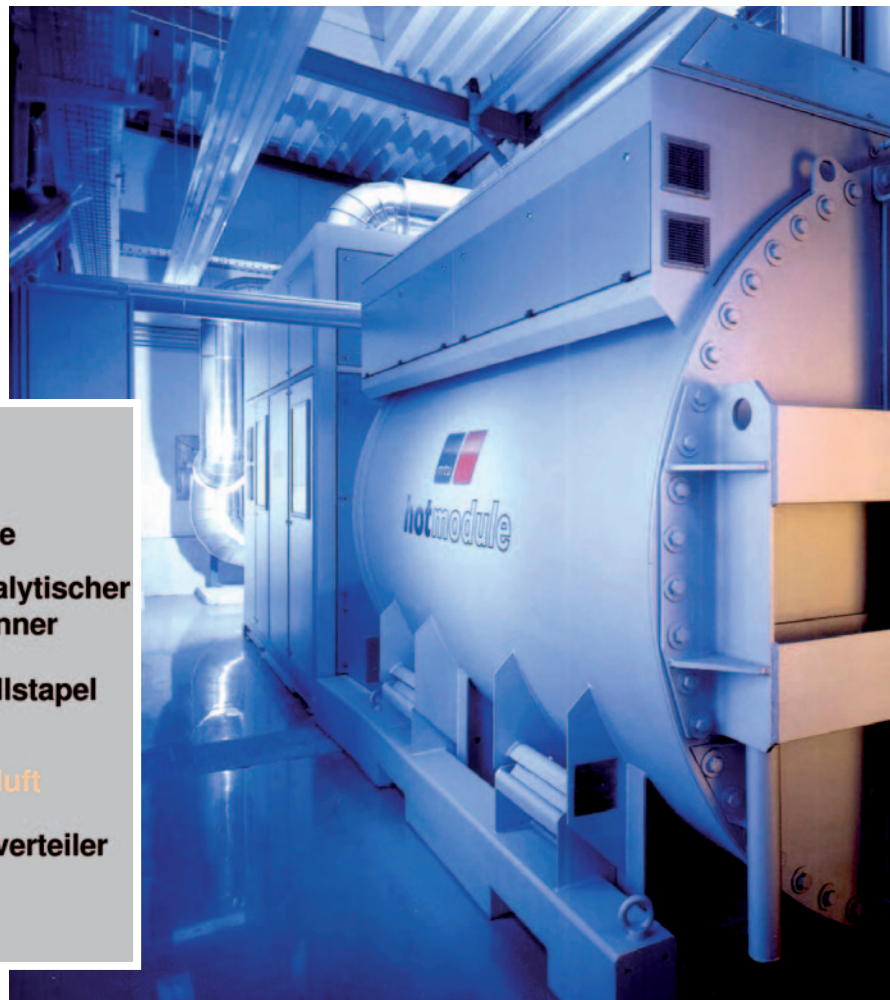
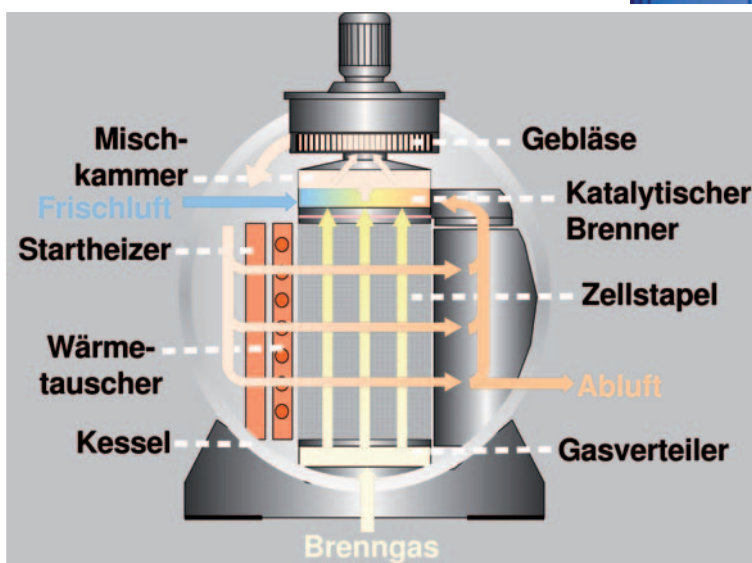
neben der HotModule-Anlage statt. Zahlreiche interdisziplinäre Diplomarbeiten, Promotionen und Habilitationen wurden an den beiden Universitätsstandorten erfolgreich abgeschlossen.

Darüber hinaus erwies es sich sowohl für den Hersteller MTU CFC Solutions GmbH, als auch für die Partner aus der Wissenschaft als ein glücklicher Umstand, mit Herrn Dr.h.c. Joachim Berndt, Senior Chef der IPF Heizkraftwerksgesellschaft Magdeburg, einen engagierten, technologischen Vorreiter mit unternehmerischer Initiative und Durchsetzungskraft getroffen zu haben, um dieses Vorhaben umzu-

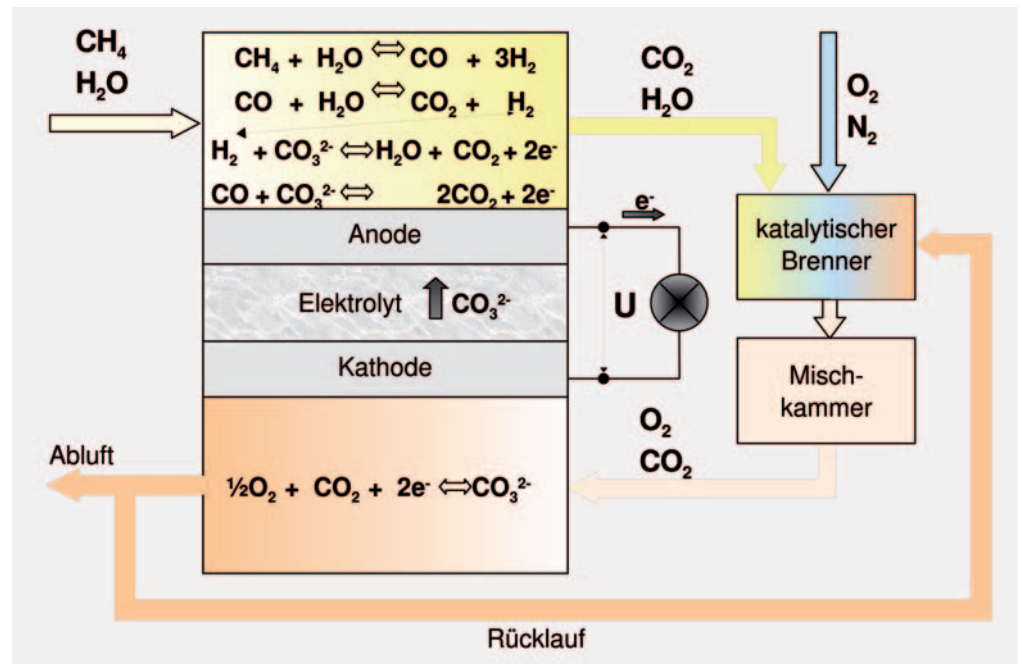
setzen. Der Betrieb der Brennstoffzellenanlage HotModule war und ist ein wichtiger Meilenstein zu einem ausgereiften, umweltfreundlichen System.

Aus Sicht der Mathematik stellen sich folgende Fragestellungen: Schmelzcarbonat-Brennstoffzellen können, wie gesagt, Erdgas in Wasserstoff umwandeln und daraus thermische und elektrische Energie mithilfe elektrochemischer Reaktionen gewinnen. Bei der Analyse und der Steuerung der physikalisch-chemischen Abläufe innerhalb der Zelle müssen die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Komponenten der Brennstoffzelle bei

Abb. 3:
Funktionsweise
des HotModules



hohen Temperaturen verstanden und vorhergesagt werden können. Dazu ist eine formale Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Gasströme, der Temperaturen und der elektrischen Spannung in Abhängigkeit der intern stattfindenden elektrochemischen Reaktionen auf dem örtlich verteilten Gebiet der Brennstoffzelle erforderlich. Das resultierende mathematische Gleichungssystem besteht aus einer parabolischen Gleichung für die Wärmeleitung im Elektrolyten der Zelle sowie hyperbolischen Transportgleichungen für den reaktiven Gastransport. Die Potentialfelder werden in jedem Ortspunkt durch ein differential-algebraisches Gleichungssystem beschrieben.



Darüber hinaus gehen in die rechten Seiten der Differentialgleichungen Integralterme ein. Der Gasstrom zwischen Anode und Kathode wird über einen katalytischen Nachbrenner und eine Mischkammer geführt, sodass die Verknüpfung von Anode zu Kathode durch ein gewöhnliches differential-algebraisches Gleichungssystem beschrieben wird. Die Einlassbedingungen am Anodeneingang und am Lufteinlass bieten die Möglichkeit der Steuerung der Brennstoffzelle.

Damit sind numerische Simulationen und extrem zeitaufwändige optimale Steuerungen, z.B. eines Lastwechsels, möglich, die den Brennstoffzellenstapel optimal von einem stationären Zustand in einen anderen überführen, wenn sich die Anforderungen zur Stromerzeugung an das Brennstoffzellensystem schlagartig ändern. Die numerischen Resultate belegen die Leistungsfähigkeit moderner Methoden der Optimalen Steuerung. Insbesondere konnten durch geschickte Wahl der zu optimierenden Größen abrupte Änderungen der

Temperatur innerhalb der Brennstoffzelle vermieden werden, die zu kostspieligen Materialermüdungen bis hin zum Durchbrennen des Zellenstapels führen können.

Damit sind wir in einem hochaktuellen Forschungsgebiet der Mathematik angekommen, der Optimalen Steuerung von dynamischen Prozessen, die mithilfe partieller Differentialgleichungen beschrieben werden. Ohne Zweifel stellt das mathematische Modell des HotModules eines der kompliziertesten optimalen Steuerungsprobleme bei partiellen Differentialgleichungen dar – immerhin sind es 28 nichtlinear gekoppelte partiell differential-algebraische Gleichungen gemischten Typs.

Erst kürzlich erschien dazu ein Artikel der Bayreuther Ingenieurmathematiker Hans Josef Pesch, Kurt Chudej und deren ehemalige Doktorandin, Frau Dr. Kati Sternberg, jetzt Merz Pharmaceuticals, Frankfurt, im renommierten SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) Journal on Applied Mathematics. ■

Abb. 5:
Funktionsweise
des HotModules

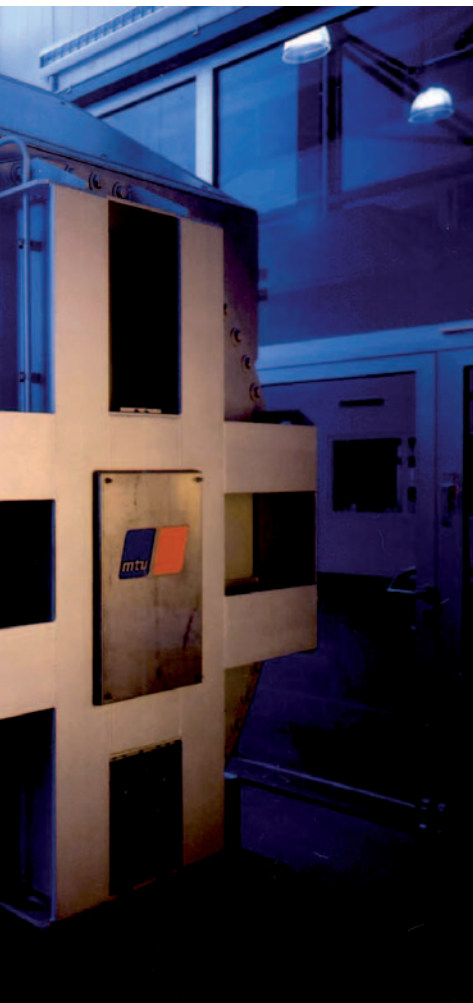


Abb. 4: HotModule des Magdeburger Universitätsklinikums