

# EUtech Scientific Engineering entwickelt eine Regelung für ein Brennstoffzellensystem

Bild mit freundlicher Genehmigung von MTU CFC Solutions.

Zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls müssen Energieversorger nach effizienteren Strategien zur Stromerzeugung suchen. Ein Beispiel dafür ist die Kraft-Wärme-Kopplung in Kleinkraftwerken für Einzelhaushalte. Mögliche Kandidaten für solche Anlagen sind Polymer-Elektrolyt Membran-Brennstoffzellen (PEM FCs).

PEM-FCs stellen große Herausforderungen an die Regelungstechnik. Die in die Brennstoffzelle einströmende Gasmischung unterliegt strengen Anforderungen, gleichzeitig darf die Lastdynamik den Betrieb des Zellstapels weder beeinträchtigen noch destabilisieren – ein fehlerhafter Betrieb könnte den Stapel sogar zerstören. Die Elemente zur Gaserzeugung und -reinigung sowie zur Wärmeintegration sind wesentliche Bestandteile des gesamten Brennstoffzellen-Systems und erhöhen die Komplexität des Regelungsproblems.

EUtech Scientific Engineering sollte eine Brennstoffzellen-Regelung entwerfen – noch bevor die Brennstoffzellenanlage verfügbar war. Es gab also keine Möglichkeit, den Regler an einer realen Anlage unter echten Betriebsbedingungen zu testen. Die Lösung lag im Einsatz von Model-Based Design und Rapid Prototyping: Das Team entwickelte die Regelalgorithmen an einem Simulink-Modell der Brennstoffzelle. Durch Simulation und automatische Codegenerierung konnten so auch aufwändige Testreihen schnell, reproduzierbar und ökonomisch durchgeführt werden.

## Modellierung des Brennstoffzellen-Systems

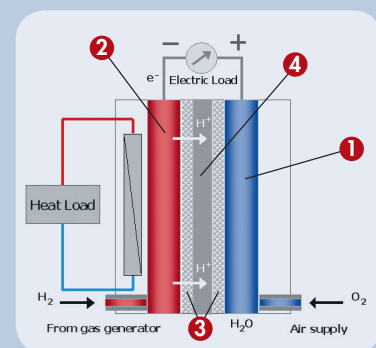
Die Ingenieure modellierten das Brennstoffzellen-System in Simulink mit Hilfe thermodynamischer Modelle aus FCLib, einer als Third-Party Produkt erhältlichen Simulink-Bibliothek für thermodynamische Berechnungen und Modellierung von Brennstoffzellensystemen. FCLib ist mit xPC Target kompatibel und eignet sich daher auch für Hardware-in-the-Loop (HIL) Simulationen. Das Brennstoffzellen-System umfasst mehrere Dutzend Komponenten. Um die Entwicklung zu vereinfachen, wurde das System in acht funktionale Subsysteme aufgeteilt:

- Brenner
- Medienzufuhr
- Dampfreformer
- Gasreinigung
- Brennstoffzellen-Stack
- Elektrisches System und Spannungswandler
- Kühlkreislauf
- Systemüberwachung und -bilanzierung

Da das Brennstoffzellen-Modell sowohl für die Systemevaluierung als auch zur

VON FRANCESCO TURONI,  
ABAS SADATSAKAK, MICHAEL MLYNSKI,  
ALEXANDER HLAWENKA UND  
MICHAEL SCHREIBER, EUTECH

## Polymer-Elektrolyt Membran-Brennstoffzellen



In einem PEM-FC-System werden Wasserstoff und Sauerstoff an der Kathode (1) zu Wasser rekombiniert. Dabei entstehen elektrischer Strom und Wärme. Von der Anode, dem negativen Pol der Brennstoffzelle (2), fließen die Elektronen in einen externen Stromkreis. Dem Katalysator an der Kathode (Pluspol) wird Sauerstoff zugeführt (3).

Die Kathode leitet die Elektronen aus dem externen Stromkreis zum Katalysator, wo diese mit Protonen und Sauerstoff zu Wasser reagieren. Als Elektrolyt fungiert eine Austauschmembran (4), die positiv geladene Ionen durchlässt, Elektronen aber blockiert. In der Regel werden mehrere solcher Brennstoffzellen zu einem Zellstapel zusammengestellt.

## Das Kyoto-Protocol

Das Kyoto-Protokoll ist ein Zusatz zur internationalen Klimakonvention, der den Unterzeichnern verbindliche Ziele für die Reduzierung von Treibhausgasen vorschreibt. Länder, die das Protokoll ratifiziert haben, verpflichten sich zur Reduktion ihrer Emissionen von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen oder zum ausgleichenden Handel mit Emissionsrechten.

Optimierung eingesetzt werden sollte, wurden darin physikalische Erhaltungssätze und umfassende thermodynamische Zustandsfunktionen implementiert. Die Massen- und Energiebilanzen werden automatisch sowohl auf der Komponentenebene als auch auf der Systemebene berechnet.

### Der Reglerentwurf

Das Verhalten des Brennstoffzellen-Systems ist ausgeprägt nichtlinear und diskontinuierlich. Während der Anfahrsequenz durchläuft die Steuerung mehrere Phasen, in denen zunächst Luft, dann Wasserdampf und schließlich Gas durch die Gaserzeugung strömen, was zu abrupten und unstetigen Eigenschaftsänderungen führt. Die Reglerparameter müssen daher ständig zustandsabhängig neu gesetzt werden. Zudem müssen die in der Gaserzeugung und der Gasreinigung stattfindenden, nichtlinearen chemischen Reaktionen berücksichtigt werden.

Angesichts der Komplexität des Brennstoffzellen-Systems entschied sich das

Team, die Regelung schrittweise zu entwickeln. Man entwarf zunächst alle Subsysteme und verknüpfte diese anschließend mit den erforderlichen Steuerelementen aus einer Simulink-Bibliothek.

Die Steuerung bestand aus vier funktionalen Gruppen:

- Zustandsautomat
- Steuerungen
- Regelkreise
- Alarmüberwachung

Während des Betriebs werden die Subsysteme Gaserzeugung, Gasreinigung und Brennstoffzelle in verschiedenen Zuständen betrieben. Der jeweilige Betriebszustand wird von den Medien (Gas oder Dampf), den Lastbedingungen und dem Betriebsmodus (Anfahren, Normalbetrieb, Abschalten und Notlauf) bestimmt. Die Überwachungslogik hierfür wurde als Zustandsautomat in Stateflow® modelliert.

Die einzelnen Regelkreise sind eng miteinander gekoppelt; durch eine klar definierte Überwachungslogik ließ sich

die gegenseitige Abhängigkeit jedoch deutlich reduzieren. Um sanfte Übergänge sicher zu stellen, wurden die Reglerparameter für jeden einzelnen Zustand separat abgestimmt. In den meisten Fällen genügte dazu ein gut eingestellter und gegen Selbstverstärkung (Wind-Up) geschützter PI-Regler.

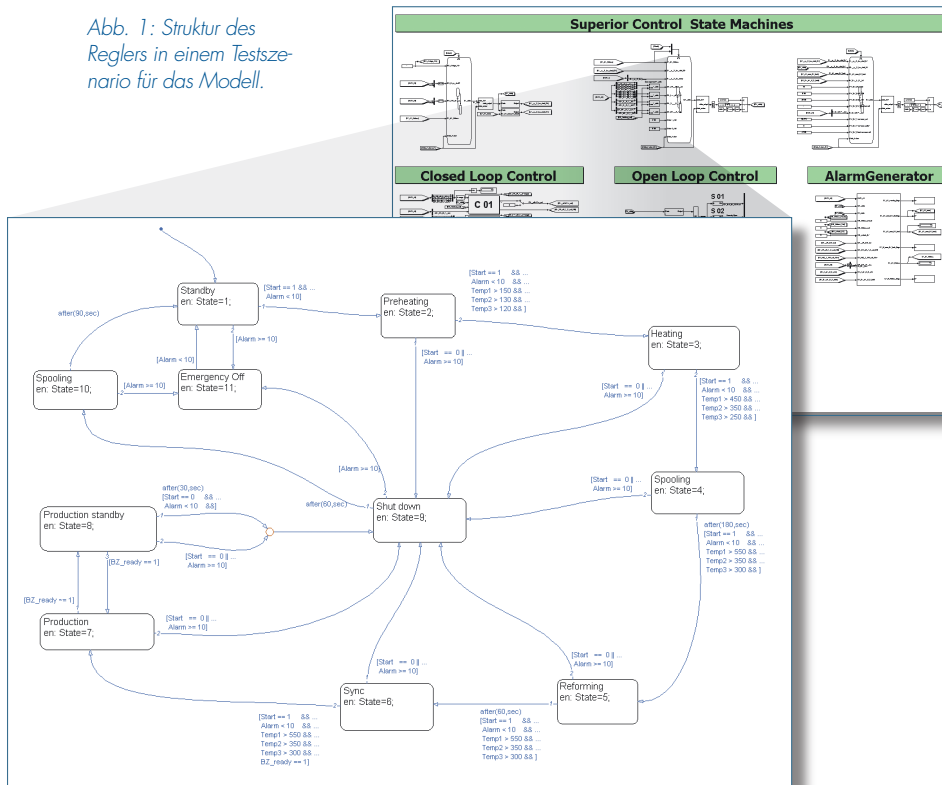
Wegen des ausgesprochen nichtlinearen Verhaltens des Brennstoffzellen-Stacks konnten für diesen keine klassischen PID-Regler eingesetzt werden. Aus diesem Grund implementierten die Ingenieure einen auf dem Scalar Fuzzy Control basierenden MIMO-Fuzzyregler, der über seine Regelbasis auf den Brennstoffzellen-Stack abgestimmt wurde. Mit Hilfe zustandsabhängiger Zuordnungstabellen, die in Stateflow erstellt wurden, wurden die Sollwerte (Sollzustände) für die Aktuatoren festgelegt (Abb. 1).

### Entwurf der Alarmüberwachung

Die System- und Alarmüberwachung greift nicht nur in Notfall-Situationen ein, sondern stellt auch sicher, dass der Prototyp der Brennstoffzelle jederzeit innerhalb sicherer Grenzen betrieben wird. Dies war auch aus Kosten- und Sicherheitsgründen gefordert: Einige der eingesetzten Komponenten waren Einzelanfertigungen, die nur mit hohem Kosten- und Zeitaufwand zu ersetzen gewesen wären.

Um Anpassungen ohne Codeänderungen vornehmen zu können wurde eine generische Alarmverwaltung entwickelt, die

Abb. 1: Struktur des Reglers in einem Testszenario für das Modell.



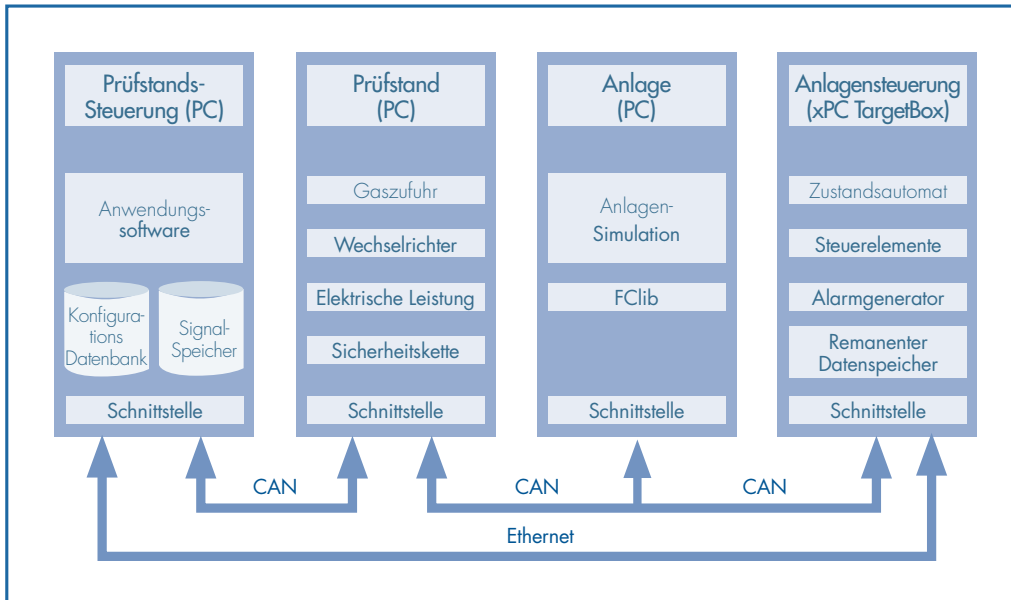


Abb. 2: Im HIL-Aufbau ist die Steuerung des Brennstoffzellen-Systems (Anlage) von der des Prüfstands getrennt.

es erlaubt, Alarmer über die Steuerung des Prüfstands zu löschen, neu anzulegen, zu parametrieren sowie zu aktivieren und zu deaktivieren. Diese Funktionalität erweist sich als besonders wertvoll, wenn neue oder komplexe Systeme vor Ort unter engen Zeitvorgaben getestet werden müssen.

### Erzeugung von Embedded Code

Nach gründlichen Tests des Prozessmodells der Brennstoffzelle und dessen Steuerung erzeugte das Team den Embedded Code mit Real-Time Workshop® und Stateflow® Coder. Dazu wurde das Reglermodell an den I/O-Schnittstellen vom Prozessmodell getrennt. Dies gelang problemlos mit Hilfe von Datenkonvertierungs-Blöcken, die Signalwerte des CAN-Busses automatisch in physikalische Werte umwandeln und umgekehrt.

Der automatisch erzeugte Programmcode wurde kompiliert und dann mit xPC Target als Echtzeit-Betriebsumgebung getestet. Die umfangreiche Steuerungsfunktionalität erforderte leistungsfähige Hardware, hier kam die PC-kompatible xPC TargetBox® zum Einsatz. Die Kommunikation zwischen Prozess (Anlagenmodell) und Regelungs-

system wurde über einen CAN-Bus realisiert, wodurch der Aufwand für die Verkabelung gering gehalten wurde.

### Hardware-in-the-Loop Tests

Nach dem Kompilieren und der Installation des ausführbaren Programms auf dem Embedded System konnten die Echtzeittests der Reglersoftware beginnen. Die fertige Brennstoffzelle war zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar und außerdem wäre das Risiko, den teuren Prototypen mit ungetesteter Software zu beschädigen, einfach zu hoch gewesen.

Als alternativer Ansatz boten sich daher HIL-Tests an (Abb. 2). Das Prozessmodell musste dazu ausreichend genau sein, um die Embedded Software in allen relevanten Betriebszuständen testen zu können.

Die Echtzeitsimulation des Prozesses wurde auf einem handelsüblichen Industrie-PC eingerichtet. In der HIL-Simulation wurde das Regelungssystem sowohl im Normalbetrieb als auch unter Extrembedingungen innerhalb der Betriebsgrenzen voll ausgetestet. Dazu schrieb das Team Testskripte, die automatisch in Batch-Läufen abgearbeitet wurden

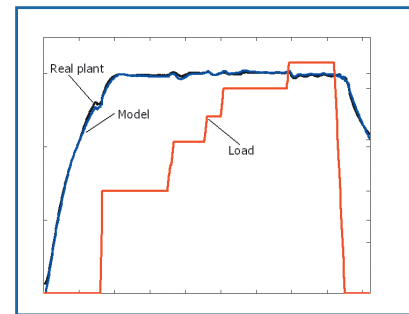


Abb. 3: Ergebnisse der Simulation der Temperaturregelung.

und so die Entwicklungszeit signifikant verkürzt. Das Code Review und die Tests bestätigten die Effizienz des erzeugten Programmcodes.

Die Simulationsergebnisse stimmten gut mit den später gemessenen Verläufen am realen Prozess überein. Abbildung 3 zeigt, wie gut die Temperatur der Gaszerzeugung auch unter extremen Lastschwankungen eingehalten wird. ◀

### Weitere Information

- EUTECH Scientific Engineering GmbH  
[www.eutech-scientific.de](http://www.eutech-scientific.de)
- Steuerungsentwurf  
[www.mathworks.de/res/control\\_design](http://www.mathworks.de/res/control_design)

## Quellen

### WEBSITE

[www.mathworks.de](http://www.mathworks.de)

### TECHNISCHER SUPPORT

[www.mathworks.de/support](http://www.mathworks.de/support)

### ONLINE USER COMMUNITY

[www.mathworks.de/matlabcentral](http://www.mathworks.de/matlabcentral)

### DEMOS

[www.mathworks.de/products/demos](http://www.mathworks.de/products/demos)

### SCHULUNGEN

[www.mathworks.de/training](http://www.mathworks.de/training)

### PRODUKTE VON DRITTANBIETERN

[www.mathworks.de/connections](http://www.mathworks.de/connections)

### WELTWEITE KONTAKTINFORMATION

[www.mathworks.de/contact](http://www.mathworks.de/contact)

### E-MAIL

[info@mathworks.de](mailto:info@mathworks.de)



©2007 The MathWorks, Inc. MATLAB, Simulink, Stateflow, Handle Graphics, Real-Time Workshop, SimBiology, SimHydraulics sowie xPC TargetBox sind eingetragene Warenzeichen und SimEvents ist eine Handelsmarke von The MathWorks, Inc. Andere Produkt- oder Markennamen sind Handelsbezeichnungen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Eigentümer.