WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER

Brennstoffzellen

Prof. Mario Ohlberger, Bernard Haasdonk

Ein Ausweg aus der Klimakatastrophe?

Ein Ausweg aus der Klimakatastrophe?

Computer, Autos, Klimaanlagen – der weltweite Energiebedarf steigt und muss durch saubere und effiziente Formen der Energiegewinnung gedeckt werden. In diesem Kontext spielen Brennstoffzellen eine wichtige Rolle. Sie arbeiten so gut wie emissionsfrei und sind sehr klimafreundlich. U-Boote werden damit heute schon angetrieben und auch die Automobilindustrie hat das Potenzial der galvanischen Powerkammern längst erkannt.

Im einfachsten Fall braucht eine Brennstoffzelle lediglich Wasserstoff und Sauerstoff. Unter Gewinnung von Elektrizität und Wärme werden diese in reines Wasser umgewandelt. Als Sauerstoffquelle reicht oft die Zuführung von Luft. Wie Batterien und Akkus sind Brennstoffzellen Energiewandler, die man statt langem Aufladen jedoch nur einmal schnell auftanken muss. Der theoretische Wirkungsgrad von Brennstoffzellen liegt weit höher, als bei herkömmlichen Energiewandlern, weil sie chemische Reaktionsenergie direkt in Elektrizität und Wärme umwandeln – ganz ohne Zwischenschritte.

Voraussetzung für den Erfolg von Brennstoffzellen ist der Aufbau einer effizienten Wasserstoffenergiewirtschaft. Ein Großteil des Wasserstoffs wird heute noch aus Erdöl, Erdgas oder als Nebenprodukt von chemischen Produktionsprozessen erzeugt, was ein offensichtlicher Nachteil an der „sauberen Energieform" ist. Die Wasserstoffenergiewirtschaft hat das Ziel, Energie auf umweltverträglichere Art zu gewinnen. Zum Beispiel könnten große Anlagen von Solarzellen in der Sahara Elektrizität liefern, die zur Elektrolyse von Wasser verwendet werden kann. Neben der Sonne kann diese primäre Energieerzeugung natürlich auch durch andere regenerative Energiequellen, wie Wasser und Wind, übernommen werden. Weitere Möglichkeiten bestehen darin, aus Biomasse oder Grünalgen ebenfalls umweltfreundlich Wasserstoff zu gewinnen. Innerhalb einer solchen Wasserstoffenergiewirtschaft mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff können Brennstoffzellen einen Beitrag zur CO_2-Reduktion und damit zum Klimaschutz liefern.

Erfindung 1839 – Warum spielt die Brennstoffzelle bisher nur eine untergeordnete Rolle?

Als erster wesentlicher Beitrag zur Erfindung der Brennstoffzelle zählt die Entdeckung von Christian Friedrich Schönbein, einem Professor für Physik und Chemie an der Universität Basel. Er fand den „Brennstoffzellen-Effekt": Werden zwei Platindrähte in einer Elektrolyt-Lösung mit Wasserstoff und Sauerstoff umspült, so entsteht eine Spannung. Er veröffentlichte seine Ergebnisse im Jahre 1839. Sir William Robert Grove, ein Rechtswissenschaftler, der sich der Physik zugewandt hatte, zählt als Erfinder des ersten Brennstoffzellen-Apparates, welcher den zweiten wesentlichen Beitrag zur Erfindung der Brennstoffzelle darstellt. Sein Aufbau bestand aus mehreren in Reihe geschalteten galvanischen Elementen, wobei jedes einzelne analog zu Schönbein mit Wasserstoff und Sauerstoff versorgt wurde. Die erzeugte Spannung reichte aus, um Wasser in einem weiteren Behälter in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zu zerlegen.

Abb. v. l.: Christian Friedrich Schönbein (Quelle: www.chorum.de), Sir William Robert Grove (Quelle: [1]).

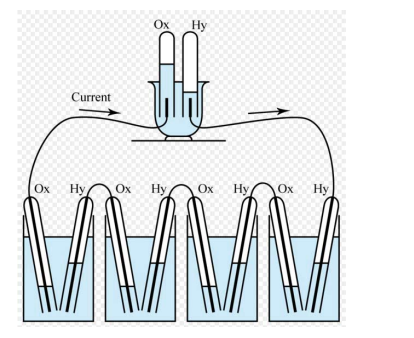


Abb.: Groves Brennstoffzellen-Schema (Quelle: Wikipedia).

Die Brennstoffzelle konnte sich jedoch leider nicht sofort durchsetzen, da mit der Entdeckung des elektrodynamischen Effektes auf einfache und leistungsfähigere Weise Elektrizität aus mechanischer Bewegung gewonnen werden konnte. Es gab jedoch bereits damals Visionäre, die die Möglichkeiten der Brennstoffzelle vorhergesagt haben. So stellte z.B. Wilhelm Ostwald, Lehrstuhl für physikalische Chemie in Leipzig, späterer Chemie-Nobelpreisträger, im Jahre 1887 fest: „Haben wir ein galvanisches Element, welches aus Kohle und dem Sauerstoff der Luft unmittelbar elektrische Energie liefert [...], dann stehen wir vor einer technischen Umwälzung, gegen welche die bei der Erfindung der Dampfmaschine verschwinden muss. Denken wir nur, wie [...] sich das Aussehen unserer Industrieorte ändern wird! Kein Rauch, kein Ruß, keine Dampfmaschine, ja kein Feuer mehr..." (Quelle: [1]). Wie in anderen technischen Bereichen brachte die Raumfahrt einen wesentlichen weiteren Schwung in die Entwicklung der Brennstoffzellen-Technologie, weil hier die Kosten für Material und reinsten Brenngasen keine Rolle spielten. Zum Beispiel wurden Brennstoffzellen in den Apollo und Gemini Projekten der NASA eingesetzt. Seitdem nimmt die Forschung zum Thema Brennstoffzellen kontinuierlich zu und man findet zunehmend mehr Anwendungen.

Wo wird die Brennstoffzelle bereits eingesetzt?

Die wesentlichen Anwendungsfelder der Brennstoffzellen-Technologie sind:

- Verkehr
- portable Elektrogeräte
- stationäre Gebäude-Energietechnik.

Die Anwendung in der Automobiltechnik hat bereits lange Tradition. Schon 1966 wurde der GM Electovan vorgestellt. Seitdem entwickelten verschiedene Automobilhersteller Testfahrzeuge mit Wasserstoff oder Methanol-Betrieb, mit reiner Brennstoffzellen-Technologie oder Hybridantrieb. Der HydroGen3 erzielt z.B. mit 68 Litern Flüssigwasserstoff und einem 129kW Brennstoffzellen-Stack eine Reichweite von 400 Kilometern mit Höchstgeschwindigkeit 150 km/h. Neben KFZ sind auch im öffentlichen Personennahverkehr Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Technik im alltäglichen Linienverkehr im Einsatz. Mit 9 Bussen fährt seit 2007 in Hamburg die größte Brennstoffzellen-Flotte der Welt. Der Wasserstoff dafür wird zu 100 Prozent regenerativ gewonnen. Auch auf dem Wasser finden Brennstoffzellen Einsatz, z.B. zum Antrieb des Passagier-Schiffs „Hydra".

Abb. v. l.: Ford Focus FCV (Quelle: canadiandriver.com), Brennstoffzellen-Linienbus (Quelle: Wikipedia).

Abb.: Brennstoffzellen-Schiff Hydra (Quelle: Wikipedia).

Ein weiterer sehr vielversprechender Einsatzbereich für Brennstoffzellen sind portable Elektrogeräte. Diese haben üblicherweise geringe Leistungsanforderungen und bieten ein ideales Einsatzfeld für PEM- oder Direkt-Methanol-Brennstoffzellen. Gegenüber Batterien und Akkus haben sie einige Vorteile: geringeres Gewicht, schnelleres Aufladen, längere Laufzeit, längere Lebensdauer, mehr Ladezyklen, Umweltverträglichkeit und Preisvorteil. So existieren bereits Systeme mit Leistungsbereichen von einigen Watt bis mehreren Kilowatt für den Einsatz in Kameras, Wohnmobilen, Baustellen-Ampeln oder Verkehrssensoren. Anfang 2008 wurde von einem kanadischen Energieversorger ein Durchbruch beim Einsatz in Handys gemeldet. Ohne größer als ein herkömmlicher Akku zu sein, konnte ein Serienhandy ein halbes Jahr mit 1 Watt Dauer- und 3 Watt Spitzenleistung betrieben werden. Eine Brennstoffladung hielt doppelt so lange wie eine entsprechende Akkuladung. Ähnlich wurde vor einigen Jahren ein MP3-Spieler vorgestellt, welcher mit 10ml Methanol über 60 Stunden Musik abspielen kann.

Abb.: KH4™ von Trulite (Quelle: Trulite).

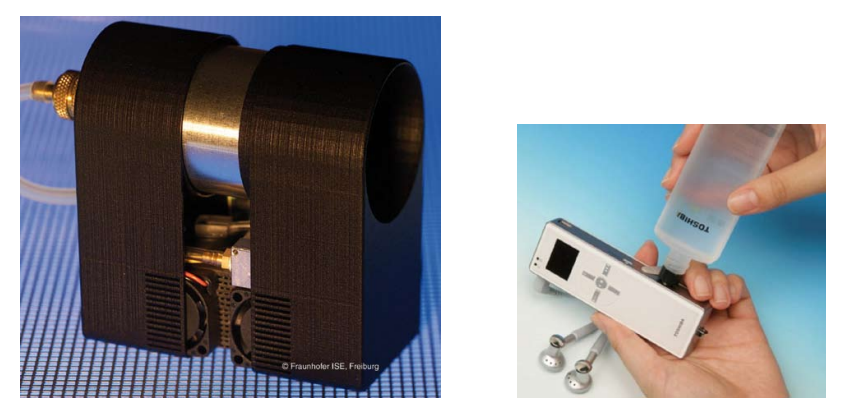


Abb. v. l.: Camcorder-Zelle (Quelle: Fraunhofer ISE, Freiburg), Methanol MP3-Player von Toshiba (Quelle: Toshiba).

Stationäre Systeme decken höhere Leistungsbereiche bis zu einigen Megawatt ab. Sie geben daher auch viel Wärme ab und sind daher oft als Kraft-Wärme-Kopplungs-Systeme konzipiert. Das bedeutet, sie werden zur gleichzeitigen Produktion von Strom und Erzeugung von Wärme eingesetzt. Hiermit kann beispielsweise die Energieversorgung und Beheizung von Gebäuden realisiert werden. Der Vorteil dieser kombinierten Nutzung ist eine höhere Energieausbeute, d.h. ein höherer Wirkungsgrad. Solche Systeme im Leistungsbereich von 200kW befinden sich bei verschiedenen Anbietern bereits in Serienproduktion und Vertrieb. Für den Heimgebrauch sind kleinere Anlagen im Bereich von wenigen Kilowatt verfügbar.

Abb. v. l.: Blockheizkraftwerk (Quelle: Henry Doorly Zoo Omaha), Hausenergiesystem von Ballard (Quelle: Ballard Power Systems).

Wie funktioniert eine Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzelle?

Eine Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzelle besteht aus zwei Kammerhälften, die durch eine Polymermembran voneinander getrennt sind. An der Anode (-) wird Wasserstoff durch Gaskanäle in die Kammer eingeleitet, an der Kathode (+) der Sauerstoff. Die Gase werden in einem porösen Material, der sogenannten Diffusionsschicht, gleichmäßig verteilt. Im Grenzbereich zur Membran befinden sich kleine Platin-Partikel, welche als Katalysatoren die eigentlichen chemischen Reaktionen einleiten. In einer 1. Reaktion gibt der Wasserstoff seine Elektronen ab und die Protonen wandern durch die Membran auf die andere Seite der Zelle. Die Membran ist für Elektronen nicht leitfähig, daher machen sich die Elektronen durch einen äußeren Stromkreis auf den Weg zur Kathode. Hierbei verrichten sie elektrische Arbeit und können ein elektrisches Gerät im Stromkreis betreiben. Es fließt also ein Gleichstrom. An der Kathode angekommen, springen die Elektronen auf die Sauerstoffmoleküle über. In einer 2. chemischen Reaktion wird aus den unterschiedlich geladen Wasserstoff- und Sauerstoffionen reines Wasser erzeugt. Insgesamt wird also aus Wasserstoff und Sauerstoff Elektrizität, Wasser und Wärme gewonnen.

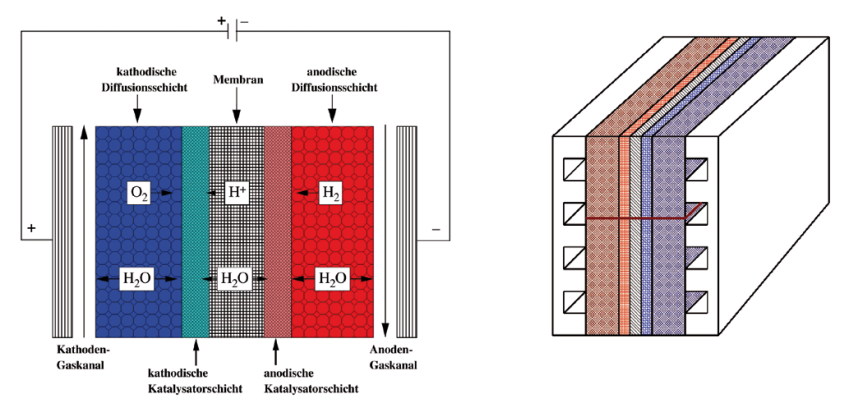

+
–
kathodische Diffusionsschicht
Membran
anodische Diffusionsschicht
O_2
H^+
H_2
H_2O
H_2O
H_2O
+
–
Kathoden-Gaskanal
kathodische Katalysatorschicht
anodische Katalysatorschicht
Anoden-Gaskanal

Abb.: 2D Querschnitt durch 3D Zelle.

Theoretisch und ohne Belastung kann eine PEM-Brennstoffzelle eine elektrische Spannung von 1,23 V erzeugen. In der Praxis werden jedoch nur etwa 0,6 V bis 0,9 V erreicht. Gründe hierfür sind beispielsweise die endliche Geschwindigkeit der Gasmoleküle oder Ohm'sche Verluste innerhalb der Zelle. Da die theoretisch mögliche Ausbeute in der Praxis noch nicht erreicht wird, ist eine entsprechend optimierte Bauweise erforderlich. Zur Optimierung von Brennstoffzellenkomponenten werden daher in jahrelangen Untersuchungen unterschiedlichste Material- und Designparameter experimentell durchgeprüft.

Warum ist die Brennstoffzelle auf vielen Skalen interessant?

Brennstoffzellen-Systeme zeichnen sich durch hohe Komplexität der Prozesse ab. Insbesondere müssen verschiedene Längen- und Zeitskalen bei der Untersuchung und beim Verständnis für Brennstoffzellen berücksichtigt werden. Wichtige Längenskalen sind die Mikrostruktur-, die Zell-, die Stack- und die System-Skala.

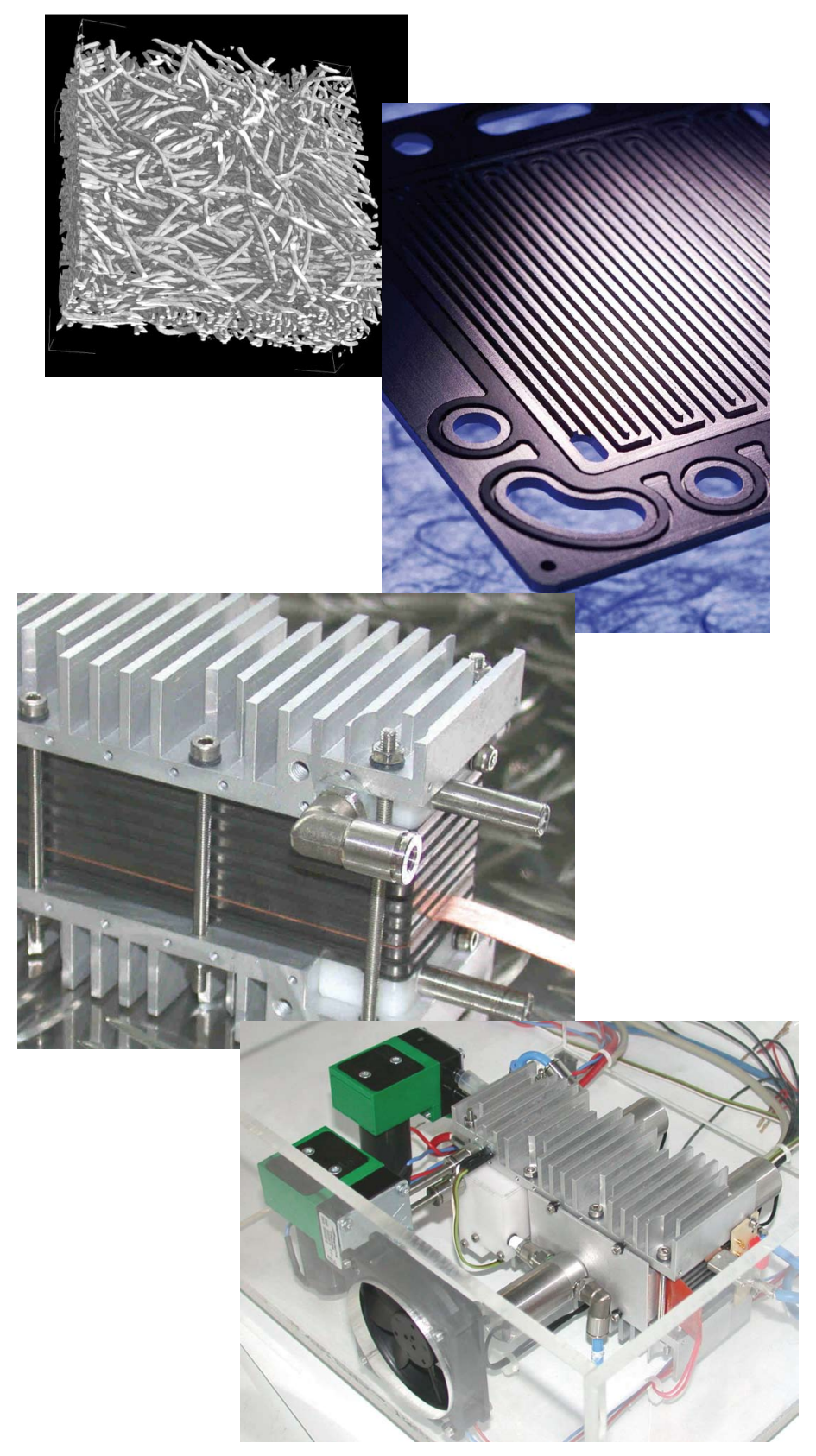


Abb.: Mikrostruktur-, Zell-, Stack- und Systemskala
(Quelle: Fraunhofer ITWM, Fraunhofer ISE, BMBF-Projekt PEMDesign).

(Autoren: Prof. Mario Ohlberger, Bernard Haasdonk)

wissen.leben
WWU Münster

AFO
Arbeitsstelle Forschungstransfer

Deutschland
Land der Ideen
Ausgewählter Ort 2008

WESTFÄLISCHE
WILHELMS-UNIVERSITÄT
MÜNSTER

Brennstoffzellen

Prof. Mario Ohlberger, Bernard Haasdonk

Wie können der Computer und die Mathematik die Weiterentwicklung unterstützen?

Die Mikrostrukturskala zeigt z.B. die Faserstruktur der Gasdiffusionsschicht. Optimale Anordnung und Kontaktierung dieser Fasern sind wichtig für die elektrische Leitfähigkeit und die Diffusionseigenschaften des Materials. Aufgrund der kleinen Längenskalen sind hier Bewegungen oder Reaktionen von einzelnen Gasmolekülen relevant. Auf der größeren Zellskala sind die Materialien zu den verschiedenen Schichten einer Brennstoffzelle zusammengefügt. Die Gase werden hier als Kontinuum betrachtet und die physikalischen Gesetze der Thermodynamik bestimmen ihre Bewegungen, wie beim Gastransport durch die mäanderförmigen Gaskanäle. Auf der sogenannten Stack-Skala sind viele Zellen in Reihe geschaltet, um die Spannung und Leistung der Anordnung zu steigern. Hier ist eine Kühlung wichtig, da die Zellen nun sehr kompakt aufeinander liegen. Auf der System-Skala wird ein Brennstoffzellen-Stack um die nötige Peripherie angereichert, wie Pumpen, Gasventile, Befeuchter, Kühlkreisläufe, etc., um die komplexere Anordnung in vernünftigen Betriebszuständen zu halten. Wird z.B. eine PEM-Brennstoffzelle zu trocken, wird die Membran zerstört. Wird eine Zelle zu feucht oder findet sogar eine Flutung statt, ist die Gasdiffusion behindert und damit liefert die Zelle keinen Strom mehr. Auf der Systemskala ist also insbesondere eine aktive Kontrolle und Steuerung des Wasserhaushaltes erforderlich.

Wie können der Computer und die Mathematik die Weiterentwicklung unterstützen?

Viele Fragen sind in der Effizienzsteigerung von Brennstoffzellen noch offen: Wie porös müssen die Elektroden sein, damit die elektrochemische Umsetzung an den vergrößerten Oberflächen am besten funktioniert? Wie groß sollten die eingefrästen Gaskanäle in den Graphitplatten sein, durch die Gase in die Kammern eingeleitet werden? Der Zugang der Mathematik zu diesen Fragen ist nicht das physikalische Experiment, sondern das mathematische Modell und die anschließende numerischen Simulation. Hierdurch werden Zeit und Resourcen realer Experimente gespart. Die mathematische Modellierung physikalischer Prozesse beruht auf grundlegende Gesetze, wie etwa der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung. Auf ihrer Basis lassen sich sogenannte partielle Differentialgleichungen formulieren, die zum Beispiel die Strömung in einer Brennstoffzelle beschreiben. Die Mathematik beschäftigt sich nun mit der Frage, ob sich Funktionen als Lösungen solcher komplexen Gleichungen finden lassen. Dieses Unterfangen ist jedoch äußerst schwierig und teilweise aussichtslos. In der Numerischen Mathematik werden daher Methoden entwickelt, die es ermöglichen, solche Lösungen näherungsweise mit Hilfe von Computern zu bestimmen.

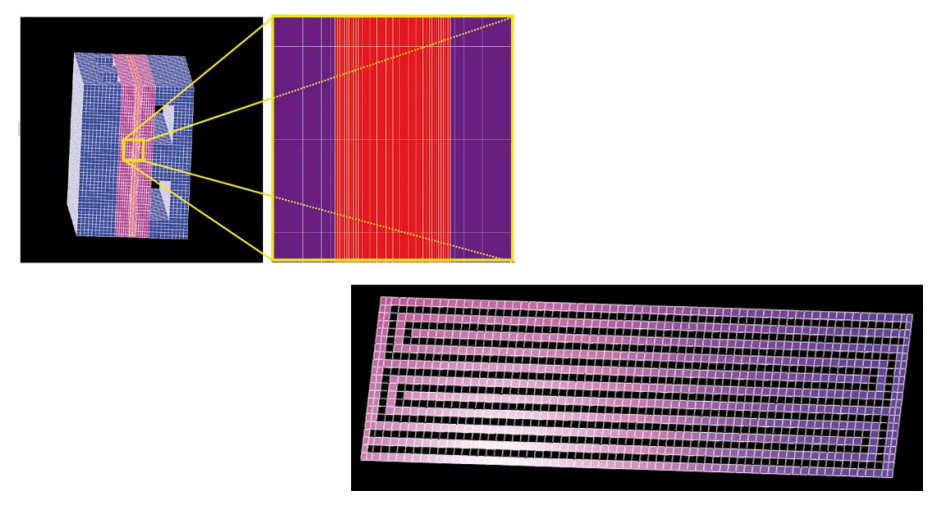


Abb.: Beispiel eines Gitters für einen kleinen Teil einer Zelle, Vergrößerung daraus, Beispiel für ein Gitter einer kompletten Zelle mit mäanderförmigen Gaskanälen.

Dieser Vorgang lässt sich folgendermaßen skizzieren:

- Es erfolgt eine Zerlegung des betrachteten Gebietes (z.B. der Brennstoffzelle) in einfache geometrische Teilgebiete, wie z.B. Würfel oder Tetraeder.
- Auf den Teilgebieten werden Funktionen mit endlich vielen Parametern definiert. Eine Funktion, welche man auf dem gesamten Gebiet darstellen möchte, erhält man durch Kombinieren dieser lokalen Funktionen.
- Mit Hilfe von numerischen Verfahren kann auf der Basis des mathematischen Modells ein Gleichungssystem aufgestellt werden, in dem jeder Parameter einer lokalen Funktion eine Unbekannte darstellt.
- Die Gleichungssysteme können bis zu mehreren Millionen Unbekannten enthalten und werden mit modernsten mathematischen Methoden auf Hochleistungsrechnern gelöst.

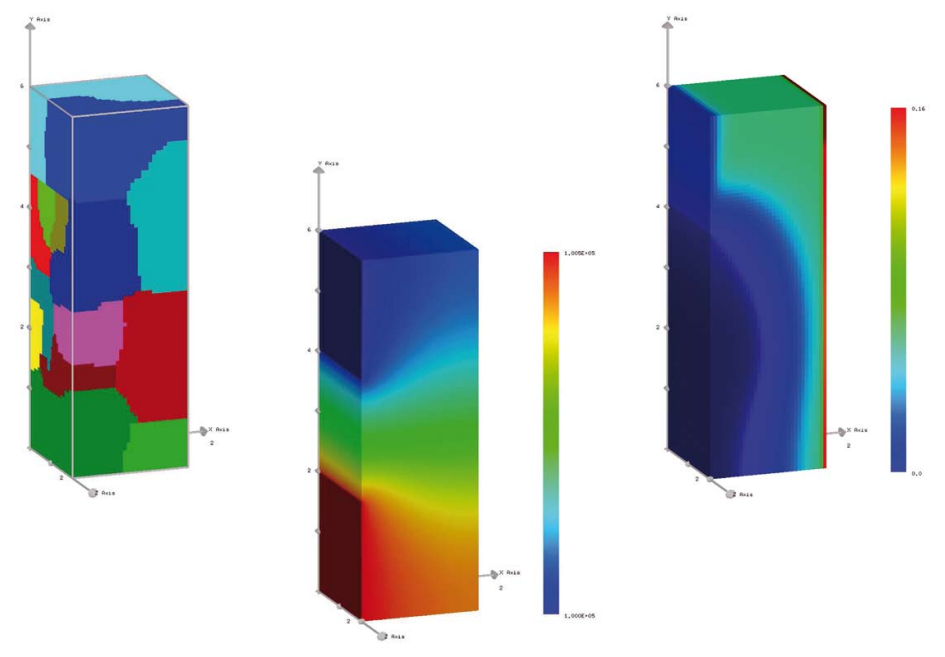


Abb. 1-3: Simulationsergebnisse für ein Symmetrie-Element der Gasdiffusionsschicht: Gitterverteilung auf 16 Prozessoren, Simulationsergebnis für den Druck, Simulationsergebnis für die Wassersättigung (Quelle: R. Klöfkorn).

Zur effizienten Berechnung dieser numerischen Lösungen müssen ausgeklügelte Programme entstehen, die sehr komplex sind, und häufig nur in Zusammenarbeit verschiedener Entwickler realisiert werden können. Hierfür wird daher auch von Mathematikern professionelle Software-Entwicklung betrieben.

Als Programmierphilosophie ist z.B. sogenanntes „Schnittstellen-basiertes" Programmieren unter Wiederverwendung von bestehenden Softwarebibliotheken wichtig. Unter strenger Beachtung dieses Prinzips wurde die Numerik-Bibliothek DUNE (www.dune-project.org) realisiert. Diese wird in Zusammenarbeit mehrerer Gruppen in ganz Deutschland weiter-entwickelt und ist Grundlage zahlreicher wissenschaftlicher Projekte.

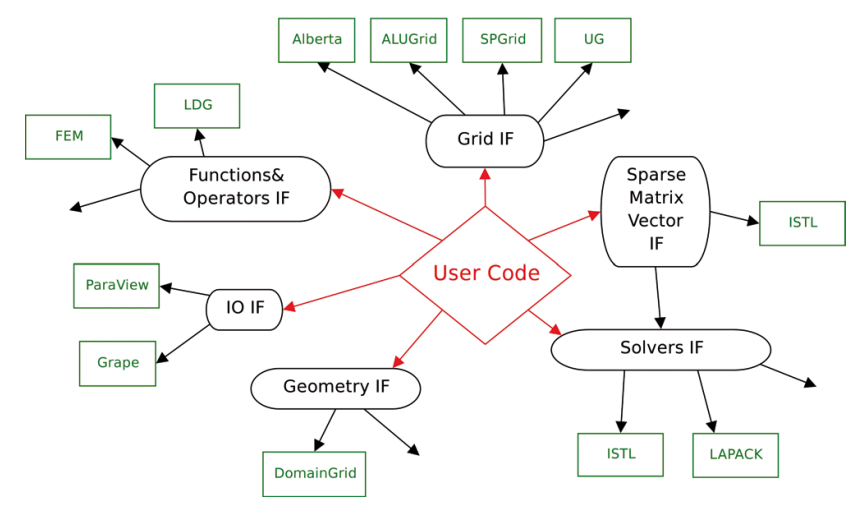


Abb.: Konzept eines Simulations-Programmes mit Schnittstellenbasierter Programmierung und Verwendung bestehender Bibliotheken.

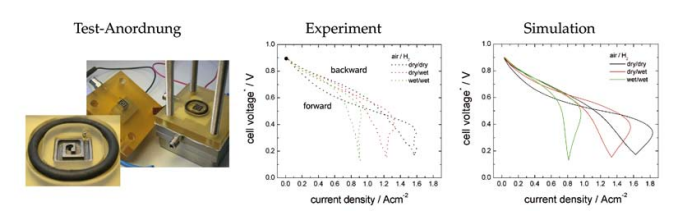
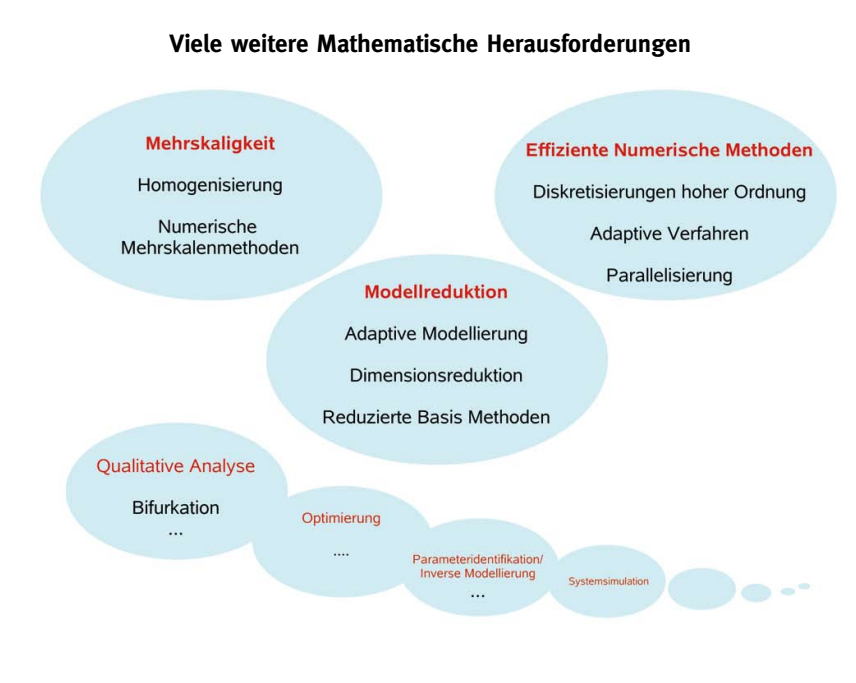


Abb.: Vergleich zwischen Experiment und Simulation zeigt gute Übereinstimmung des Hysterese-Effekts durch Flüssigwasser in der Testzelle (Quelle: Fraunhofer ISE, Freiburg, Gerteisen, Heilmann, Ziegler, 08).



Viele weitere Mathematische Herausforderungen

Mehrskaligkeit
Homogenisierung
Numerische Mehrskalenmethoden

Effiziente Numerische Methoden
Diskretisierungen hoher Ordnung
Adaptive Verfahren
Parallelisierung

Modellreduktion
Adaptive Modellierung
Dimensionsreduktion
Reduzierte Basis Methoden

Qualitative Analyse
Bifurkation
...

Optimierung
...

Parameteridentifikation/ Inverse Modellierung
...

Systemsimulation

Abb.: Beispiele von mathematischen Aspekten, die in der Brennstoffzellen-Forschung relevant sind.

Quo Vadis Brennstoffzelle?

Der Erfolg der Brennstoffzelle als alltägliche Energiequelle hängt wesentlich von den Entwicklungen in der Wasserstoffwirtschaft ab. Wasserstoff darf nicht mehr durch Elektrolyse mit Atomstrom oder gar aus Erdöl gewonnen werden, sondern muss wesentlich regenerativ erzeugt werden. Dies kann einerseits auf Öko-Strom basieren, der in geeigneten Regionen der Erde gewonnen wird. Vielleicht wird es sonnenreichen Entwicklungsländern durch Solar-Parks ermöglicht, bedeutende Rollen in der Wasserstoffwirtschaft zu spielen? Vielleicht wird es „Wasserstoff-Scheichs" geben? Andererseits besteht die Hoffnung, dass auch auf rein biologische Weise, Wasserstoff mit Hilfe von spezialisierten Algen produziert werden kann. Es sind auch entsprechende Verteilungsstrukturen notwendig. Z.B. wird es für den Verkehrsbereich eine Verbreitung von öffentlichen Wasserstoff-Tankstellen geben. Vielleicht erzeugt in einigen Jahrzehnten auch jedes Haus mit Hilfe seiner Solarzellen einen Teil seines selbst benötigten Wasserstoffs? Vielleicht wird Versorgung mit Wasserstoff so selbstverständlich wie Erdgas und Häuser bekommen eigene Gasleitungen? Neben Steckdosen haben wir vielleicht Gasbuchsen, an denen man seine portablen Geräte wie Laptop, Handy oder MP3-Player sekundenschnell auftanken kann?

Es gibt sehr viele Initiativen, die die Brennstoffzellentechnik vorantreiben und in der Öffentlichkeit bekannt machen. Hierzu gibt es nationale und internationale Aktivitäten mit Beteiligung von Forschung und Industrie. Zum Beispiel gibt es den Deutschen Wasserstoff-Verband, welcher sich die Bündelung der deutschen Aktivitäten der Wasserstoffnutzung zur Aufgabe gemacht hat. Die vom Verband erstellte „Roadmap für den Aufbau einer Wasserstoff-Infrastruktur in Deutschland" stellt den Beginn einer nationalen Strategieinitiative zur Einführung der Wasserstofftechnologie dar. Weiter existieren Länderinitiativen, z.B. das „Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle NRW", welche Zusammenführung von Forschung und Wirtschaft als Aufgabe hat und zahlreiche Kooperationsprojekte umfasst, die vom Land bisher mit einem Gesamtvolumen von 40 Millionen Euro gefördert wurden. Auch der Bund fördert Aktivitäten zur Brennstoffzellen-Forschung im Rahmenprogramm „Netzwerke Grundlagenforschung für Erneuerbare Energien und Rationelle Energieanwendung". Die „Wasserstoff-Expo" in Hamburg ist seit 2001 eine etablierte regelmäßige Veranstaltung der Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Branche. Ein weiteres nennenswertes Projekt ist die 1999 gestartete „Califonia Fuel Cell Partnership (CaFCP)". Dies ist ist eine wegweisende Zusammenarbeit von Automobilkonzernen, Treibstoff-Lieferanten, Brennstoffzellen-Herstellern und US-Regierungsvertretern. Das gemeinsame Ziel ist es, die Brennstoffzellen-basierte Antriebstechnik und Infrastruktur zu entwickeln und die Brennstoffzellen-Technologie zur Serienreife zu führen.

Abb. v. l.: Wasserstofftankstelle (Quelle: canadiandriver.com),
Wasserstoffproduktion durch Algen (Quelle: P. Grewer).

Referenzen und weitere Informationen:

Ausführlichere Darstellungen und Vertiefung zu Brennstoffzellen bieten die folgenden Webseiten und Bücher, welche auch als Quellen für diese Präsentation verwendet wurden:

[1] Informationsseite Brennstoffzelle.de: **www.diebrennstoffzelle.de**

[2] Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle NRW: **www.brennstoffzelle-nrw.de**

[3] BMBF-Verbundprojekt PEMDesign 2005-2008: **www.pemdesign.de**

[4] Larminie, A. Dicks. „Fuel Cell Systems Explained", Wiley Interscience, 2000.

Für weiteren Kontakt:

Prof. Dr. Mario Ohlberger
Institut für Numerische und Angewandte Mathematik
Einsteinstr. 62
D-48149 Münster

E-Mail: mario.ohlberger@uni-muenster.de
Internet: http://www.uni-muenster.de/math/num/Arbeitsgruppen/ag_ohlberger

Center for
Nonlinear Science

(Autoren: Prof. Mario Ohlberger, Bernard Haasdonk)

wissen.leben
WWU Münster

AFO
Arbeitsstelle Forschungstransfer

Deutschland
Land der Ideen
Ausgewählter Ort 2008