

AlternativeVehicles

Modelica Bibliothek zur Simulation von alternativen Fahrzeugkonzepten

Dr.-Ing. **M. Baur**¹, Dipl.-Ing. **J. Ungethüm**¹, Dr.-Ing. **P. Treffinger**¹
Dipl.-Ing. **C. Schweiger**², Prof. Dr.-Ing. **M. Otter**²

¹DLR Stuttgart, Institut für Fahrzeugkonzepte,
Pfaffenwaldring 38-40, D-70569 Stuttgart

²DLR Oberpfaffenhofen, Institut für Robotik und Mechatronik,
Münchner Straße 20, D-82234 Weßling

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird die an den DLR-Instituten *Fahrzeugkonzepte* und *Robotik und Mechatronik* entwickelte Softwarebibliothek AlternativeVehicles zur Modellierung und Simulation von alternativen Fahrzeugkonzepten vorgestellt. Die Bibliothek wurde in der Modellierungssprache Modelica zur modellbasierten Konzeption und Bewertung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben entwickelt. Neben den für alternative Fahrzeugantriebe spezifischen Komponenten sind exemplarisch mehrere typische Antriebskonfigurationen mitsamt den hierfür notwendigen Betriebsstrategien implementiert. Am Beispiel eines Brennstoffzellensystems wird die Möglichkeit der automatischen Invertierung dynamischer Systeme zur Regelung von komplexen Systemen dargestellt.

Abstract

This paper introduces the Modelica library AlternativeVehicles which has been developed by the DLR institutes of *Vehicles Concepts* and *Robotics and Mechatronics* to model and simulate alternative vehicle concepts. The objectives of the library are the model based conception and validation of vehicles with alternative propulsion. Beside the specific components of these vehicles several examples of typical configurations are included in the library. The possibility of automatic model inversion to control complex dynamic system is demonstrated by means of a fuel cell system.

1. Einleitung

So genannte alternative Antriebe verfügen in der Regel über eine komplexere Architektur als rein verbrennungsmotorische Antriebe. Beispielsweise müssen bei hybriden Antrieben wie

Parallelhybrid oder leistungsverzweigtem Hybrid zusätzliche Systemkomponenten wie Elektromotor, Traktionsbatterie sowie leistungselektronische Komponenten berücksichtigt werden. Die Steuerung des Systems muss daher zusätzliche Betriebszustände umfassen, die beispielsweise aus den unterschiedlichen Leistungs- und Betriebsbereichen der Antriebsaggregate und dem Ladezustand der Batterie abgeleitet werden. Bei Brennstoffzellensystemen handelt es sich selbst um komplexe dynamische Systeme, deren für Fahrzeugantriebe relevante Dynamik im Wesentlichen von der Medienversorgung geprägt wird [1, 2]. Um einen effektiven Betrieb der Brennstoffzelle mit schnellen Lastwechseln und die Nutzung von Rekuperation zu ermöglichen, werden neben reinen Brennstoffzellenantrieben oft hybride Konfigurationen mit zusätzlichen Energiespeichern wie Batterie oder Doppelschichtkondensatoren realisiert.

Für die Modellierung und Simulation solcher mechatronischer Systeme, die sich in Teilsysteme unterschiedlicher Domänen wie elektrische, mechanische oder thermodynamische Systeme unterteilen, welche selbst wieder regelungstechnische Teilkomponenten besitzen, hat sich in den letzten Jahren die objektorientierte Modellierungssprache Modelica als ein leistungsfähiges Instrumentarium erwiesen.

2. Modellieren mit Modelica-Komponentenbibliotheken

Modelica ist eine objektorientiert aufgebaute Modellierungssprache, die sich für die komponentenbasierte und hierarchisch strukturierte Modellierung dynamischer Systeme aus unterschiedlichen physikalischen Disziplinen eignet. Die Komponentenschnittstellen sind hierbei weitestgehend über den Energiefluss definiert, der das physikalische Verhalten der Komponenten bestimmt. Diese Entsprechung zu den Wirkungsprinzipien in realen dynamischen Systemen ist die Grundlage dafür, dass die Modelle nicht nur in ihrer Funktionalität, sondern auch in ihrem Aufbau den abgebildeten Systemen entsprechen, woraus eine größere Transparenz und letztlich eine verbesserte Handhabbarkeit komplexer Modelle folgt.

Um eine solche vom Betriebszustand unabhängige Verknüpfung von Teilsystemen zu gewährleisten, ist eine andere Verarbeitung der Daten notwendig als bei signalorientierten Modellstrukturen, deren Funktionalität und Einsatzbereich aufgrund ihrer, den Signalen fest zugeordneten Wirkungsrichtung, festgelegt ist. Anstatt der sequentiellen, entlang des Signalflusses gerichteten Abarbeitung der Signale, müssen differentialalgebraische Gleichungssysteme gelöst werden, da die Funktionalität der einzelnen Komponenten in Sätzen von simultan zu lösenden Gleichungen beschrieben ist. Die Simulation eines Modells ist daher grundsätzlich nur mit der vollständigen Beschreibung aller Systemkomponenten möglich [3].

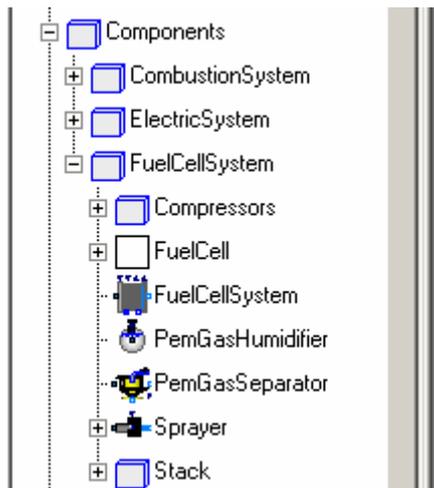
Die Leistungsfähigkeit der objektorientierten Modellierung mit Modelica kommt insbesondere bei der Entwicklung von komplexen Modellen durch die Kombination verfügbarer Komponenten zum Tragen, da sich die prinzipielle Funktionalität des Gesamtmodells bereits mit der Verknüpfung der Teilsysteme bzw. Komponenten über deren Schnittstellen ergibt. Mit Hilfe eines graphischen Modelleditors, wie ihn die kommerzielle Softwareumgebung Dymola bereitstellt, können die Komponenten aus den Bibliotheken entnommen, miteinander verschaltet und parametrisiert werden. Für den geregelten Betrieb eines solchen Systems sind zusätzlich Steuergrößen notwendig, die über Signalschnittstellen die Aktuatoren des Systems steuern. Solche Signale können über einen durch den Benutzer anpassbaren Signalbus übergeben werden, was die Übersichtlichkeit bei komplexen Modellen erhöht.

Die AlternativeVehicles-Bibliothek baut im Wesentlichen auf der kommerziellen PowerTrain-Bibliothek auf, die am DLR-Institut für Robotik und Mechatronik für die Modellierung von Antriebssträngen konzipiert wurde [4]. Der Quellcode ist auch bei den kommerziellen Modelica-Bibliotheken meistens frei zugänglich, wodurch die Ableitung neuer Modelle zur Weiterentwicklung der Bibliotheken ermöglicht wird. Die objektbasierte Struktur von Modelica-Modellen trägt zum Aufbau von hierarchischen Bibliotheken bei, in denen die typischen Komponenten spezieller Anwendungsgebiete abgelegt sind und laufend erweitert werden können.

Obwohl der modellbasierte Entwurf von Regelungen typischerweise auf der signalorientierten Zustandsraumdarstellung oder Übertragungsfunktionen beruht, lassen sich effiziente Verfahren zur Regelung komplexer Systeme auch aus dem in Modelica verwendeten gleichungsbasierten Modellierungsansatz ableiten, da es mit den realisierten Lösungsverfahren möglich ist, nahezu beliebig komplexe Systeme zu invertieren. In bestimmten Fällen gelingt es somit, komplexe nichtlineare Systeme mit konventionellen linearen Reglern zu regeln bzw. Beobachter bereitzustellen [5, 6].

3. Alternative Antriebskonzepte in AlternativeVehicles

Der Aufbau und Inhalt der in der AlternativeVehicles-Bibliothek vorhandenen Komponenten und Beispiele orientiert sich sowohl an den für den aktuellen Markt relevanten alternativen Fahrzeugkonzepten wie den Hybridantrieben als auch an den für zukünftige Entwicklungen aussichtsreichen Konfigurationen von Brennstoffzellenfahrzeugen. Im Vergleich zu konventionellen Antriebskonzepten sind bei diesen Konzepten elektrische Maschinen, elektrische Speicher wie Batterien und Superkondensatoren, Brennstoffzellensysteme und leistungselektronische Komponenten wie DCDC-Wandler als die wesentlichen zusätzlichen Komponenten zu nennen.



Ein Brennstoffzellensystem selbst setzt sich je nach Konfiguration aus dem Brennstoffzellenstapel, der Medienversorgung sowie der Steuerung des Systems zusammen. Diese Komponentenmodelle sind in der Alternative-Vehicles-Bibliothek realisiert, wobei sowohl auf vorhandene Komponenten und Teilsysteme der verfügbaren Bibliotheken zurückgegriffen werden konnte als auch Komponenten neu entwickelt wurden. In Verbindung mit der PowerTrain-Bibliothek lässt sich hieraus eine Vielzahl von Antriebssträngen konfigurieren. Als Beispiele sind in der Bibliothek längsdynamische Modelle eines Brennstoffzellen-Hybrid-Fahrzeugs, eines Elektrofahrzeugs,

Bild 1 Komponentenmodelle

eines Parallelhybrids, eines leistungsverzweigten Hybrids und eines seriellen Hybrids zur Verbrauchsrechnung verfügbar.

Bild 2 zeigt die Modelle eines leistungsverzweigten Hybrids und eines Brennstoffzellen-Hybrid-Fahrzeuges. Die Bibliothek wird sukzessive um weitere Fahrzeug-Konfigurationen ergänzt.

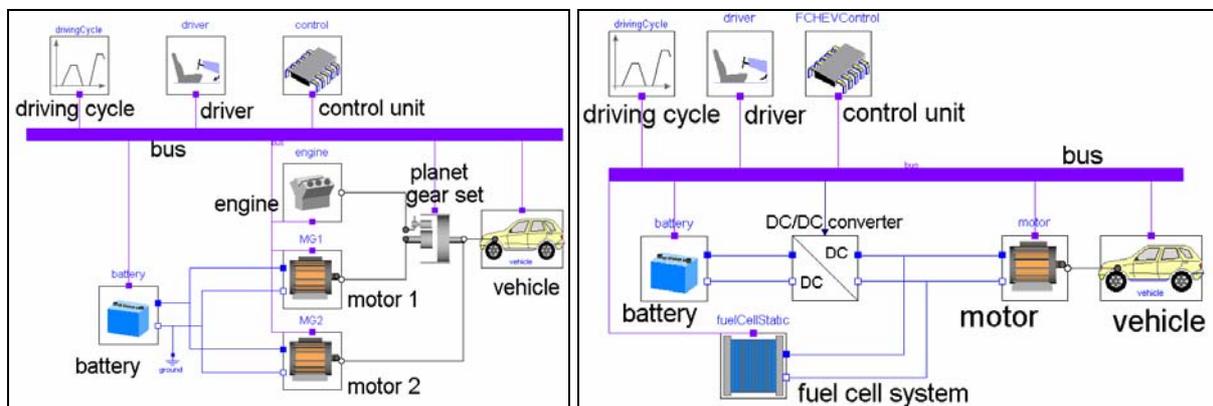


Bild 2 Modelle eines leistungsverzweigten Hybrids (links) und eines Brennstoffzellenhybrids (rechts)

Wegen der weit gestreuten Einsatzmöglichkeiten der Bibliothek ist es sinnvoll, unterschiedliche, dem Schwerpunkt der jeweiligen Fragestellung angepasste Modelle bereitzustellen. Es ist daher geplant, Komponentenmodelle in unterschiedlicher Detailliertheit abzubilden, wobei variable Schnittstellen so definiert werden können, dass Komponenten mit unterschiedlicher Modellierungstiefe in einem Gesamtmodell kombiniert werden können. Als Beispiel für die Abbildung eines Systems in unterschiedlicher Detaillierung wird die Modellierung eines Brennstoffzellensystems beschrieben.

4. Beispiel Brennstoffzellensystem

Neben dem Brennstoffzellenstapel, in dem die elektrochemische Reaktion zur Umsetzung der freien chemischen Energie des Brennstoffes in elektrische Energie stattfindet, umfasst beispielsweise ein PEFC-Brennstoffzellensystem im Wesentlichen drei Teilsysteme. Im Folgenden wird angenommen, dass als Brennstoff Wasserstoff eingesetzt wird, was derzeit für die Mehrheit der Anwendungen den Regelfall darstellt. Über die Brennstoffversorgung wird dem Brennstoffzellenstapel die der geforderten elektrischen Leistung adäquate Menge an Wasserstoff bereitgestellt und Druck, Temperatur und Feuchte entsprechend den Betriebsbedingungen des Brennstoffzellenstapels eingestellt [2]. Der für die Reaktion benötigte Sauerstoff wird über die Luftversorgung an die Kathode geliefert. Der erforderliche Druck an der Kathode wird von einem Kompressor erzeugt und über ein Druckhalteventil reguliert. Da bei der elektrochemischen Reaktion auch Wärme freigesetzt wird, muss das System gekühlt werden um eine Beschädigung der Zellen zu vermeiden. Eine ausführlichere Beschreibung von Brennstoffzellen speziell für den Einsatz in Antrieben wird in [1, 2] gegeben.

Die nutzbare elektrische Leistung des Systems ergibt sich aus der vom Stapel gelieferten Leistung abzüglich der für den Betrieb der Versorgungssysteme benötigten Leistung. Die Leistung des Stapels wird durch den elektrischen Strom und der davon abhängigen Klemmenspannung bestimmt. Die Gesamtspannung des Stapels resultiert aus der Anzahl der hintereinander geschalteten Einzelzellen. Der Strom ist von der umsetzbaren Menge Wasserstoff abhängig und damit proportional zur effektiven Reaktions- bzw. Zellenfläche. Damit ist der Betriebsbereich der Zelle bezüglich Strom und Spannung und elektrischer Leistung vorgegeben.

Zur Modellierung des Systems wird angenommen, dass die Zelle innerhalb dieses Bereiches die geforderte Leistung auch generiert, was bedeutet, dass die dem elektrischen Strom entsprechende Menge Wasserstoff auf der Anodenseite des Stapels stets zur Verfügung steht. Zur Umsetzung des Wasserstoffs muss auf der Kathodenseite die entsprechende Menge an Sauerstoff bereitgestellt werden. Der Betriebsdruck des Brennstoffzellenstapels beeinflusst hierbei sowohl den Wirkungsgrad und die Dynamik als auch maßgeblich die Wasserbilanz des Systems [2]. Um einen höheren Gesamtwirkungsgrad zu erzielen, wird in machen Anwendung der Druck in Abhängigkeit des Betriebszustandes variiert [7].

Für Anwendungen, bei denen weder die Betrachtung des dynamischen Verhaltens des Brennstoffzellensystems wesentlich ist noch die Medienversorgung oder thermische Untersuchungen im Vordergrund stehen, ist es ausreichend, das Brennstoffzellensystem mit Hilfe

eines $u-i$ -Kennfeldes und einer Wirkungsgradkennlinie mit einem einfachsten Modell als statisches System zu beschreiben.

Die Komplexität des Modells wächst jedoch erheblich an, wenn das thermodynamische Verhalten der Medienversorgung, das dynamische Verhalten des Kompressors, die Temperaturregelung des Systems, die Wasserbilanz sowie die elektrochemischen Reaktionen und Energiebilanzen abgebildet werden sollen (Bild 3). Das dynamische Verhalten des Brennstoffzellensystems ist bestimmt durch die Dynamik der Medienversorgung, die mit Hilfe der Modelica-Standardbibliotheken abgebildet wird.

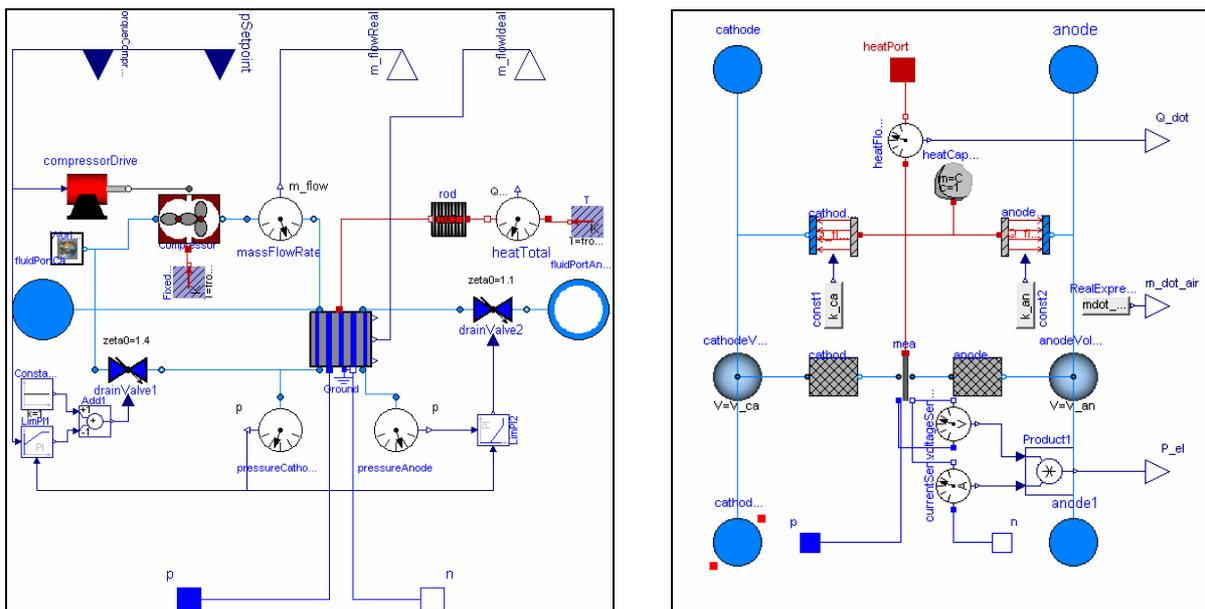


Bild 3 Links: Objektdiagramm des Brennstoffzellensystems (Mitte zeigt den Brennstoffzellenstapel). **Rechts:** Objektdiagramm des Brennstoffzellenstapels

Ein solches Modell ist in der AlternativeVehicles-Bibliothek verfügbar und kann zur Entwicklung, Optimierung und Erprobung von Regel- und Betriebsstrategien der Teilsysteme und des Gesamtsystems eingesetzt werden.

5. Regelung des Brennstoffzellensystems

Für das oben skizzierte Modell eines Brennstoffzellensystems soll gezeigt werden, wie mit Hilfe eines von Modelica automatisch generierten inversen Modells eine dynamische Vorsteuerung für ein nichtlineares dynamisches System realisiert werden kann. Eine ausführliche Beschreibung dieses Prinzips findet man in [5].

Der Betrieb des Brennstoffzellensystems erfordert die Regelung der Medienversorgung, d. h. der Medienflüsse und der Drücke sowie der Temperatur des Stapels. Aufgrund der thermischen Masse des Brennstoffzellenstapels weist die Systemtemperatur eine sehr viel trägere

Dynamik als die Medienversorgung auf. Daher können Temperatur und Medienversorgung separat betrachtet werden. Für die folgende Betrachtung sei weiterhin angenommen, dass der Wasserstoff über einen Druckspeicher bereitgestellt wird und der Anodendruck lediglich über ein Einstellventil geregelt wird. Der Anodendruck wird hierbei dem Kathodendruck des Systems nachgeführt.

Die für die Reaktion benötigte Sauerstoffmenge wird durch den umgesetzten Wasserstoff bestimmt, der unmittelbar vom elektrischen Strom abhängt. Wird das System über einen Kompressor mit Umgebungsluft versorgt, muss aus dem Sollwert für den Sauerstoff auf den Luftmassenstrom geschlossen werden. Der Massenanteil von Sauerstoff in Luft beträgt unter normalen Bedingungen ca. 23%.

Da nicht der gesamte von der Luftversorgung zugeführte Sauerstoff unmittelbar umgesetzt werden kann, muss zur Sicherstellung des benötigten Bedarfs entsprechend mehr Luft bereitgestellt werden. Das benötigte Luftverhältnis

$$\lambda_L = \frac{\dot{m}_{L,K}}{\dot{m}_L}$$

ist von der Bauart des Brennstoffzellenstapels sowie den Betriebsbedingungen des Stapels abhängig und wird hier mit $\lambda_L = 1.7$ angenommen. Damit kann mit der festen Abhängigkeit zwischen elektrischem Strom und Wasserstoff der vom Kompressor zu liefernde Luftmassenstrom $\tilde{m}_{L,K}$ durch

$$\tilde{m}_{L,K} = \lambda_L \frac{M_{O_2} n_{cell} I}{4 x_{O_2} F} \left(1 + \varphi \frac{M_W}{M_L} \frac{p_{sat}(T)}{p - p_{sat}(T)} \right)$$

mit der molaren Masse von Sauerstoff M_{O_2} , trockener Luft M_L und Wasser M_W , dem Massenanteil von Sauerstoff in Luft x_{O_2} , der Faraday-Konstante F und dem temperaturabhängigen Sättigungsdampfdruck p_{sat} berechnet werden [1]. Wird die Luft befeuchtet, kann $\varphi = 1$ gesetzt werden. Die zu regelnde Größe ist daher der über den Kompressor zu liefernde Luftmassenstrom. Der Massenfluss

$$\dot{m}_{iK} = n \rho \lambda_V V_H$$

eines idealen Rotationskolbenverdichters ist von der Drehzahl n und dem Hubraum V_H , der druck- und temperaturabhängigen Dichte ρ sowie dem Liefergrad

$$\lambda_V = 1 + \varepsilon - \varepsilon \Phi + \frac{\varepsilon}{\kappa} (\Phi - \Pi)$$

mit dem Volumenverhältnis Φ , dem Druckverhältnis $\Pi = p/p_0$, dem Isentropenexponenten κ und dem relativen Schadraum ε abhängig [8]. Zur Modellierung eines realen Kompressors müssen außerdem noch thermische Wechselwirkungen, Reibungsverluste, Spaltverluste,

Um die Kausalität des inversen Modells zu gewährleisten, muss ein entsprechender Filter, z. B. ein Verzögerungsglied mit genügend hoher Ordnung als Referenzmodell für einen realisierbaren Sollgrößenverlauf eingefügt werden. Daraus ergibt sich die in Bild 5 links dargestellte Regelkreisstruktur, die sich im entsprechenden Objektdiagramm unter Dymola gemäß Bild 5 rechts wieder findet.

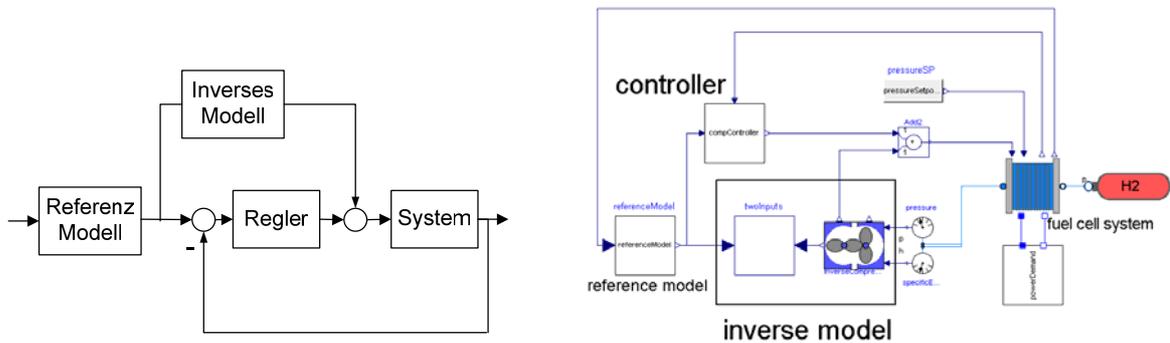


Bild 5 Objektdiagramm der Massenflussregelung mit dynamischer Vorsteuerung

In Bild 6 sind die Ergebnisse eines gesteuerten Systems, d. h. ohne Kompensationsregler und eines geregelten Systems mit Vorsteuerung dargestellt.

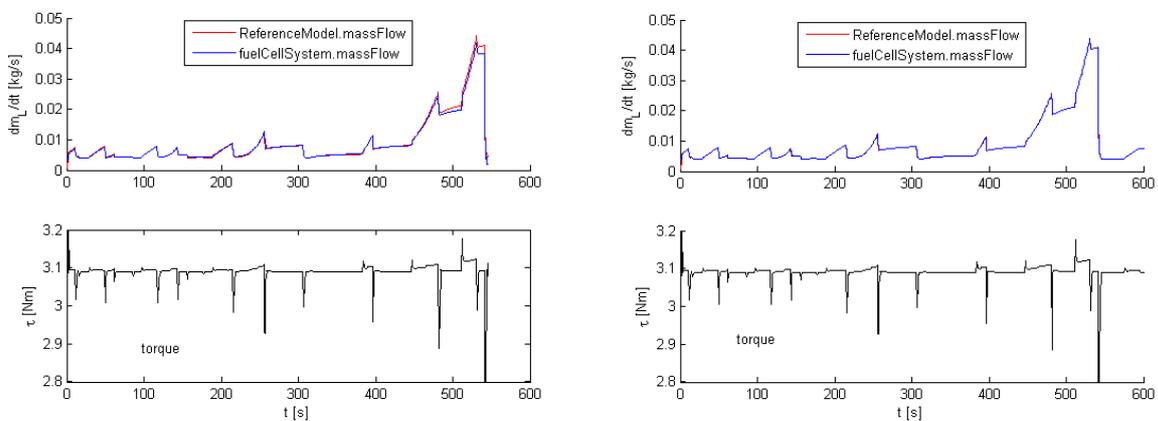


Bild 6 Oben: Massenstromvorgabe und tatsächlicher Verlauf des gesteuerten (links) bzw. geregelten Systems (rechts). **Unten:** Zugehöriger Stellgrößenverlauf (Drehmoment).

Dabei wurde das Brennstoffzellensystem im Antrieb eines Brennstoffzellen-Hybridfahrzeugs simuliert. Die Verläufe repräsentieren eine Belastung entsprechend des NEFZ. Der dargestellte Zeitabschnitt entspricht etwa den letzten 600 s des NEFZ. Die Simulation des gesteuerten Systems wird nach 544 Sekunden abgebrochen, da aufgrund der Abweichung vom Sollwert nicht mehr genug Sauerstoff bereitgestellt werden konnte. Ohne Rückführung konnte diese Abweichung nicht ausgeglichen werden. Dennoch zeigt Bild 6, dass der ge-

wünschte Stellgrößenverlauf für die gezeigte Anwendung bereits durch Invertierung des Kompressormodells weitestgehend angenähert werden kann. Allgemein ist diese Vorsteuerung jedoch nicht ausreichend, da ohne Rückführung von Geschwindigkeit bzw. Massenstrom oder die Korrektur über einen Beobachter der Fehler ständig anwachsen würde.

6. Zusammenfassung

Die AlternativeVehicles-Bibliothek stellt Komponenten insbesondere zur Modellierung von alternativen Antrieben zur Verfügung, wobei einzelne Komponenten in unterschiedlicher Modellierungstiefe dargestellt sind. In Zusammenhang mit der PowerTrain-Bibliothek lassen sich damit Gesamtmodelle von Fahrzeugen entwickeln und simulieren. Am Beispiel eines Brennstoffzellensystems wird gezeigt, wie mit Hilfe einer dynamischen Vorsteuerung durch die automatische Systeminvertierung mit Modelica ein nichtlineares dynamisches System mit einfachen Reglern geregelt werden kann.

Literatur

- [1] Pukrushpan, J. T., Stefanopoulou, A. G. und H. Peng: Control of Fuel Cell Power Systems. London, Springer Verlag 2005.
- [2] Treffinger, P., Ungethüm, J., Thalau, O. und M. Baur: Energiemanagement von Brennstoffzellenfahrzeugen, 3. Braunschweiger Symposium Hybridfahrzeuge und Energiemanagement, Braunschweig, 14./15.02.2006
- [3] Otter, M.: Objektorientierte Modellierung physikalischer Systeme, Teil IV. Automatisierungstechnik, 47 (1999) 4:0A13
- [4] Schweiger, C., Dempsey, M. und M. Otter: The PowerTrain Library: New Concepts and fields of applications. Proceedings of the 4th international Modelica Conference, Hamburg, Germany 2005 S. 457–466
- [5] Looye, G., Thümmel, M., Kurze, M. Otter, M. und J. Bals: Nonlinear inverse models for control. Proceedings of the 4th international Modelica Conference, Hamburg, Germany (2005) S. 267–279
- [6] Bünthe, T., Sahin, A. und N. Bajcinca: Inversion of Vehicle Steering Dynamics with Modelica/Dymola. Proceedings of the 4th international Modelica Conference, Hamburg, Germany (2005) S. 319–328, 2005
- [7] Ungethüm, J., Thalau, O.: Entwicklung einer Steuerung für ein Brennstoffzellenhybridfahrzeug — AUTOREG 2006 (VDI/VDE-GMA, ed.). Düsseldorf : VDI-Verlag (2006), im Druck
- [8] Fister, W.: Fluidmaschinen. Berlin. Springer-Verlag 1984