

Rapid Control Prototyping eines Fuzzy-Reglers zur Stabilisierung von Brennstoffzellen

M. F. Mlynski, A. Sadat Sakkak, J. van den Broek, M. Schreiber
EUtech Scientific Engineering GmbH, Aachen, Germany

Kurzfassung

Die Funktion von Protonenelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-FC) hängt von vielen Einflussfaktoren ab, die einen stabilen Betrieb erschweren, insbesondere wenn sie bei niedrigen Drücken betrieben werden. Um einen zuverlässigen technischen Betrieb zu gewährleisten, müssen die Brennstoffzellen überwacht und geregelt werden. Häufig liegt für die hohe Dynamik der Brennstoffzelle und das ausgeprägte nicht-lineare Verhalten keine analytische Beschreibung vor, so dass die Entwicklung eines konventionellen Reglers schwierig ist. Hingegen ist es sehr wohl möglich, die Brennstoffzellen im *manuellen* Betrieb auf Grund der bestehenden Erfahrung zu stabilisieren. Für den automatisierten Betrieb bietet es sich daher an, einen Fuzzy-Regler zu implementieren.

Um die vorliegenden Erfahrungswerte schnell in einen Fuzzy-Regler implementieren und diesen effektiv testen zu können, wurde der Fuzzy-Regler mit Hilfe des Rapid Control Prototyping (RCP) entwickelt. Dazu wurde zunächst ein Modell der realen Brennstoffzelle erstellt, mit dem der Fuzzy-Regler verifiziert und validiert wurde. Durch dieses Vorgehen konnte in sehr kurzer Zeit die LabView Prüfstandssoftware um einen robusten Regler erweitert werden, der den vollständig automatischen Betrieb von PEM-Brennstoffzellen auch unter ungünstigen und schwierigen Randbedingungen ermöglicht.

Abstract

An inherently stable operation of proton exchange membrane fuel cells (PEM-FC) may be difficult to achieve, since their function depends on many interrelated factors, especially if operated at low pressure. Therefore fuel cells must be operated in a supervised and controlled mode. Unfortunately analytic knowledge of the fuel cell dynamics and its nonlinear behavior is not readily available at physical level. This makes the development of a conventional controller difficult. However, it is very often possible to *manually* operate the fuel cell with existing experience. It thus seems reasonable to develop and implement a fuzzy controller for automatic operation of the fuel cell.

The fuzzy controller was developed by following the rapid control prototyping (RCP) approach. This helped to quickly implement and test the knowledge. A phenomenological and very realistic model of the fuel cell was designed to test and verify the fuzzy controller. The existing test bench software was successfully extended and expanded with a robust controller which allows a fully automatic operation of PEM-FCs, even under adverse and difficult conditions.

Einleitung

Werden beim Betrieb von Protonenelektrolytmembran-Brennstoffzellen (PEM-FC) die Betriebsbedingungen nicht exakt eingehalten, so kann es mitunter zu Instabilitäten kommen, die zu einzelnen oder auch mehrfachen Zellspannungseinbrüchen führen. In einem solchen Fall muss der Betrieb der Brennstoffzelle komplett unterbrochen werden, um eine dauerhafte Schädigung der Brennstoffzelle zu vermeiden.

Solche Instabilitäten können vor allem durch Konzentrationsverluste an der Membran entstehen, die durch geringen Überdruck auf der Anoden- und Kathodenseite sowie durch Verwendung von Umgebungsluft begünstigt werden. Bei unzureichendem Wärmemanagement kann sich zusätzlich die notwendige Reaktanden-Konzentration drastisch verringern. Ein inadäquates Wassermanagement verstärkt diesen Effekt und kann zum Austrocknen oder zur Kondensatbildung führen [7], [8]. Solche und ähnliche Probleme werden auch aus praktischen Anwendungen gemeldet (siehe beispielsweise [2], [3], [4]).

Um einen zuverlässigen technischen Betrieb zu gewährleisten, müssen die Brennstoffzellen daher überwacht und geregelt werden. Konventionelle Steuerungen und Regler stoßen schnell an ihre Grenzen, da die Dynamik der Brennstoffzellen überaus komplex und nichtlinear und zudem durch zahlreiche Wechselwirkungen geprägt ist. Auch liegen analytische Beschreibungen der Instabilitäten von Brennstoffzellen nur unzureichend vor. Hingegen ist es sehr wohl möglich, die Brennstoffzellen im *manuellen* Betrieb auf Grund gesammelter Erfahrungen stabil zu betreiben. Ausgehend von diesen Erfahrungswerten wurde daher ein wissensbasierter Regler mit Methoden des Fuzzy-Controls entwickelt.

Um den Fuzzy-Regler schnell implementieren und effektiv testen zu können, ohne dabei von der Verfügbarkeit eines Brennstoffzellensystems abhängig zu sein, wurde er mit Hilfe des Rapid Control Prototyping (RCP) entwickelt.

Rapid Control Prototyping

Ursprünglich als neues Vorgehensmodell für die Systementwicklung erarbeitet, kann Rapid Control Prototyping (RCP) heute als Erweiterung von klassischen Vorgehensmodellen angesehen werden [1]. So lassen sich die Methoden des RCP recht einfach in verschiedene Vorgehensmodelle wie beispielsweise dem Wasserfallmodell, dem V-Modell oder dem W-Modell integrieren [6]. Dabei besteht die Erweiterung des Vorgehensmodells im Wesentlichen darin, dass neben dem zu entwickelnden System (Hard- und/oder Software) ein Modell des zu überwachenden bzw. zu regelnden Prozesses (Regelstrecke) erstellt wird. Mit Hilfe dieses Prozess-Modells kann das zu entwickelnde System frühzeitig in der sogenannte Model-in-the-Loop (MiL) Simulation verifiziert und nach der Fertigstellung in der Hardware-in-the-Loop (HiL) Simulation validiert werden, wobei es sich bei der Validierung i.d.R. um eine „Vor-Validierung“ handelt, da die Simulation den realen Prozess zumeist nicht hundertprozentig abbilden kann.

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dass Verifikation und Validierung unabhängig von der Verfügbarkeit des realen Prozesses durchgeführt werden können. Dadurch werden Designfehler frühzeitig erkannt, selbst wenn der reale Prozess (noch) nicht verfügbar ist.

Entsprechend diesen theoretischen Überlegungen wurde parallel zur Entwicklung des wissensbasierten Reglers ein Modell der zu regelnden Brennstoffzelle erstellt, das insbesondere die Stackinstabilität entsprechend dem realen System wiedergibt. Dieses Modell wurde nach Fertigstellung zunächst in eine DLL kompiliert, mit welcher der Fuzzy-Regler getestet und optimiert wurde (MiL). Anschließend wurde der Fuzzy-Regler in die bereits bestehende Prüfstandsoftware integriert und das Stackmodell auf einen Compact FieldPoint (cFP) aufgespielt, um ein echtzeitfähiges Modell der realen Brennstoffzelle zu erhalten. Die um den Fuzzy-Regler erweiterte LabView Prüfstandsoftware wurde auf die Prüfstandhardware aufgespielt, mit dem cFP verbunden und dann mit der simulierten Brennstoffzelle erfolgreich validiert (HiL). Die Zeit für die Entwicklung und Inbetriebnahme des Reglers konnte damit gegenüber einer konventionellen Entwicklung drastisch verkürzt werden.

Brennstoffzellen-Modell

Bei der Brennstoffzelle handelt es sich um eine PEM-FC, bestehend aus einem 60-Zellen Stack, der anoden- wie kathodenseitig mit niedrigen Überdrücken (< 50 mbar) gefahren wird. Der Stack

weist eine hohe Dynamik sowie Nichtlinearitäten auf, was den stabilen Betrieb zusätzlich erschwert.

Zunächst wurden einige Versuche mit dem Stack gefahren, um das prinzipielle Systemverhalten kennen zu lernen. Die Systemidentifikation erwies sich als schwierig, womit eine Modellierung des Stacks in Form von Autoregressionsmodellen, State-Space Modellen oder Neuronalen Netzen ausschied. Statt dessen wurde ein phänomenologisches Modell erstellt, wobei bereits hier wesentliche Teile des Simulationsmodells mit Methoden der unscharfen Wissensrepräsentation implementiert wurden.

Bild 1 zeigt eine Testsequenz, die am isolierten Stackmodell (d.h. ohne Fuzzy-Regler) durchgeführt wurde. Aufgezeichnet sind ganz oben die simulierte Anodengastemperatur, darunter eine Auswahl von 10 Zellspannungen und ganz unten der Sollwert für den Stackstrom.

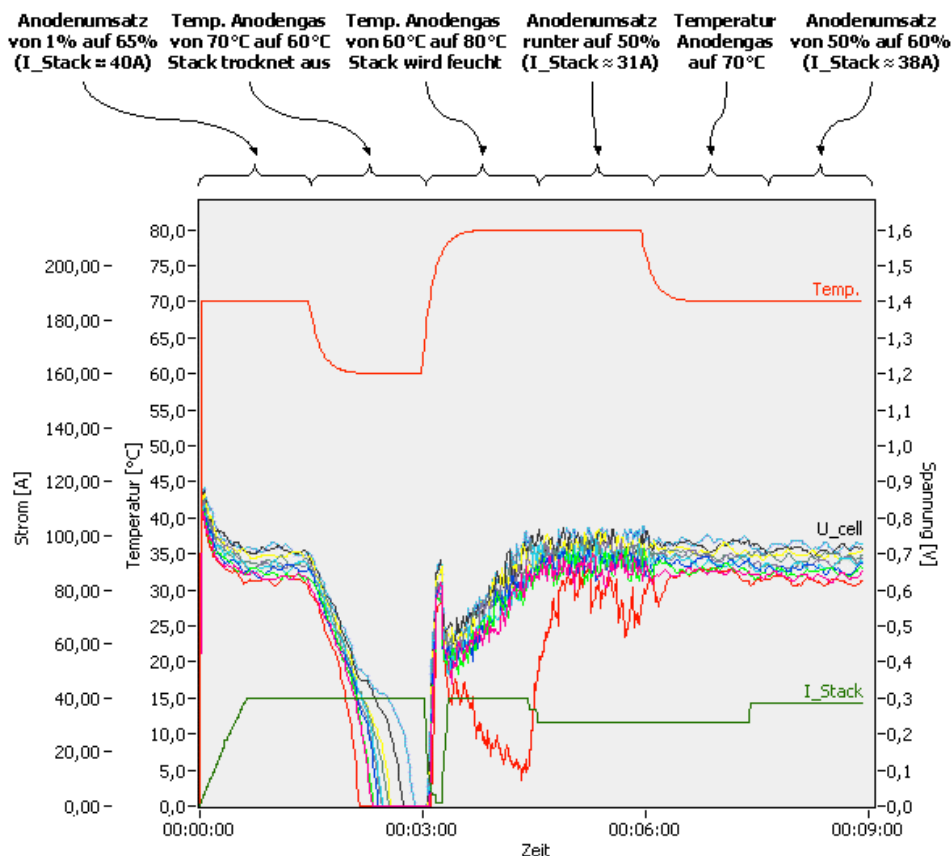


Bild 1: Testsequenz am Stackmodell (ohne Fuzzy Regler)

Dabei wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Zunächst wurde in den ersten 1 ½ Minuten der Stackstrom manuell von 1 A auf ca. 40 A (entspricht 65% Anodenumsatz) erhöht. Gemäß der Strom-Spannungskennlinie fallen die Stackspannungen ab und pendeln sich auf Werte um 0,7 V ein.
- Im zweiten Schritt (00:01:30 – 00:03:00) wurde die Temperatur des Anodengases von 70°C auf 60°C herabgesetzt, was bei der Betriebsweise der vorliegenden Brennstoffzelle zum Austrocknen des Stacks führt. Entsprechend fallen die Zellspannungen nach und nach auf 0V ab.

- Im dritten Schritt wurde dem Stack zunächst kurzzeitig kein Strom entzogen, wodurch sich die Zellen erholen. Gleichzeitig wird die Temperatur des Anodengases auf 80°C erhöht und ab einer Zellspannung von ca. 0,7 V wieder ein Strom von ca. 40 A gezogen. Mit Anstieg der Temperatur wird mehr Feuchtigkeit in den Stack eingebracht, was zu einem insgesamt instabilen Zustand führt (erkennbar an den stark schwankenden Zellspannungen). Auf Grund der hohen Feuchtigkeit bildet sich weiterhin Kondensat in einer Zelle. Dies ist an den simulierten, mitunter stark abfallenden Einzelzellspannungen zu erkennen.
- Im vierten Schritt wird der Strom auf ca. 31 A reduziert. Dadurch verringert sich der Anodenumsatz auf 50%, d.h. es wird mehr Anodenrestgas aus den Stackzellen ausgeblasen, was zu einem mäßigen Austreiben von Kondensat führt. Entsprechend erholt sich die einzelne Zelle, in der sich Kondensat gebildet hatte (Zellspannung steigt an). Jedoch kann die hohe Feuchtigkeit nicht generell beseitigt werden, so dass es immer wieder erneut zu Ansätzen von Kondensatbildung kommt, einhergehend mit weiterhin stark schwankenden Zellspannungen.
- Im fünften Schritt wurde die Temperatur des Anodengases wieder auf 70°C herabgesetzt, wodurch die hohe Feuchtigkeit langsam abnimmt und sich die Zellspannungen entsprechend erholen.
- Im letzten Schritt wurde schließlich der Stackstrom auf ca. 38A (entspricht 60% Anodenumsatz) erhöht. Da der Feuchtehaushalt ausgeglichen und der Anodenumsatz niedrig ist, sind die Zellspannungen weiterhin stabil.

Fuzzy-Regler

Für den Fuzzy-Regler wurde das Expertenwissen mit Hilfe der Skalaren Fuzzy Control (SFC) [5] repräsentiert und implementiert. Nach der Detaillierung des größtenteils unscharf formulierten Wissens wurden die einzelnen SFC-Regeln aufgestellt und nach erfolgter Implementierung am Stackmodell verifiziert (MiL).

Im Folgenden wird beispielhaft die Implementierung einer unscharfen Regel diskutiert. Aus Platzgründen und um das Beispiel möglichst nachvollziehbar zu halten kann dabei nicht auf sämtliche Details eingegangen werden.

Beispiel

Im Falle eines zu feuchten Stacks müssen als Gegenmaßnahmen die Stacktemperatur erhöht und der Stackstrom reduziert werden. Zusätzlich sind anodenseitig die Gastemperatur zu verringern und kathodenseitig der Luftvolumenstrom zu erhöhen.

Für die Reduktion des Stackstroms lautet die linguistische Formulierung der Regel:

Stromregel für feuchten Stack

Je mehr die kleinste Zellspannung größer als 0,25V ist UND
 je mehr die kleinste Zellspannung größer als 0,40V ist ODER
 je mehr die Stacktemperatur größer als 72°C ist
 desto mehr kann der Stackstrom auf den Sollwert gesetzt werden.

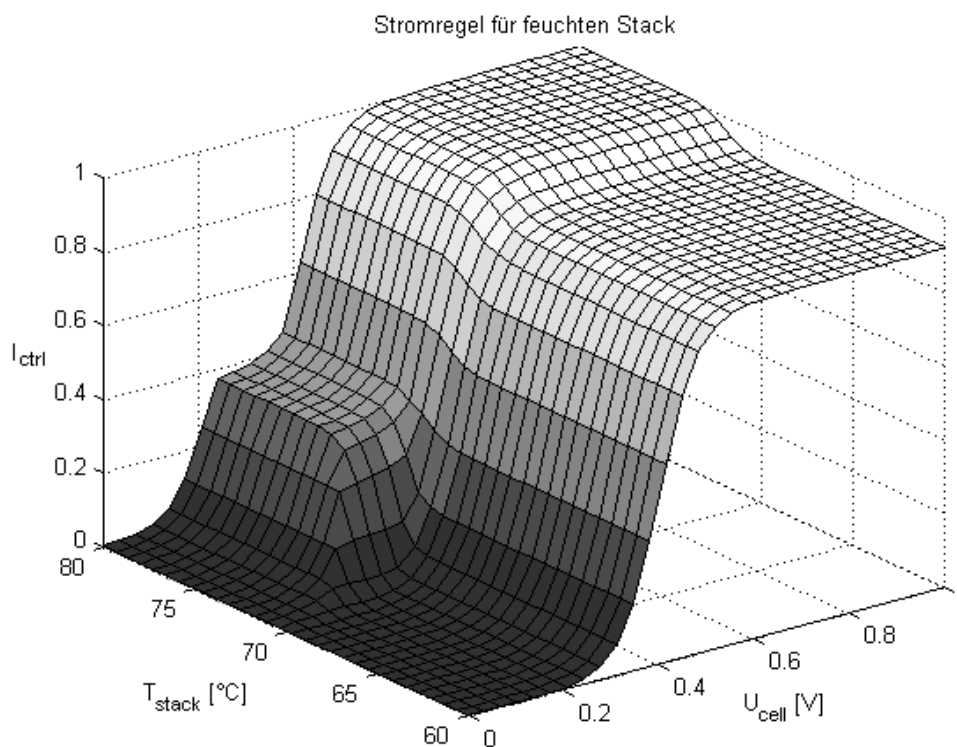
Die Regel besagt, dass zunächst der Strom um so mehr zurückzunehmen ist, je mehr die kleinste Zellspannung unter 0,25V sinkt, und dies unabhängig von der Stacktemperatur. In den übrigen Fällen (kleinste Zellspannung größer als 0,25V) kann der Stackstrom um so größer werden, je mehr die kleinste Zellspannung oberhalb von 0,4V liegt oder je mehr die Stacktemperatur größer als 72°C ist (in diesem Fall muss der Stackstrom nicht so stark zurückgenommen werden, da die erhöhte Stacktemperatur zur Reduktion der Feuchte und damit zur Beruhigung der Zellspannungen führen wird). Allerdings ist der Wert der kleinsten Zellspannung von größerer Bedeutung als die Stacktemperatur, d.h. die erste Teilregel wird stärker gewichtet. Dies führt zu der folgenden Implementierung:

SFC-Implementierung

$$I_{ctrl} = \left(\min(U_{cell})_{0.1}^F > 0.25V \right)_{g=1} \overset{F}{AND}_{1.0} \left(\left(\min(U_{cell})_{0.4}^F > 0.4V \right)_{g=1} \overset{F}{OR}_{0.7} \left(T_{stack}^F > 72^{\circ}C \right)_{g=0.4} \right)_{g=1.0}$$

Die Zahl unter den Fuzzy-Operatoren gibt den Grad der Unschärfe an (0=sehr unscharf ... 1=bool'sches Verhalten) und die Kennzeichnung „g = ...“ die Gewichtung der Teilbedingungen. Das Ergebnis der SFC-Regel ist ein unscharfer Wahrheitswert (0= vollständig nicht erfüllt ... 1=vollständig erfüllt) und kann somit direkt mit dem gewünschten Stackstrom multipliziert werden, um den Strom-Sollwert zu erhalten.

Bild 2 zeigt den funktionalen Verlauf von $I_{ctrl} = I_{ctrl}(\min(U_{cell}), T_{Stack})$.



In Bild 3 wird eine Testsequenz aus dem MiL (Model-in-the-Loop) gezeigt, bei dem die implementierte SFC-Regel am Stackmodell geprüft wurde. Zusätzlich zu den Größen Anodengasttemperatur, Zellspannung und Stackstrom ist das Ergebnis I_{ctrl} der betrachteten SFC-Regel aufgezeichnet.

Bei dem Test wurde die gleiche Testsequenz wie in Bild 1 gefahren. In den Schritten 2, 3 und 4 ist deutlich erkennbar, wie die SFC-Regel den Stackstrom zurücknimmt, und zwar um so mehr, je instabiler der Stack ist. In den Schritten 1, 5 und 6 greift die SFC-Regel hingegen gar nicht ein, d.h. der Strom-Sollwert ist identisch zum gewünschten Stackstrom.

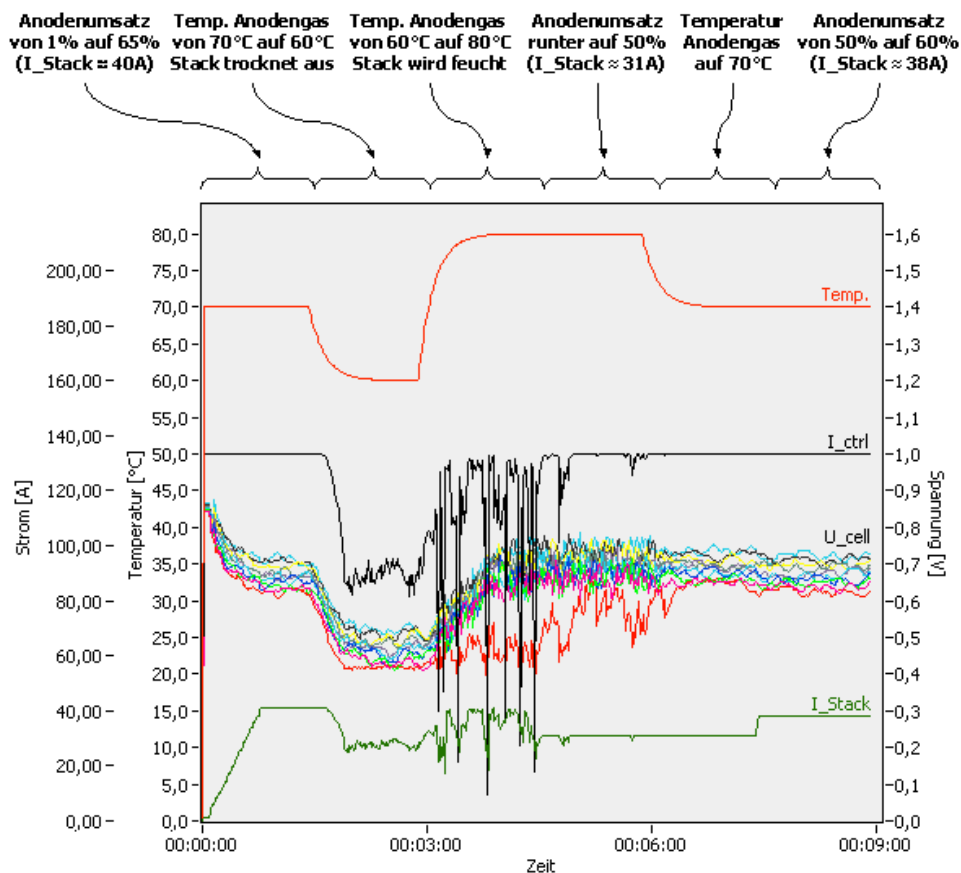


Bild 3: Testsequenz am Stackmodell mit Stromregel für zu feuchten Stack

Zusammenfassung

Durch Integration des Rapid Control Prototyping in die bestehenden Vorgehensmodelle war es möglich, den Fuzzy-Regler während der Entwicklung intensiv zu testen, obwohl die reale Brennstoffzelle nicht verfügbar war. Insbesondere konnten sämtliche Design-Probleme bereits in der Entwicklungsphase identifiziert und gelöst werden, so dass die Validierung an der realen Brennstoffzelle in kürzester Zeit und ohne Probleme durchgeführt werden konnte.

Der Einsatz von wissensbasierten Methoden und insbesondere Fuzzy-Control hat sich dabei als äußerst zweckmäßig herausgestellt, da die linguistische Beschreibung der „Problemlösung“ schnell und effektiv umgesetzt und implementiert werden konnte.

Literatur

- [1] D. Abel, "Rapid Control Prototyping", Skriptum des IRT, Institut für Regelungstechnik, RWTH-Aachen, Deutschland, 1. Auflage 2003
- [2] Alphons Hintermann, Otto Haas, "Brennstoffzellen", BFE (Bundesamt für Energie), Überblicksbericht der Programmleiter 2002, Schweiz, 2002

- [3] T. Mennola, M. Noponen, T. Kallio, M. Mikkola, T. Hottinen, "Water balance in a free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cell", *Journal of Applied Electrochemistry* 34, number 1, 2003, pages 21-36
- [4] Mikko Mikkola, "Experimental Studies on Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stacks", M.Sc Thesis 10.12.2001 Espoo, Department of Engineering, Physics and Mathematics, Helsinki, University of Technology, FIN-02015 HUT Finland
- [5] M. Mlynski, "Eine neue Methode des unscharfen Schließens für Expertensysteme", Dissertation an der RWTH Aachen, 2003, <http://www.bth.rwth-aachen.de>
- [6] M. Mlynski, M. Schreiber, "Optimierung des Entwicklungsprozesses durch den Einsatz von Simulationswerkzeugen", 3. Internationaler Brennstoffzellen-Technologietag, 10.11.2004, Aachen, Germany
- [7] Jay T. Pukrushpan, Huei Peng, Anna G. Stefanopoulou, "Control-oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, March 2004, Volume 126, Issue 1, pp. 14-25
- [8] Jingxin Zhang, "Investigation of CO Tolerance in Proton Exchange Membrane Fuel Cells", Doctor of Philosophy Thesis, Department of Chemical Engineering, Worcester Polytechnic Institute, MA, USA, June 2004