# **Schlussbericht**

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, Zentrum für BrennstoffzellenTechnik, Duisburg Nr. 2, Technische Universität Chemnitz, Professur für Systemtheorie

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

> vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

> > geförderten Vorhaben 286 ZBG

Wandlerbasierte Energiemanagement-Einheit für die

Betriebsführung von Brennstoffzelle-Speicher-Hybridstromversorgungen

(Bewilligungszeitraum: 01.04.2008 - 30.11.2010)

der AiF-Forschungsvereinigung

Umwelttechnik

Duisburg, 18.03.2011

Ort, Datum

Peter Beckhaus

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s) an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages Technische Universität Chemnitz

225 ZBG

Name der Forschungsstelle

AiF-Vorhaben-Nr.

01.04.2008 bis 30.11.2010 Bewilligungszeitraum

Gemeinsamer Abschlussbericht für den Zeitraum: 01.04.2008 bis 30.11.2010

(Forschungsstelle 2 von 2)

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren
 Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema

Wandlerbasierte Energiemanagement-Einheit für die Betriebsführung von Brennstoffzelle-Speicher-Hybridstromversorgungen

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen: Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

⊠ ist beigefügt

□ liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Chemnitz, den \_28. 02. 20.21

rlhice

Unterschrift des Projektleiter

# Wandlerbasierte Energiemanagement-Einheit für die Betriebsführung von Brennstoffzelle-Speicher-Hybridstromversorgungen

# -Abschlussbericht-

Dieser Abschlussbericht fasst die Ergebnisse des IGF-Vorhabens "Brennstoffzellen-Hybridsystem (286 ZBG)" zusammen (Laufzeit 01.04.2008 - 30.11.2010).

Dieses Projekt der Mitgliedsvereinigung "Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)" wurde gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigung "Otto von Guerricke" e.V. (AIF) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages.

Mitgliedsvereinigung der AiF: Bereich Industrielle Gemeinschaftsforschung am Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) www.iuta.de

Forschungsstellen:

ZBT GmbH, Zentrum für BrennstoffzellenTechnik Abteilung Brennstoffzellen- und Systemtechnik www.zbt-duisburg.de

Leitung:Prof. Dr. Angelika HeinzelProjektleiter:Dr. Peter BeckhausWiss. Mitarbeiter:Dipl.-Ing. Sönke Gößling, Dipl.-Ing. Sina Souzani

Technische Universität Chemnitz Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Professur für Systemtheorie und Professur Energie- und Hochspannungstechnik www.tu-chemnitz.de/etit/

Projektleiter:Prof. Dr. sc. techn. Steffen F. BocklischWiss. Mitarbeiter:Dr.-Ing. Thilo Bocklisch, Dipl.-Ing. Jürgen Trompke

Im März 2011

# Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Projekt wurde eine flexible wandlerbasierte Energiemanagement-Einheit für Brennstoffzellen-Hybridsysteme einer Leistungsklasse von 400-1200 W am Beispiel der Integration einer Superkondensator-Einheit als Direktspeicher realisiert. Wesentliche Teilaspekte der Entwicklungen waren dabei die Wandlereinheit, das Brennstoffzellensystem und die Systemverschaltung mit Unterstützung des optimierenden Energiemanagements.

Aufgrund der Notwendigkeit leistungselektronischer Wandler in Brennstoffzellen-Hybridsystemen und dem Fehlen flexibler und anpassbarer Lösungen auf dem Markt, wurde in diesem Projekt eine neue Hardwareplattform zur Steuerung der Leistungsflüsse und zur Spannungsanpassung mit folgenden Zielsetzungen entwickelt.

Als zweite wesentliche Systemkomponente wurde außerdem ein Brennstoffzellensystem entwickelt, das in mehrfacher Hinsicht optimiert und für die Schnittstellen des Hybridsystems angepasst wurde. Eine intelligente Definition der Schnittstellen macht das System in weiteren Bereichen einfach integrierbar.

Die Integration des Brennstoffzellensystems in der flexibeln Wandlerumgebung ermöglicht einen gezielten Betrieb des Brennstoffzellensystems unter definierbaren Rahmenbedingungen. Der gekoppelte Betrieb konnte erfolgreich getestet werden und die Rahmenbedingungen wurden optimiert. Das Ziel einer Schnellcharakterisierung der Brennstoffzelle im laufenden Betrieb konnte erreicht werden. Zusätzlich wurden Methoden zur Aktivierung der Brennstoffzelle in dem Falle eines unzureichenden Betriebszustandes erarbeitet.

Somit steht als Ergebnis eine hoch integrierte Systemlösung aus Wandler- und Energiemanagement-Hardware sowie Diagnose- und Energiemanagement-Software für Brennstoffzellen-Hybridsysteme zur Verfügung. Mit der Minimierung der Optimierungskriterien dynamische Beanspruchung der Brennstoffzelle und Wandlungsverluste ist eine Senkung der Investitions-, der Betriebs- und der Wartungskosten erreichbar. Zusätzlich führt die technische Integration der Wandler- und Steuerungskomponenten zu einer Kostenreduktion. Das integrierte Wandler-/Energiemanagementkonzept kann seinen Einsatz sowohl zur Versorgung von mobilen Systemen (z.B. elektrische Kleinfahrzeuge, Transportplattformen) als auch dezentralen portablen und stationären Anwendungen (tragbare Stromerzeuger, Unterbrechungsfreie Stromversorgung, etc.) finden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die methodischen Ansätze auch auf Brennstoffzellen-Hybridsysteme höherer Leistung (zum Beispiel im KFZ-Bereich) skaliert werden können.

#### Das Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

1	Motivation und Zielstellung	2
2	Stand der Forschung Brennstoffzellen-Hybridsysteme	4
	2.1 Brennstoffzellen-Hybridkonzepte	4
	2.2 Energiespeicher im Hybridsystem	5
	2.3 Leistungselektronische Topologien für DC/DC-Wandler für Brennstoffzellen-Hybridsysteme	5
_	2.4 Energiemanagement-Ansätze für Brennstoffzellen-Hybridsysteme	8
3	Systemauslegung und Schnittstellendefinition	9
4	DC/DC-Wandlersystem	
	4.1 Grundlegender Aufbau des DC/DC-Wandlers	
	4.2 Experimentelle Untersuchung des DC/DC-Wandlers	
	4.3 Modellierung und Simulation des DC/DC-Wandlersystems	
	4.3.1 I neoretische Modellbildung Einzelwandler	
	4.3.2 Modell für geköppetes DC/DC-wandersystem und Primarregelung	
	4.3.3 Simulationsumersuchungen	
F	4.4 PC-Hybrid-Control -Einheit und Hybridsystem-Versuchsstand	25 مە
5	Optimierendes Energiemanagement	20
	5.1 Gesamikonzepi	20
	5.2 Sekundarregelung	28
	5.5 Systembeurebsiumung	32 24
	5.4 Dielinstolizeiten-Wooden für das Energiemanagement	
	5.4.1 Spanning-Strotteruch	
	5.4.2 Wdsselslollvelblauch	
	5.4.5 System with Kullys yild under the second seco	
	5.5 Superioriterisation-model nur das Einergiennanagenient	
	5.5.2 Modeliansatze	
	5.5.5 Vendezustand und innere Snannung	
	5.5 Klemmensnanning	
	5.6 Energiemanagement-Software	
	5.6.1 Implementierung des Energiemanagement-Verfahrens	
	5.6.2 Benutzerschnittstelle	42
6	Entwicklung des Brennstoffzellensystems	43
·	6.1 Aufbau eines Labor-Brennstoffzellentestsystems	
	6.1.1 Regelungstechnische Optimierung der Kathodenversorgung	
	6.1.2 Vermeidung sensibler Spannungsbereiche (OCV) zur Steigerung der Lebensdauer	
	6.1.3 Optimierung der Betriebstemperatur.	
	6.1.4 Optimierung des Purgezyklus	
	6.2 Aufbau des 19 <sup>e</sup> -Brennstoffzellensystems	
7	Online-Analyse und Aktivierung des Brennstoffzellensystems	
	7.1 Elektrochemische Impedanz Spektroskopie	
	7.2 Strom-Puls-Methode / Strom-Unterbrechungs-Methode	
	7.3 Strom-Spannungskennlinie (Polarisationskurve)	
	7.4 Aktivierungsprozesse	59
	7.4.1 Aktivierung durch Befeuchtung	59
	7.4.2 Aktivierung mittels OCV	60
8	Kopplung des Gesamtsystems am ZBT (FS1)	60
	8.1 Betrieb des Systems mit Online-Analyse und Aktivierung	60
	8.2 Optimierung des gekoppelten Gesamtsystems am ZBT	62
9	Experimenteller Funktionsnachweis an der TU Chemnitz (FS2)	66
	9.1 Funktionsnachweis Primärregelung	66
	9.2 Funktionsnachweis Sekundärregelung	67
	9.3 Demonstrationsanwendung	68
10	D Zusammenfassung und Ausblick	71
11	I Veröffentlichungen	75
12	2 Quellenverzeichnis	75
Al	NHANG	

# 1 Motivation und Zielstellung

Niedertemperatur PEM-Brennstoffzellen erleben derzeit in vielen Anwendungen zur autarken Stromversorgung von Kleinleistungsverbrauchern (tragbare Stromerzeuger) und mobilen Anwendungen (Kleinantriebe) als Prototyp oder Kleinserie die Markterschließung. Aufgrund der zahlreichen Vorteile von Brennstoffzellen (BZ) gegenüber Wandlern auf Verbrennungsbasis (u.a. hohe Effizienz, geringe Schall-, Abgas- und Vibrationsemissionen und Wartungsarmut) ergibt sich ein hohes Potenzial für entsprechend sensible Anwendungen, z.B. im Freizeitbereich, für Messstationen oder in der alltäglichen Arbeitsumgebung. In der Regel handelt es sich dabei um Hybridsysteme bei denen das Brennstoffzellen-System, wie die Lichtmaschine im Automobil, die Funktion des Energielieferanten übernimmt und ein elektrischer Speicher die Aufgabe der Leistungsversorgung mit erforderlicher Dynamik und Spitzenlastabdeckung erfüllt. Um Komponenten Brennstoffzelle, Direktspeicher die (Superkondensator oder Batterie) und Last flexibel und energetisch effizient koppeln zu können, ist eine Wandlung der Spannung zwischen jeder einzelnen Systemstufe sinnvoll (s. Abbildung 1).



Abbildung 1: Prinzipaufbau eines Brennstoffzellen-Hybridsystems mit Direktspeicher

Darüber hinaus ist eine Anpassung des Brennstoffzellen-Betriebs an den Ladezustand des Direktspeichers und den dynamischen Lastbedarf wichtig, um einen sicheren, effizienten und Ressourcen schonenden Betrieb des Versorgungssystems zu gewährleisten. Dem DC/DC-Wandlersystem kommt hierbei eine zentrale Bedeutung im Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Hybridsystems zu:

- Energietransfer von der Brennstoffzelle zur Last
- Spannungsregelung zur Last und Spitzenlastabdeckung durch Direktspeicher
- Strombegrenzung und Spannungsüberwachung der Brennstoffzelle
- Laderegelung und Überwachung des Direktspeichers

Auf dem Markt verfügbare DC/DC-Wandler besitzen aufgrund bisheriger Einsatzgebiete (z.B. DC-Steller für Motoren, Batterieladeregler, Solartechnik, technische Ausrüstung) häufig eine ungeeignete Auslegung (Brennstoffzelle fordert hohe Ströme bei niedrigen Spannungen und

großen Spannungshüben) und eine unzureichende Flexibilität für den Einsatz in portablen und mobilen Brennstoffzellen-Hybridstromversorgungen insbesondere auch hinsichtlich der genannten Zusatzaufgaben. Daher ergab sich im Projekt die Notwendigkeit, ein speziell abgestimmtes DC/DC-Wandlersystem für die vorliegende Technologie "Brennstoffzellen-Hybridstromversorgung" zu erarbeiten. Es sollte weiterhin gezeigt werden, dass das DC/DC-Wandlersystem in Kopplung mit einer Energiemanagement-Einheit weitere wichtige Aufgaben erfüllen kann, die zur Erhöhung der Versorgungssicherheit, der Effizienz und der Lebensdauer der Hybridstromversorgung führen. Zu den Zusatzaufgaben zählen:

- Effizienz optimierende Betriebsführung des Gesamtsystems (Betrieb der Brennstoffzelle in Bereichen hoher Wirkungsgrade, Maximierung der direkt genutzten Energie, Minimierung der Verluste der peripheren Baugruppen des Brennstoffzellen-Systems)
- erweitertes Lademanagement des Direktspeichers
- Lebensdauer optimierende Betriebsführung der Brennstoffzelle (Filterung schädlicher Stromwelligkeiten und Minimierung dynamischer Belastungen)
- Zustandsdiagnose der Brennstoffzelle (Betrieb der Einheit Wandler-Direktspeicher als dynamisch steuerbare Last zur Bestimmung von Sprungantwort und Frequenzgang der Brennstoffzelle)
- Aktivierung und Temperierung der Brennstoffzelle

Diese Zusatzoptionen bieten erhebliches Potenzial für die Reduzierung von Betriebskosten (Einsparung von Primärenergie durch erhöhte Energieeffizienz) und von Investitionskosten (erhöhte Lebensdauer der Brennstoffzelle und reduzierte Brennstoffzellen-Leistung). Dies begründet die zentrale Bedeutung einer integrierten Lösung aus Wandlersystem, Energiemanagement-Einheit und intelligenten Betriebsführungsverfahren.

Kernziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines wandlerbasierten Energiemanagements, welches für Brennstoffzellen-Hybridstromversorgungen mittels angepasster Regelungs- und Energiemanagement-Verfahren eine Minimierung der statischen und dynamischen Brennstoffzellen-Beanspruchung und des Wasserstoff-Energieverbrauchs ermöglicht. Dies führt zur Maximierung der Brennstoffzellen-Lebensdauer und der Wandlungseffizienz.

Folgende drei Schwerpunkte wurden im Projekt bearbeitet:

- Realisierung eines geeigneten DC/DC-Wandlersystems mit Energiemanagement-Einheit (Modifizierung bestehender Wandlertechnik auf Brennstoffzellen- und Direktspeicher-Erfordernisse, Optimierung der Wandlerwirkungsgrade, Realisierung der geforderten Zusatzfunktionen)
- optimierendes Energiemanagement-Verfahren (Versorgungssicherheit, Lebensdauer, Wandlungseffizienz,)
- aktive Nutzung des Brennstoffzellen-Stroms zur Zustandsdiagnose (Aussagen zur Brennstoffzellen-Lebensdauer sowie zu im aktuellen Betriebszustand förderlichen und unerwünschter dynamischen Stromänderungen)

Diese drei Kernideen wurden in ein Funktionsmuster integriert. Damit wurden die Machbarkeit sowie die Vorteile eines derartigen integrierten und optimierten Wandler-/Energiemanagement-Systems unter Kombination von Hardware- und Softwareelementen demonstriert. Das Funktionsmuster besteht aus einem Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen-System mit einer elektrischen Nennleistung von ca. 500 W und einer Superkondensator-Einheit als Direktspeicher zur Abdeckung einer Spitzenleistung von ca. 1000 W. Die Größe des Wasserstoffspeichers und der Superkondensator-Einheit wurde auf der Basis konkreter Lastprofile für eine mobile Transportplattform-Anwendung ausgelegt und die Funktionsfähigkeit der integrierten Brennstoffzellen-Hybridstromversorgung demonstriert.

# 2 Stand der Forschung Brennstoffzellen-Hybridsysteme

#### 2.1 Brennstoffzellen-Hybridkonzepte

Brennstoffzellen sind elektrochemische Energiewandler, die die Reaktion von Wasserstoff und Luftsauerstoff auf direktem Wege zur Wandlung in elektrische Energie und Wärme nutzen. Die Dynamik des Brennstoffzellen-Systems hinsichtlich Startzeiten und Lastwechseln und seine Maximalleistung werden direkt durch die Medienversorgung des Brennstoffzellen-Stacks und durch seine Architektur limitiert. Aus diesem Grund ist der Aufbau eines kombinierten Gesamtsystems aus der Brennstoffzelle mit zugehöriger Medienversorgung und einem elektrischem Energiepuffer zur Lastdeckung optimal für dynamische Lastfälle geeignet. Solche Kombinationen sich ergänzender Energiespeicher/-wandler sind als Hybridsysteme bekannt, im Bereich der Fahrzeugantriebe wird beispielsweise die Kombination Benzin gespeister Verbrennungsmotor und Batterie gespeister Starter-/Generatormotor als Hybridsystem bezeichnet. Dass eine Kombination von Brennstoffzelle und Direktspeicher vorteilhaft ist, hat sich insbesondere für Anwendungen der Antriebstechnik größerer Leistung erwiesen. Busse, PKWs aber auch Gabelstapler und ähnliche Anwendungen werden zunehmend mit diesen Systemen entwickelt [Bul07], ebenso Brennstoffzellen-Anwendungen kleinerer Leistung im Bereich der persönlichen Mobilität (Rollstühle, Transportplattformen, Kleinstfahrzeuge), unter anderem auch bei der Forschungsstelle ZBT [Beck06], [Beck07]. Dabei wird bisher auf Komponenten hinsichtlich Speicher und Wandlertechnik zurückgegriffen, verfügbare systematische Neuentwicklungen insbesondere der Technologieschnittstelle DC/DC-Wandler stehen in der Regel nicht im Fokus der Entwicklung. So auch in einem abgeschlossenen Vorhaben der Industriellen Gemeinschaftsforschung an der Universität Duisburg-Essen [PA1] bei dem die Optimierung des Systembetriebs von Brennstoffzellen-Antriebssystemen erarbeitet wurde. Projektziel war hier die Erstellung eines Leitfadens zum Systemdesign von Brennstoffzellenbasierten mechatronischen Antriebssystemen, nicht aber die Entwicklung von Hardwarekomponenten und die systematische Nutzung der Synergien aus Direktspeicher und Brennstoffzellen-System zu dessen optimaler Gesamtsystemregelung.

Auch im Bereich der tragbaren Stromversorgung werden hybridisierte Systeme entwickelt und inzwischen erste Produkte vertrieben. Dabei wird eine Trennung des Brennstoffzellen-Systems vom dynamischen Speicher vorgenommen und das Brennstoffzellen-Aggregat meist nur als Ladegerät eingesetzt [BA07]. Als Schwesterprodukte werden von diesen Firmen dann teilweise Aggregate vertrieben, die zusätzlich einen Akkumulator integriert haben und somit als autarke Stromversorger gelten können [BA06]. Eine direkte Integration von Direktspeichern in die Basisprodukte wird vermieden, da bei klassischen Architekturen davon ausgegangen wird, dass durch Auswahl der genutzten Akkumulatoren die eigentliche Last- und Anwendungsanpassung vorgenommen wird. Dadurch werden jedoch auch die Möglichkeiten eines integrierten Energiemanagements nicht ausgeschöpft.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes sollte eine Lösung für ein portables DC/DC-Wandlersystem (ca. 500 W Nennleistung) mit integrierter Energiemanagement-Einheit entwickelt werden, welches mittels spezieller zu entwickelnder Zustandsdiagnose-, Regelungsund Optimierungsverfahren eine bezüglich Versorgungssicherheit, Effizienz und Lebensdauer Brennstoffzelle der optimale Betriebsführung gestattet. Das Energiemanagement sollte sich automatisch an spezifische dynamische Lastanforderungen adaptieren können, so dass eine breite Palette von Anwendungen abgedeckt werden kann.

### 2.2 Energiespeicher im Hybridsystem

Die Primärenergieguelle für die in diesem Forschungsvorhaben angestrebte mobile/portable Energieversorgungseinheit ist Wasserstoff (H<sub>2</sub>), welcher über die Brennstoffzelle mit hoher Effizienz in elektrischen Strom gewandelt wird. Hauptvorteil des Wasserstoffs ist die hohe Energiedichte (ca. 300-500 Wh/kg chemisch je nach Speichertyp). Dies ergibt bei einem Brennstoffzellen-Wirkungsgrad von 50 % eine elektrische Energiedichte von ca. 150-250 Wh/kg. Dieser Wert reduziert sich noch etwas, da die Masse der Brennstoffzelle mit eingerechnet werden muss. Sie sollte im Verhältnis zur H2-Speichermasse klein sein. In [Boc07 1] und [Boc07 2] werden diese Aspekte diskutiert, und es wird gezeigt, dass bei richtiger Wahl des Größenverhältnisses H2-Speicher zu Brennstoffzelle, Gesamtsysteme mit Energiedichten über der von modernen Lithium-Ionen Batterien (80-160 Wh/kg) erreicht werden können. Weitere Vorteile von mobilen/portablen Energieversorgungen auf Brennstoffzellen-Basis sind die hohe Verfügbarkeit durch schnelle Wiederbefüllbarkeit des H<sub>2</sub>-Speichers bzw. schnelle Speicherwechsel sowie eine umweltfreundliche und wartungsfreie Energieversorgung. Die Lebensdauer von PEM-Brennstoffzellen-Systemen und H2-Metallhydridspeichern ist in etwa mit der von Batterien vergleichbar (1000-4000 Nennlaststunden bzw. Zyklen). Nachteile von Brennstoffzellen sind ihre beschränkte Dynamik und Spitzenlastfähigkeit sowie die höheren spezifischen Kosten je Leistung (ca. 2-5 €/W im Vergleich zu ca. 0.1-0.5 €/W bei Batterien und Superkondensators). Die in diesem Projekt vorgeschlagene Hybridisierung der Brennstoffzelle mit einem Direktspeicher ermöglicht die Steigerung der Leistungsdichte und somit a) die Erhöhung der Brennstoffzellen-Lebensdauer, b) die Abdeckung von Lastspitzen und c) die Erhöhung der Effizienz (durch Betrieb in Arbeitspunkten hoher Effizienz sowie durch langsame Arbeitspunktwechsel mit geringerer Brennstoffzellen-Beanspruchung und weniger peripheren Verlusten). Als Direktspeicher kommen grundsätzlich Hochleistungs-Batterien (z.B. NiMh oder Lithium-Ionen Batterien) oder Superkondensators (SC) in Betracht. Vorteile von Superkondensatoren gegenüber Batterien sind die hohe Zyklenfestigkeit und Lebensdauer (ca. 1 Million Zyklen gegenüber ca. 1000-4000 Zyklen bei Batterien), die einfache Laderegelung (Ladezustand direkt proportional zur Spannung), die höhere Leistungsdichte (ca. max. 22 kW/kg gegenüber max. 3.2-5.6 kW/kg für Lithium-Ionen Batterien), die höhere Lade-/Entladeeffizienz (typ. 95-98 % gegenüber max. 90-95 % für Lithium-Ionen Batterien). Hauptnachteil ist die um den Faktor 5 bis 25 geringere Energiedichte von Superkondensatoren (max. ca. 5.6 Wh/kg) gegenüber Batterien. Dieser Aspekt ist allerdings für die in diesem Energieversorgungseinheit Vorhaben angestrebte nicht ausschlaggebend, da die Energieversorgung über das H2-versorgte Brennstoffzellen-System erfolgt. Somit muss der Direktspeicher nur so groß sein, dass er ausreichend Reserve für die Überbrückung der Zeiten bietet, in denen die Last oberhalb oder unterhalb der aktuellen bzw. maximalen Brennstoffzellen-Leistung liegt. Außerdem muss für die Zeiträume des An- und Abfahrens der Brennstoffzelle und für die im Projekt zu implementierende Brennstoffzellen-Zustandsdiagnose im Direktspeicher genug Energie zur Verfügung stehen. Dies ist mit einer Superkondensator-Einheit möglich. So wäre exemplarisch für die Aufnahme der U-I-Kennlinie einer 500 W-Brennstoffzelle in 20 s (Begrenzung der Änderungsgeschwindigkeit der Brennstoffzellen-Leistung auf 25 W/s) vom Superkondensator eine Energie von ca. 2.8 Wh aufzubringen. Das entspricht nach Vorabschätzung einer Superkondensator-Masse von 1 kg und vertretbaren Kosten von 100-300 €. Im Vergleich hätte eine Lithium-Ionen Batterie zur Abdeckung einer Spitzenlast von 2000 W bei 24 V Busspannung ca. eine Kapazität von 8Ah (200 Wh), eine Masse von 1.9 kg und geschätzte Kosten von ca. 400 €. Aus den genannten Gründen wurde in diesem Forschungsprojekt als Direktspeicher eine Superkondensator-Einheit eingesetzt.

#### 2.3 Leistungselektronische Topologien für DC/DC-Wandler für Brennstoffzellen-Hybridsysteme

Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird für die Steuerung der Leistungsflüsse und für die Spannungsanpassung zwischen Brennstoffzelle, Direktspeicher und Last ein DC/DC-Wandlersystem benötigt, welches aus zwei flexibel steuerbaren DC/DC-Wandlern besteht. Der Brennstoffzellen-Wandler ist unidirektional, der Wandler zum Direktspeicher ist bidirektional

auszuführen. Im Sinne einer effizienten und leichten portablen bzw. mobilen Anwendung ist auf hohe Wirkungsgrade, minimales Bauvolumen und Gewicht zu achten. Weiterhin müssen beide Wandler für die Implementierung der Zusatzfunktionen (Brennstoffzellen-Zustandsdiagnose, mehrkriteriell optimale Betriebsführung) über ein von der Energiemanagement-Einheit vorgegebenes Signal flexibel und dynamisch gesteuert werden können. Kommerziell verfügbare Architekturen bieten nicht diese Flexibilität, um die genannten Zusatzfunktionen erschließen zu können, welche im Fokus dieses Vorhabens stehen. Die maßgebliche Verlustquelle in geschalteten Stromversorgungssystemen sind die Verluste in den Leistungshalbleitern, welche sich in die Schalt- und Leitverluste der aktiv geschalteten Leistungsbauelemente (MOSFETs), sowie die Leit- und Reverse-Recovery-Verluste der passiven Leistungshalbleiter (Dioden) gliedern lassen. Zudem weisen technische Anordnungen, wie Spulen und Kondensatoren, ohmsche Ersatzreihenwiderstände auf. Bauvolumen und Gewicht des DC/DC-Wandlers werden entscheidend durch die passiven Komponenten (Induktivitäten, Kapazitäten) bestimmt. Da die erforderlichen Werte für L und C zur Reduktion der Strom- und Spannungswelligkeit wesentlich von der Schaltfrequenz des Systems abhängen, ist es notwendig, diese zu erhöhen. Eine erhöhte Systemfrequenz hat jedoch zur Folge, dass die Schaltverluste der Leistungshalbleiter zunehmen. An dieser Stelle sind harte Schalthandlungen nicht mehr geeignet. Vielmehr können mit alternativen Schaltvorgängen, wie dem Nullstromschalten (ZCS), Nullspannungsschalten (ZVS) und resonanten Methoden, signifikante Verbesserungen erzielt werden [Nic98]. Das ungünstige Schalt- und Leitverhalten der antiparallelen MOSFET-Diode lässt sich maßgeblich durch Verwendung der so genannten aktiven Kommutierung vermeiden. Fortschreitende Optimierungen des Gesamtsystems DC/DC-Wandler hinsichtlich Volumenund Gewichtsreduktion und Wirkungsgradsteigerung basieren auf so genannten Interleaved- oder Multichannel-Topologien.

#### Bidirektionale DC/DC-Wandlerkonzepte mit galvanischer Trennung

Eine besonders in der automotiven Brennstoffzellenanwendung weit verbreitete DC/DC-Wandlertopologie wird in [Chiu06] behandelt. Der aus der konventionellen Schaltnetzteiltechnik bekannte Vollbrückenwandler (s. Abbildung 2) zeichnet sich durch einen hohen Wirkungsgrad in einem weiten Leistungsbereich aus. Nachteilig erweist sich die große Anzahl an aktiven Leistungshalbleitern sowie der Anteil der passiven Komponenten (Transformator, Induktivitäten, Kapazitäten) am Gesamtvolumen, was die Topologie teuer, groß bzw. schwer und nicht zuletzt komplex hinsichtlich der Steuerung und Regelung werden lässt. Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit der Reduktion der aktiven Leistungshalbleiter vom Vollbrückenbetrieb hin zu Halbbrückenanordnungen mit geteiltem Spannungszwischenkreis [Tao05], [Peng04].



Abbildung 2: Vollbrückenwandler

Im Rahmen dieses F&E-Vorhabens wurde ein DC/DC-Wandlersystem mit einer Busspannung von 24 V<sub>DC</sub> aufgebaut werden. Sowohl Brennstoffzelle als auch Superkondensator-Einheit arbeiten mit einer Leerlaufspannung unwesentlich höher als 24 V<sub>DC</sub>. Der grundlegende Vorteil von Topologien mit galvanischer Trennung ist die einfache Anpassung zwischen niedrigen

Spannungen (Brennstoffzellen, Superkondensator) und hohen Spannungen (z.B. Spannungszwischenkreis bei Netzwechselrichtern, vgl. [Bar04]). Dieser Fakt ist für das im Projekt vorgeschlagene DC/DC-Wandlersystem obsolet, so dass zugunsten von Einfachheit und Überschaubarkeit DC/DC-Wandlertopologien ohne galvanische Trennung bevorzugt werden.

#### Bidirektionale DC/DC-Wandlerkonzepte ohne galvanische Trennung

Nichtisolierte bidirektionale DC/DC-Wandlerkonzepte ohne galvanische Trennung basieren zum Großteil auf den einfachen leistungselektronischen Schaltungen des Hoch- und Tiefsetzstellers, zusammengefasst in einer Halbbrücke (Abbildung 3a).



Abbildung 3: a) Halbbrückenwandler, b) Halbbrückenwandler im Interleaved-Mode (3-fach)

Diese, aus der Automobilbranche zur Adaption von 14 V und 42 V Batteriesvstemen bekannte Topologie, scheint gerade zur Anpassung moderater Spannungsebenen hinsichtlich Wirkungsgrad und Baugröße prinzipiell sehr gut geeignet zu sein. Die Topologie zeigt nach [Boc06] bereits ohne zusätzlich Maßnahmen, wie Schaltentlastungsnetzwerke oder aktive Kommutierung, einen mittleren Wirkungsgrad von 92-94 % bei einer Schaltfrequenz von f = 50 kHz, einer Spannungswandlung von 30 V auf 24 V in einem Leistungsbereich von 300-1200 W. Bei Einsatz der aktiven Kommutierung und weiterer Optimierung des leistungselektronischen Aufbaus kann der Wirkungsgrad für oben stehende Topologie um ca. 2-3 % über den gesamten Leistungsbereich gesteigert werden. Weitere Verbesserungen, und Spannungswelligkeit, besonders hinsichtlich Strom-Leitverlusten in den Leistungshalbleitern und passiven Komponenten sowie der Baugröße des DC/DC-Wandlers verspricht die Anwendung der Interleaved-Topologie (Abbildung 3b). Während die Systemschaltfrequenz konstant bleibt, wird die Anzahl der schaltenden Transistoren um den Faktor n erhöht, wodurch die Schaltverluste zwar ansteigen, die Leitverluste jedoch reduziert werden können. Die Phasenverschiebung zwischen den einzelnen Kanälen bewirkt eine Glättung des resultierenden Ausgangsstromes, wobei *n* niederinduktive und leichtere Drosseln eingesetzt werden können.

In einer Phase wird demnach die Induktivität reduziert, wodurch der Ripplestrom ansteigt und die Phase in den diskontinuierlichen Betrieb übergeht. Vorteilhaft erweist sich dieses Verhalten bezüglich der Schaltverluste der Transistoren, da diese bei einem Strom I = 0 A geschaltet werden. Im Fokus von Forschungsarbeit [Des06] steht die Optimierung eines DC/DC-Wandlers im Hinblick auf die optimale Anzahl an Phasen. Optimiert wird einerseits nach Schalt- und Leitverlusten der Leistungshalbleiter, den Leitverlusten der passiven Komponenten, den auftretenden Strom- und Spannungswelligkeiten am Ein- und Ausgang des Wandlers und andererseits nach Baugröße und Bauvolumen des gesamten Wandlers. In [Gar06] werden Halbbrücken-Interleaved-Topologien mit einer Phasenanzahl von n = 1-36 und einer Leistung P = 1 kW näher untersucht und hinsichtlich Bauvolumen und Wirkungsgrad miteinander verglichen.

### 2.4 Energiemanagement-Ansätze für Brennstoffzellen-Hybridsysteme

Wichtige Optimierungsziele für das Energiemanagement eines Brennstoffzellen-Hybridsystems (neben der Gewährleistung der Versorgungssicherheit) sind die Maximierung der Gesamteffizienz und der Komponenten-Lebensdauer. Diese Ziele sind, bis auf die Umwandlungsverluste im Direktspeicher und im zugehörigem DC/DC-Wandler, hauptsächlich mit der Brennstoffzelle verbunden. Daher bildet die möglichst genaue Erfassung und Beschreibung der dynamischen Brennstoffzellen-Zustandsgrößen (elektrischer und thermischer Arbeitspunkt. Membranfeuchte etc.) eine wichtige Grundlage das für Gesamtenergiemanagement. Auf der anderen Seite steht für das Energiemanagement das oberste Ziel der Garantie der Versorgungssicherheit, d.h. die Abdeckung der je nach Anwendung dynamisch schwankenden Lastprofile. Der Direktspeicher dient als Mittler zur Überbrückung von für die Brennstoffzelle ungünstigen Betriebszuständen, zur Sicherstellung der Energieversorgung auch im Spitzenlastfall und für spezielle Brennstoffzellen-Regelungsfunktionen (Reaktivierung, U-I-Kennlinienaufnahme für die Zustandsdiagnose sowie Beeinflussung der Zelltemperatur). Die Energiemanagamentaufgabe stellt dementsprechend ein komplexes und mehrkriterielles Optimierungsproblem für die geforderten Optimierungsziele (Gütekriterien) unter Berücksichtigung der dynamischen Zustandsgrößen (Brennstoffzelle, Speicherladezustand) und Nebenbedingungen (Arbeitsbereiche der Brennstoffzelle und der Speicher) dar. [Han03] beschreibt die Lösung eines ähnlichen Optimierungsproblems für die Einsatzplanung eines dezentralen Hybridsystems mittels eines mathematischen Optimierungsverfahrens. In [Pesch80] werden wichtige methodische Ansätze zur Adressierung allgemeiner Polyoptimierungsprobleme vorgestellt und diskutiert.

In [Boc07\_1] und [Boc07\_2] sind Vorarbeiten der TU Chemnitz auf dem Gebiet des prädiktiven und optimierenden Energiemanagements von Brennstoffzellen-Hybridsystemen zusammengefasst. Die Untersuchungen zeigen das Optimierungspotenzial seitens der Brennstoffzelle, die Möglichkeiten der Reduzierung der installierten Brennstoffzellen-Leistung und der damit verbundenen Investitionskosten.

	Superkondensator
Strategie 1	<ul> <li>Volladen der Superkondensator-Einheit</li> <li>optimale Verfügbarkeit</li> <li>keine Aufnahme von Energie möglich</li> <li>sinnvoll bei Lastprofilen, bei denen häufig und ggf. über längere Zeit Spitzenlast auftritt</li> </ul>
Strategie 2	<ul> <li>Halten der Superkondensator-Einheit auf mittlerem Ladezustand</li> <li>optimale Abdeckung von Anfahr- und Abfahrvorgängen der Brennstoffzelle von Null auf Nennlast</li> <li>nur die halbe Energiemenge zur Pufferung von Lastspitzen verfügbar</li> <li>sinnvoll bei Lastprofilen mit längeren Standby- oder Extremteillastabschnitten, bei denen die Brennstoffzelle abgefahren werden soll und längere Zeit ausgeschaltet bleibt, bevor sie wieder (über den Superkondensator geglättet) langsam hochgefahren wird</li> </ul>
Strategie 3	<ul> <li>Intelligente Anpassung des Sollwerts für den Superkondensator-Ladezustand in Abhängigkeit von den auftretenden Lastprofilen         <ul> <li>Berücksichtigung der Aspekte von Strategie1 und Strategie2</li> <li>vorausschauende Betriebsführung der Superkondensator-Einheit bei Kenntnis über die Art der zu erwartenden Lastprofile</li> <li>Ggf. Reduzierung der installierten Superkondensator-Speichergröße möglich</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 1: Einzelstrategien für das Energiemanagement von Superkondensator und Brennstoffzelle

	Brennstoffzelle
Strategie 1	<ul> <li>Betrieb der Brennstoffzelle im Arbeitspunkt maximaler Effizienz</li> <li>Erhöhung der Energieeffizienz, Reduzierung des H<sub>2</sub>-Bedarfs und damit der Betriebskosten</li> <li>schlechte Ausnutzung der Brennstoffzelle, höhere Anforderungen und Kosten für den Direktspeicher</li> </ul>
Strategie 2	<ul> <li>Betrieb der Brennstoffzelle in einem Band hoher Effizienz (z.B. 85 bis 100% der maximalen Effizienz)</li> <li>Erhöhung der gesamten Energieeffizienz, Reduzierung des H<sub>2</sub>-Bedarfs und damit der Betriebskosten</li> </ul>
Strategie 3	<ul> <li>Reduzierung der Stromänderungsgeschwindigkeit der Brennstoffzelle</li> <li>Erhöhung der Lebensdauer des Brennstoffzellen-Stacks</li> <li>Reduzierung dynamischer Verluste der Peripheriebaugruppen</li> </ul>
Strategie 4	<ul> <li>Vermeidung von Extremteillastbetrieb der Brennstoffzelle</li> <li>Erhöhung der Lebensdauer infolge Vermeidung schädlicher hoher Zellpotenziale (Korrosion des Kohlenstoffträgermaterials für den Katalysator)</li> </ul>

Die in Tabelle 1 angegebenen Strategien dienten im Projekt als Grundlage für das Energiemanagement und konnten weiter verfeinert werden.

# 3 Systemauslegung und Schnittstellendefinition

Grundlage der Hybid-Systemauslegung bildet ein Lastprofil, das an einer autonomen Plattform der TU Chemnitz aufgenommen wurde. Das Gesamtsystem soll als Energie-Versorgungsmodul die bisherige Akkutechnologie ersetzen. Das Akkusystem basiert auf einem 24 V Systembus, der für das Hybridsystem die Schnittstelle zur Einkopplung bildet.

Das Lastprofil beinhaltet im Wesentlichen die Leistungsaufnahme des Antriebes. Für weitere Verbraucher, wie Licht, mobiler Steuerungs-PC etc., werden zur Auslegung pauschal 100 W addiert. Die größte Belastung für das System findet zwischen Sekunde 80 und 140 statt. In dieser Zeit muss es ca. 60 Sekunden eine Leistung von 500 W liefern. Dieses wird als maximaler Auslegungspunkt gewertet.

Die Stacks des ZBT haben eine aktive Fläche von 50 cm<sup>2</sup> pro Zelle. Die Anzahl der Zellen, und somit der Spannungsbereich, in dem der Stack arbeitet, ist individuell anpassbar. Um mit einem reinen Step-down Wandler arbeiten zu können, was vom Wirkungsgrad her sinnvoll ist, wurde die Zellzahl zunächst auf 34 Zellen und später auf 38 Zellen festgelegt. Ein Stack mit 38 Zellen stellt bei einer Spannung von 24 V noch eine Leistung von 600 W bereit (s. Abbildung 50). Der Stack bietet so genügend Reserven für den Fall, dass das System nicht optimal betrieben wird oder bereits gealtert ist.



Abbildung 5: Darstellung der Schnittstellen im Gesamtsystem

Da mit dem System ein 24 V Bus generiert wird, wurde auf eine interne Spannungswandlung des Brennstoffzellensystems verzichtet und auch die Peripherie des Brennstoffzellensystems auf diese Spannung ausgelegt. Die Schnittstellen für das Brennstoffzellensystem reduzieren sich so auf einen 24 V Versorgungsanschluss und einen 24 V bis 40 V Leistungsausgang des Stacks (siehe auch Kapitel 6.2). In Abbildung 5 sind sämtliche Subsysteme abgebildet. Neben der Brennstoffzelle und dem zugehörigen Wandler sind noch die Superkondensator-Einheit, mit dem entsprechenden Wandler, und die 24 V-Last abgebildet. Die Energiemanagement-Einheit kontrolliert das gesamte System über die Wandler. Das Brennstoffzellensystem stellt sämtliche Messwerte zusätzlich über eine serielle Schnittstelle mit einem festen Datenframe, für eine sichere Kommunikation, zur Verfügung (Tabelle 2). Auch können über diese Schnittstelle Befehle für eine Synchronisation der System empfangen werden. Der Frame besteht aus einem Kopf (Position 1 bis 5), dem Datenteil (hier Position 6 bis 24) und dem Ende (Position 25 und 26), das eine Checksumme beinhaltet.

Position		1	2	3	4	5	6	7	8	9 1	0 1	1 12	13	14	15 16	6 17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Bereich			F	leade	er										Data									Abs	chluss
Bedeutung		Referenz	Länge Data	Länge Data	Referenz	Länge Data	Watchdog	System- zustand	Frei	Frei	-	T Stack		I Stack	Stack		p Anode		p Kathode				Clock	Summe Data	Referenz
Integer (hex)	0	x68			0x68																				0x16

Tabelle 2: Datenframe der RS232-Kommunikation

Auf der Basis dieser Schnittstellendefinitionen wurden dann parallel das DC/DC-Wandlersystem, das Brennstoffzellensystem und die Energiemanagement-Einheit entwickelt. Die einzelnen Entwicklungsstufen und Kopplungen sind in den folgenden Kapiteln erläutert.

# 4 DC/DC-Wandlersystem

#### 4.1 Grundlegender Aufbau des DC/DC-Wandlers

Auf der Basis der Anforderungen und der Ergebnisse der Literaturrecherche zu DC/DC-Wandlern wurde entschieden, zunächst einen DC/DC-Wandler in einfacher einphasiger Hochsetz-Tiefsetzsteller-Topologie ohne aktive Kommutierung und ohne galvanische Trennung aufzubauen.



Abbildung 6: Komponenten des entwickelten DC/DC-Wandlers

Dabei wurde besonderer Wert auf die Auswahl von Bauelementen mit niedrigen Verlusten und auf eine gewisse Überdimensionierung gelegt, um für das Experimentiersystem einen hohen Wirkungsgrad und einen sicheren Betrieb auch bei hohen Strömen zu gewährleisten. Der entwickelte DC/DC-Wandler setzt sich modular aus einer Leistungsplatine, einer Treiberplatine und einer Reglerplatine (s. Abbildung 6) zusammen. Die **Leistungsplatine** ist als einfache Halbbrücke mit der Möglichkeit zum Hochsetz- und Tiefsetzbetrieb aufgebaut (s. Abbildung 7).



Abbildung 7: Aufbau der Leistungsplatine

Als leistungselektronische Schalter kamen je zwei parallele MOSFETs mit interner Body-Diode mit einer maximalen Sperrspannung von 75 V und einem maximalen Strom von 100 A je MOSFET zum Einsatz. Die Leistungsdrossel (Doppel-E-Kern mit Luftspalt) besitzt eine Induktivität von 10.4 µH. Weiterhin wurden auf Eingangs- und Ausgangsseite jeweils zwei Elektrolyt- und zwei Folienkondensatoren mit einer Gesamtkapazität etwa 10 mF zur Glättung vorgesehen. Die Auslegung der Speicher (L, C) orientierte sich an der Schaltfrequenz von 50 kHz, der geforderten Nennleistung von 1200 W und dem maximalen Stromripple von 0.5 A. Eingangs- und Ausgangsstrom werden über zwei LEM-Stromsensoren (Hall-Prinzip), Eingangs- und Ausgangsspannung über zwei Widerstandsspannungsteiler gemessen.

Für die Ansteuerung der MOSFETs wird je eine **Treiberplatine** für den oberen und unteren Zweig benötigt. Sie besteht aus zwei Treiberchips und einem Optokoppler zur galvanischen Trennung des PWM-Signals zwischen Regler- und Treiberplatine. Die **Reglerplatine** besteht im Wesentlichen aus einer Operationsverstärkerschaltung zur Realisierung eines analogen PID-Reglers und aus einem Schaltkreis zur Generierung des PWM-Tastverhältnisses für die MOSFETs. Für jede Wandlerrichtung (Hochsetz-/Tiefsetzbetrieb) ist eine Reglerplatine vorgesehen. Diese kann leicht durch Jumper auf Strom- bzw. Spannungsregelung konfiguriert werden. Der Sollwert für den Spannungs- bzw. Stromregler wird über ein analoges Spannungssignal vom Energiemanagement-PC vorgegeben. Hierzu und zur Erfassung aller Messwerte wird ein USB-ADDA-Messmodul als Prozessschnittstelle eingesetzt. Jede Treiberplatine wird mit einer eigenen galvanisch getrennten Betriebsspannung von 12 V versorgt. Diese wird von einer Baugruppe zur **Hilfsspannungsversorgung** bereitgestellt.

Zur Optimierung des Wirkungsgrads und der elektromagnetischen Abstrahlung wurden zahlreiche Untersuchungen unter Modifikation des Wandleraufbaus, der eingesetzten MOSFETs, der Schaltfrequenz, der Gate-Vorwiderstände und der Induktivität durchgeführt. Detaillierte Ergebnisse der Untersuchungen sind in [Boc10\_1], [Pau11] und [Graub06] dargestellt.

#### 4.2 Experimentelle Untersuchung des DC/DC-Wandlers

Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen des entwickelten DC/DC-Wandlers bildete die Vermessung des Verlustleistungs- bzw. Wirkungsgradkennfelds in Abhängigkeit von der Eingangsspannung und dem Eingangsstrom. Dazu wurde der in Abbildung 8 dargestellte Versuchsstand entwickelt und aufgebaut.



Abbildung 8: Versuchsaufbau zur Wirkungsgradkennfeld-Vermessung des DC/DC-Wandlers

Voraussetzung für die Bestimmung der Verlustleistung  $P_V$  und des Wirkungsgrads  $\eta$  des Wandlers ist eine genaue Messung des Eingangsstroms  $I_1$  und des Ausgangsstroms  $I_2$ . Dies deschieht über zwei Präzisionswiderstände (PBV R005, 5 m $\Omega$ ) und zwei hochgenaue Multimeter (Fluke 45). Die Multimeter werden automatisiert vom Messprogramm über eine RS232-Schnittstelle ausgelesen. Die Eingangsspannung  $U_1$  und die Ausgangsspannung  $U_2$ werden über ein ADDA-Messmodul synchron zu den Strömen eingelesen. Der Leistungsfluss zwischen der steuerbaren Spannungsquelle (EA-PS 9080-50) und der steuerbaren elektronischen Last (H&H PL906) wird durch den zu vermessenden DC/DC-Wandler gesteuert. Abbildung 8 zeigt beispielhaft den Aufbau für die Vermessung des Tiefsetzstellers. Zur Verlustleistungskennfelds Abrasterung des werden durch Messrechner den die Eingangsspannung  $U_1$  an der Spannungsquelle und der Ausgangsstrom in die elektronisch steuerbare Last  $I_2$  vorgegeben und variiert. Die Ausgangsspannung  $U_2$  wird im Falle des DC/DC-Wandlers am Direktspeicher durch den Wandler selbst geregelt (z.B.  $U_2=24 V$ ). Die Ausgangsleistung  $P_2=I_2*U_2$  ist aufgrund der Wandlerverluste stets kleiner als die Eingangsleistung  $P_1 = I_1 * U_1$ . Der Wirkungsgrad im aktuellen Arbeitspunkt bestimmt sich zu  $n_{DCDC}(U_1,I_1)=100 \% P_2/P_1$ , die Verlustleistung bestimmt sich zu  $P_{VDCDC}(U_1,I_1)=P_1-P_2$ . Die Abrasterung des gesamten Eingangsspannungs- und Ausgangsstrombereichs führt zu den in Abbildung 9 und Abbildung 10 dargestellten Messpunkten.



Abbildung 9: Messpunkte und extrapoliertes Wirkungsgradkennfeld des DC/DC-Wandlers



Abbildung 10: Messpunkte und extrapoliertes Verlustleistungskennfeld des DC/DC-Wandlers

Diese dienen als Grundlage für die Bestimmung beliebiger Zwischenpunkte der Kennfelder über einen Extrapolations-Algorithmus (Matlab-Funktion *"griddata"*). Abbildung 9 zeigt das experimentell bestimmte Wirkungsgradkennfeld des DC/DC-Wandlers für Tiefsetzbetrieb. Der Wandler weist einen hohen Wirkungsgrad im Bereich von 93-98 % auf. Die Wirkungsgrade für den Hochsetzsteller sind aufgrund der Diodenverluste im Mittel 1-2 % niedriger. Dies könnte ggf. durch aktive Kommutierung behoben werden. Die Vermessungen wurden für alle drei Wandler (Brennstoffzellen-Tiefsetzsteller, Superkondensator-Tiefsetzsteller, SuperkondensatorHochsetzsteller) für unterschiedliche Induktivitätswerte durchgeführt. Die erreichten Wirkungsgrade sind für die realisierten Demonstrationssysteme sehr gut.

Der entwickelte Versuchsstand bietet neben der Vermessung des DC/DC-Wandlers für beliebige Lastprofile auch die Möglichkeit der Nachbildung des Verhaltens einer Brennstoffzelle. Hierzu werden Eingangsstrom und Eingangsspannung erfasst und der Spannungssollwert der Spannungsquelle der im Steuerrechner hinterlegten Spannung-Strom-Kennlinie der "virtuellen Komponente" nachgeführt.

Für weitere Ergebnisse zu den experimentellen Untersuchungen des DC/DC-Wandlers (z.B. Vermessung des Frequenzgangs) sowie für eine detaillierte Beschreibung der Versuchsaufbauten zur Wandlervermessung sei auf [Boc09/3] verwiesen.

#### 4.3 Modellierung und Simulation des DC/DC-Wandlersystems

#### 4.3.1 Theoretische Modellbildung Einzelwandler

Als Basis für die Modellbeschreibung und optimale Auslegung des gekoppelten Systems aus zwei DC/DC-Wandlern und die zugehörige Primärregelung, soll zunächst die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Modellierung geschalteter leistungs-elektronischer Wandlersysteme kurz vorgestellt werden. Dabei wird das Anfang der 80er Jahre von Cuk und Middlebrook entwickelte Verfahren des "State-Space Averaging" eingesetzt [Cuk76], [Cuk78]. Dieses Verfahren wurde u.a. auch in [Myr00] und [Eng01] genutzt, um dort die Topologie des Cuk-Wandlers (System 4. Ordnung) für den Einsatz in einem Batteriestromrichter zu modellieren. In [Boc10\_1] wurde das Modellierungsverfahren des "State-Space Averaging" für den in dieser Arbeit entwickelten DC/DC-Wandler (mit und ohne LC-Eingangsfilter) umgesetzt und mit dem experimentell bestimmten dynamischen Verhalten verglichen. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen experimentellen und theoretischen Ergebnissen.

Im Folgenden soll das Grundprinzip der Modellierung beispielhaft für den Tiefsetzsteller ohne Eingangsfilter und ohne aktive Kommutierung (s. Abbildung 11) vorgestellt werden.



Abbildung 11: Tiefsetzsteller ohne Eingangsfilter

Im Tiefsetzbetrieb wird die Taktung durch den Schalter S realisiert. Der Schalter im unteren Zweig bleibt geöffnet und wird nur durch die interne Reverse-Diode D repräsentiert. Im leitenden Zustand kann die Spannung über der Diode mit Hilfe einer Linearisierung der Diodenkennlinie berechnet werden. Sie setzt sich zusammen aus der Flussspannung  $U_{F_D1}$  und dem Produkt aus Leitwiderstand  $R_{D1}$  und dem Strom durch die Diode [Lapp87]. Je nach Schaltzustand von Schalter S können zwei Systeme unterschieden werden. Den ersten Schritt bildet die Aufstellung der Differentialgleichungen getrennt für beide Schaltzustände:

System1 – Schalter S geschlossen:

$$\frac{di_{L}}{dt} = \frac{1}{L}(-i_{L}R_{L} - u_{C} + u_{E})$$

$$\frac{du_{C}}{dt} = \frac{1}{C}i_{L}$$
(4-1)
(4-2)

System2 – Schalter S geöffnet:

$$\frac{di_{L}}{dt} = \frac{1}{L} (-i_{L}(R_{L} + R_{D}) - u_{C} - u_{F_{D}})$$

$$\frac{du_{C}}{dt} = \frac{1}{C} i_{L}$$
(4-3)

Beide Systeme werden in die übliche Zustandsraumdarstellung überführt:

$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$	(4-5)
$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$	(4-6)

Hierbei sind **A** die Systemmatrix, **B** die Steuermatrix und **C** die Ausgangsmatrix. Der Vektor **x** ist der Zustandsvektor, **y** entspricht dem Ausgangsvektor und **u** dem Eingangs- bzw. Steuervektor [Föll94].

Der Zustandsvektor **x** und der Steuervektor **u** werden wie folgt gewählt:

$\mathbf{x} = [i_L \ u_C]^T$	(4-7)
$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{\scriptscriptstyle E} & u_{\scriptscriptstyle F\_D} \end{bmatrix}^T$	(4-8)

Systemmatrix **A** und Steuermatrix **B** ergeben sich für System1 zu:

$\mathbf{A}_{1} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L}}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$	(4-9)
$\mathbf{B}_{1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0\\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	(4-10)

#### und für System2 zu:

$$\mathbf{A}_{2} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L} + R_{D}}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix}$$
(4-11)
$$\mathbf{B}_{2} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$
(4-12)

Die Ausgangsmatrix *C* ist:

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4-13}$$

Das Verfahren des "State-Space Averaging" besagt, dass System- und Steuermatrizen für beide Schaltzustände entsprechend der durch das Tastverhältnis d definierten Einschalt- und Ausschaltzeiten von Schalter  $S_2$  gemittelt werden können.

$$d = \frac{T_{ein}}{T_{ein} + T_{aus}}$$
(4-14)

Voraussetzung hierfür ist, dass die Schaltfrequenz  $f_s$  weit über der Eigenfrequenz  $f_0$  des betrachteten Systems liegt. Die Eigenfrequenz  $f_0$  des untersuchten DC/DC-Wandlers kann über die Parameter der verwendeten Kapazität (C=10mF) und der Induktivität (L=10.4µH) abgeschätzt werden:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 493.5Hz$$
 (4-15)

Die Eigenfrequenz  $f_0$  liegt also weit unter der Schaltfrequenz  $f_s$  von 50kHz. Die Mittelung der System- und Steuermatrizen ist durchführbar und ergibt:

$\mathbf{A} = \mathbf{A_1}d + \mathbf{A_2}(1 - d)$			
$\mathbf{B} = \mathbf{B_1}d + \mathbf{B_2}(1 - d)$			
$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L} + R_{D}(1-d)}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{LC} \begin{bmatrix} -R_{L}C - R_{D}C(1-d) & -C \\ L & 0 \end{bmatrix}$	(4-18)		
$\mathbf{B} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} d & -(1-d) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	(4-19)		

Die gemittelte Zustandsraumdarstellung kann wieder in Form von Differentialgleichungen geschrieben werden:

$$\frac{di_{L}}{dt} = \frac{1}{L} (-R_{L}i_{L} - (1-d) \cdot R_{D}i_{L} - u_{C} + d \cdot u_{E} - (1-d) \cdot u_{F_{D}})$$
(4-20)  
$$\frac{du_{C}}{dt} = \frac{1}{C}i_{L}$$
(4-21)

Abbildung 12 zeigt die Implementierung des gemittelten Modells des Tiefsetzstellers unter Matlab/Simulink.



Abbildung 12: Matlab/Simulink-Implementierung des Tiefsetzsteller-Modells

Das Modell ist nichtlinear, da das Tastverhältnis *d* multiplikativ mit der Eingangsspannung  $u_E$  bzw. mit dem Spulenstrom  $i_L$  verknüpft ist. Für eine weitere analytische Behandlung und für die Beschreibung des Kleinsignalverhaltens kann das nichtlineare Modell auch in einem Arbeitspunkt linearisiert werden. Für eine umfangreiche Darstellung des Vorgehens bei der Linearisierung sowie für die Modelle des Hochsetzstellers mit und ohne Eingangsfilter sei auf [Boc10\_1] verwiesen. Das Modell des gekoppelten DC/DC-Wandlersystems geht direkt von dem vorgestellten nichtlinearen Wandlermodell aus.

#### 4.3.2 Modell für gekoppeltes DC/DC-Wandlersystem und Primärregelung

In Abbildung 13 ist die Struktur des im Projekt aufgebauten und untersuchten DC/DC-Wandlersystems dargestellt. Direktspeicher und Brennstoffzelle sind über einen Tiefsetz- und Hochsetzsteller (DC/DC-Wandler1) bzw. einen Tiefsetzsteller (DC/DC-Wandler2) mit der gemeinsamen Buskapazität  $C_{Bus}$  gekoppelt, an der sich die Busspannung  $u_{Bus}$  aufbaut. Über die Veränderung der Tastverhältnisse  $d_{11}$ ,  $d_{21}$ , und  $d_{12}$  der Schalter  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , und  $S_{12}$  (jeweils Schalter und Freilaufdiode) können die Leistungsflüsse zwischen Brennstoffzelle, Direktspeicher und Last geregelt werden.



Abbildung 13: Primärregelstrecke – Wandlersystem mit zwei DC/DC-Wandlern

Ziel dieser so genannten **Primärregelung** ist zum einen die Konstanthaltung der Busspannung  $u_{Bus}$  und zum anderen die Ausregelung des Brennstoffzellenstroms  $i_{BZ}$  auf einen von der übergeordneten Sekundärregelung vorgegebenen Sollwert i<sub>BZSoll</sub>. Als Hauptstörgröße wirkt der veränderliche Laststrom i<sub>Last</sub>, der die Buskapazität unterschiedlich stark entlädt. Busspannungsregler PR1 muss die Veränderung des Ladezustands der Buskapazität C<sub>Bus</sub> und damit der Busspannung  $u_{Bus}$  erfassen. Bei einer Busspannung größer als der Sollwert (z.B. 24 V) wird DC/DC-Wandlers1 als Hochsetzsteller betrieben und über die Steuerung von Schalter  $S_{21}$  mit dem Tastverhältnis  $d_{21}$  Energie von der Buskapazität in den Direktspeicher übertragen. Umgekehrt muss Regler PR1 bei einer Busspannung geringer als der Sollwert Energie aus dem Direktspeicher in die Buskapazität transferieren. Dazu wird DC/DC-Wandler1 als Tiefsetzsteller betrieben und Schalter  $S_{11}$  über das Tastverhältnis  $d_{11}$  angesteuert. DC/DC-Wandler2 wird nur unidirektional als Tiefsetzsteller betrieben. Je nach Ist- und Sollwert des Brennstoffzellenstroms  $i_{BZ}$  steuert Regler *PR2* das Tastverhältnis  $d_{12}$  von Schalter  $S_{12}$ .

Für die Herleitung des Übertragungsverhaltens der vereinfachten Regelstrecke wurde (wie in Kapitel 3.4 für den Einzelwandler) das Prinzip des "State-Space Averaging" angewendet (s. [Cuk76], [Vor90], [Him91], [Oliv06], [Boc06]). Dazu wurden zunächst für beide Wandler und alle Schaltzustände die in Abbildung 13 aufgeführten Differentialgleichungen aufgestellt. Diese beschreiben das geschaltete Wandlersystem unter folgenden Voraussetzungen bzw. Vereinfachungen:

- nicht-lückender Betrieb
- Schaltfrequenz wesentlich höher als Eigenfrequenz des Wandlers
- Annahme idealer Schalter und idealer Freilaufdioden ohne Verluste

- Vernachlässigung von Leitungsinduktivitäten und -widerständen
- Nichtberücksichtigung der Schaltvorgänge beim "aktiven Kommutieren"

DS-Tiefsetzsteller: S <sub>11</sub> =ein, S <sub>21</sub> =aus	DS-Tiefsetzsteller: S <sub>11</sub> =aus, S <sub>21</sub> =	aus		
$\frac{di_{DSB1}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( u_{DS} - u_{Bus} - R_1 \cdot i_{DSB1} \right)$	(4-22)	$\frac{di_{DSB0}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( -u_{Bus} - R_1 \cdot i_{DSB0} \right)$	(4-23)	
DS-Hochsetzsteller: S <sub>21</sub> =aus, S <sub>11</sub> =aus	DS-Hochsetzsteller: S <sub>21</sub> =ein, S <sub>11</sub> =aus			
$\frac{di_{DSB0}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( u_{DS} - u_{Bus} - R_1 \cdot i_{DSB0} \right)$	(4-24)	$\frac{di_{DSB1}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( -u_{Bus} - R_1 \cdot i_{DSB1} \right)$	(4-25)	
BZ-Tiefsetzsteller: S <sub>12</sub> =ein, S <sub>22</sub> =aus	BZ-Tiefsetzsteller: S <sub>12</sub> =aus, S <sub>22</sub> =	aus		
$\frac{di_{BZB1}}{dt} = \frac{1}{L_2} \left( u_{BZ} - u_{Bus} - R_2 \cdot i_{BZB1} \right)$	(4-26)	$\frac{di_{BZB0}}{dt} = \frac{1}{L_2} \left( -u_{Bus} - R_2 \cdot i_{BZB0} \right)$	(4-27)	

#### Tabelle 3: Differentialgleichungen zur Beschreibung des DC/DC-Wandlersystems

Tabelle 3 gibt die resultierenden gemittelten Differentialgleichungen an, wie sie sich nach Anwendung des "State-Space Averaging" ergeben.

Tabelle 4: Differentialg	leichungen zur	Beschreibung des	DC/DC-Wandlers	ystems
--------------------------	----------------	------------------	----------------	--------

Gemitteltes Modell DS-Tiefsetzsteller:	
$\frac{di_{DSB}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( d_{11} \cdot u_{DS} - u_{Bus} - R_1 \cdot i_{DSB} \right)$	(4-28)
$u_{DS} = f(i_{DS})$ mit $i_{DS} = d_{11} \cdot i_{DSB}$	(4-29)
Gemitteltes Modell DS-Hochsetzsteller:	
$\frac{di_{DSB}}{dt} = \frac{1}{L_1} \left( (1 - d_{21}) \cdot u_{DS} - u_{Bus} - R_1 \cdot i_{DSB} \right)$	(4-30)
$u_{DS} = f(i_{DS})$ mit $i_{DS} = (1 - d_{21}) \cdot i_{DSB}$	(4-31)
Gemitteltes Modell BZ-Tiefsetzsteller:	
$\frac{di_{BZB}}{dt} = \frac{1}{L_2} \left( d_{12} \cdot u_{BZ} - u_{Bus} - R_2 \cdot i_{BZB} \right)$	(4-32)
$u_{\scriptscriptstyle BZ} = f(i_{\scriptscriptstyle BZ})$ mit $i_{\scriptscriptstyle BZ} = d_{\scriptscriptstyle 12} \cdot i_{\scriptscriptstyle BZB}$	(4-33)
Busspannungsbildung an der Kapazität C <sub>Bus</sub> :	
$\frac{du_{Bus}}{dt} = \frac{1}{C_{Bus}} \left( i_{DSB} + i_{BZB} - i_{Last} \right)$	(4-34)



Abbildung 14: Matlab/Simulink-Simulationsmodell des DC/DC-Wandlersystems

Es ergibt sich eine Beschreibungsform einer typischen Mehrgrößenregelstrecke mit drei Steuergrößen  $d_{11}$ ,  $d_{21}$ , und  $d_{12}$  und zwei Regelgrößen  $u_{Bus}$  und  $i_{BZ}$ . Die Analyse der Teilregelstrecken für Busspannung und Brennstoffzellenstrom ergibt nur eine schwache Kopplung, der Ansatz mit zwei unabhängigen Reglern *PR1* und *PR2* ist daher gerechtfertigt. Die Differentialgleichungen der Regelstrecke wurden unter Matlab/Simulink implementiert (s. Abbildung 14 und mit den beiden Reglern *PR1* und *PR2* zum Gesamtmodell der Primärregelung verknüpft (s. Abbildung 15). Für die Regler wurde jeweils ein PI-Ansatz gewählt. Aufgrund der multiplikativen Verknüpfung von Stellgröße  $d_{12}$  und Brennstoffzellenstrom am Bus  $i_{BZB}$  sowie des nichtlinearen Einflusses der Brennstoffzellenspannung  $u_{BZ}$  ergibt sich insgesamt ein nichtlineares Modell (s. Gleichung (4-33)).

Für den Busspannungsregler PR1 wurden unterschiedliche Strukturansätze untersucht:

- a) zwei separate PI-Regler f
  ür jede Energieflussrichtung (Hochsetzsteller zum Transfer von Energie von der Buskapazit
  ät in den Direktspeicher, Tiefsetzsteller f
  ür die umgekehrte Richtung)
- b) "100%-Regelung", Ansteuerung der Schalter  $S_{11}$  und  $S_{21}$  mit genau invertiertem Tastverhältnis  $d_{11}=d$  und  $d_{21}=1-d$

Vorteile:

• hoher Wirkungsgrad bei mittleren Strömen, da keine Diodenverluste im Freilaufzweig auftreten

 kontinuierliche Regelung, da nur eine Stellgröße *d* auftritt, die ohne Reglerumschaltung (Nichtlinearität) berechnet werden kann

Nachteile:

- höhere Verluste für kleine Ströme (Hier kommt es im Freilaufzweig u.U. zur Änderung der Stromrichtung und zum Pendeln von Energie zwischen Eingangsund Ausgangskapazität mit den bekannten Leitverlusten in den Schaltern und im Drosselwiderstand.)
- c) ein PI-Regler und Vergleich der Stellgröße mit einem Schwellwert, Wahl der entsprechenden Wandlungsrichtung (Hochsetz- oder Tiefsetzbetrieb), Ausgabe des berechneten Tastverhältnisses

Im aktuellen Experimentiersystem und den beiden realisierten Hybridstromversorgungseinheiten wurde Variante b) eingesetzt, da sie die besten Regeleigenschaften aufweist. Variante a) mit zwei separaten PI-Reglern wurde ebenfalls erfolgreich getestet.

Abbildung 15 zeigt die komplette Struktur der Primärregelung mit Regelstrecke (gelb) sowie dem Busspannungs- und dem Brennstoffzellenstromregler. Der Busspannungsregler wurde in Variante b), als "100%-Regelung", realisiert.



#### Abbildung 15: Matlab/Simulink-Implementierung der Primärregelung mit Busspannungsregler und Brennstoffzellenstromregler

#### 4.3.3 Simulationsuntersuchungen

Abbildung 16 zeigt die Simulationsergebnisse für nicht optimal eingestellte Reglerparameter. In Abbildung 16c) erkennt man deutlich eine der Busspannung überlagerte Dauerschwingung. Abbildung 16b) zeigt eine ebenfalls unerwünschte bleibende Regelabweichung des Brennstoffzellenstroms vom geforderten rampenförmigen Führungsgrößenverlauf. Abbildung 16a) zeigt einen zunächst konstanten, dann sinusförmig veränderlichen Laststrom (blau). Dieser wird anteilig durch die Brennstoffzelle (grün) und den Direktspeicher (rot) abgedeckt. Für eine verbesserte Auslegung der Regler *PR1* und *PR2* (jeweils in PI-Struktur) wurde das Einstellverfahren für Mehrgrößenregelstrecken nach Niederlinski genutzt. Dabei wurden auf der Basis des Simulationsmodells für beide Regler zunächst die kritischen P-Verstärkungen an der Stabilitätsgrenze und die zugehörige Periodendauer der Dauerschwingung ermittelt. Die kritischen Verstärkungen von Regler *PR1* und *PR2* an der Stabilitätsgrenze wurden zu  $K_{Pkrit}=0.5V^1$  und  $K_{PBZkrit}=5A^{-1}$  ermittelt. Die Periodendauer an der Stabilitätsgrenze bestimmte sich zu  $T_{krit}=1s$ . Damit ergeben sich nach den Einstellregeln von Niederlinski ein  $K_p=0.2*K_{Pkrit}=0.1V^1$  und ein  $K_{PBZ}=0.2*K_{PBZkrit}=1A^{-1}$ . Die Nachstellzeit der PI-Regler ergibt sich zu  $T_n=0.85*T_{krit}=0.85s$ . Somit folgt für *PR1*: $K_I=K_P/T_n=0.12V^{-1}s^{-1}$  und für *PR2*: $K_{IBZ}=K_{PBZ}/T_n=1.2A^{-1}s^{-1}$ .



Abbildung 16: suboptimale Einstellung der Primärregelung mit Dauerschwingung und bleibender Regelabweichung [KP=0.5V-1, KI=0.5V-1s-1, KPBZ=0.1A-1, KIBZ=0.01A-1s-1]

Abbildung 17 zeigt die Simulationsergebnisse für die verbesserten Reglerparameter. Abbildung 17b) zeigt den Brennstoffzellenstrom, wie er rampenförmig ansteigt und dabei ideal dem Sollwertverlauf folgt. Der Sollwert wird durch die Sekundärregelung vorgegeben. Es treten keine Rückwirkungen der dynamischen Schwankungen des Laststroms auf den Brennstoffzellenstrom auf. Abbildung 17c) demonstriert eine sehr gute Ausregelung der Busspannung auf den geforderten Sollwert von 24 V. Die verbleibenden minimalen Schwingungen sind normal, verursacht durch die schwankende Lastleistung. Die Regelung ist stabil.



Abbildung 17: optimale Einstellung der Primärregelung nach Niederlinski [KP=0.1V-1, KI=0.12V-1s-1, KPBZ=1A-1, KIBZ=1.2A-1s-1]

Abbildung 18 zeigt ein ebenso gutes Verhalten der nach Niederlinski ausgelegten Primärregelung für ein reales Lastprofil. Auch hier wird der Brennstoffzellenstrom nicht durch die dynamischen Lastschwankungen beeinträchtigt und folgt dem vorgegebenen Führungsgrößenverlauf ideal. Auch die Busspannung bleibt in einem engen Toleranzband um den geforderten Sollwert von 24 V.



Abbildung 18: ausgezeichnete Unterdrückung der Auswirkung realer Lastschwankungen auf den Brennstoffzellenstrom bei gleichzeitig stabiler Ausregelung der Busspannung

Abbildung 19 zeigt schließlich noch die positiven Regeleigenschaften im Bezug auf das Führungsverhalten für einen langsam veränderlichen sinusförmigen Sollwertverlauf des Brennstoffzellenstroms (z.B. als Testsignal für die Zustandsdiagnose).



Abbildung 19: gutes Folgeverhalten bei Testsignalgenerierung

Aufgrund der relativ großen Buskapazität (ca. 10mF) des gekoppelten DC/DC-Wandlersystems ändert sich bei dynamischen Schwankungen des Laststroms die Busspannung nur recht langsam. Der Laststrom hingegen enthält unverzögerte Information über die Änderung der Leistungsflüsse. Eine Möglichkeit zur weiteren Verbesserung der Ausregelgenauigkeit und geschwindigkeit der Busspannung besteht in der anteiligen Aufschaltung des Laststroms auf den Ausgang des Busspannungsreglers (Störgrößenaufschaltung).

#### 4.4 "FC-Hybrid-Control"-Einheit und Hybridsystem-Versuchsstand

Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die an der TU Chemnitz entwickelte Brennstoffzelle-Superkondensator-Hybridstromversorgung auch "FC-Hybrid-Control"-Einheit genannt. Diese wurde in einem 19'-Gehäuse aufbaut, der Superkondensator-Speicher wurde dabei direkt in das Gerät integriert, jedoch können auch externe Direktspeicher angeschlossen werden.



Abbildung 20: "FC-Hybrid-Control"-Einheit zur komfortablen Testung unterschiedlicher Brennstoffzellen-Hybridsysteme und Energiemanagementverfahren [Boc10\_1]



Abbildung 21: DC/DC-Wandlersystem und weitere Baugruppen der "FC-Hybrid-Control"-Einheit

Abbildung 22 zeigt ein Foto und Abbildung 23 das Schema des kompletten Hybridsystem-Versuchsstands inklusive einer programmierbaren elektronischen Last (zur Lastprofilnachbildung), einem Wasserstoff-Metallhydridspeicher und -durchflussmesser, der ZBT-Brennstoffzelle sowie dem Energiemanagement-PC.



Abbildung 22: Versuchsstand mit "FC-Hybrid-Control"-Einheit an der TU Chemnitz [Boc10\_2]

Der Aufbau und die Testung beider "FC-Hybrid-Control"-Einheiten an der TU Chemnitz nahm relativ viel Zeit in Anspruch, insbesondere deswegen, weil ausgehend von Vorarbeiten zum DC/DC-Wandler wesentliche elektronische Baugruppen (Stromerfassung, Regler- und Treiberplatinen, etc.) neu entwickelt bzw. wesentlich erweitert und überarbeitet werden mussten. Die "FC-Hybrid-Control"-Einheit konnte zum zweiten Projektausschusstreffen im Dezember 2009 erfolgreich vorgestellt werden. Sie stellt eine einfach zu bedienende Hybridstromversorgung mit integrierter Prozessschnittstelle dar. Alle Mess- und Stellgrößen können über eine USB-Schnittstelle durch den Energiemanagement-PC erfasst bzw. "FC-Hybrid-Control"-Einheit vorgegeben werden. Die eignet sich besonders als Experimentiersystem für Forschung und Entwicklung von Brennstoffzellen-Hybridsystemen. Leicht können sowohl unterschiedliche Hybridsystem-Konfigurationen (verschiedene externe Superkondensator- oder Batteriespeicher-Einheiten) als auch Brennstoffzellen. unterschiedliche Betriebsführungs- und Energiemanagement-Konzepte experimentell gestestet, untersucht und demonstriert werden.



Abbildung 23: Schema des Versuchsaufbaus [Pau11]

# **5** Optimierendes Energiemanagement

### 5.1 Gesamtkonzept

Das optimierende Energiemanagement-Verfahren basiert auf der in [Boc10\_1] entwickelten und in Abbildung 24 dargestellten dreistufigen hierarchischen Regelungsstruktur.



#### Abbildung 24: Stufen des Energiemanagement-Verfahrens

Die **Primärregelung** dient zum einen der Ausregelung der Busspannung durch den DC/DC-Wandler des Direktspeichers. Damit werden dynamische Erzeuger- und Verbraucherschwankungen durch den Direktspeicher abgedeckt, von der Brennstoffzelle fern gehalten und die Versorgungssicherheit am Energiebus gewährleistet. Zum anderen wird durch den DC/DC-Wandler der Brennstoffzelle der Brennstoffzellenstrom auf einen von der Sekundärregelung vorgegebenen Sollwert ausgeregelt.

Die Sekundärregelung dient der aktiven Beschränkung des Leistungs- bzw. Stromgradienten und des Arbeitsbereichs der Brennstoffzelle. Weiterhin übernimmt die Sekundärregelung die Lastfolgeregelung. Laderegelung des Direktspeichers und die Die Reglerund Begrenzungsparameter der Sekundärregelung werden durch die übergeordnete Systembetriebsführung vorgegeben und adaptiert.

Die **Systembetriebsführung** hat die Funktion der Bewertung und Optimierung der Leistungsflussaufteilung auf der Basis vorgegebener Gütekriterien (z.B. Minimierung des Wasserstoffverbrauchs und Minimierung der Brennstoffzellen-Beanspruchung), und eines mathematischen Suchverfahrens sowie eines Adaptionsalgorithmus für die Bestimmung optimaler Sekundärregelungsparameter.

#### 5.2 Sekundärregelung

Die Sekundärregelung verfolgt vier Zielstellungen, welche die Lösung der auf Systembetriebsführungsebene dargestellten Optimierungsaufgabe unterstützen. Dies sind:

- die Lastfolgeregelung bzw. Nachführung der Brennstoffzelle nach der Lastleistung (erhöht die Direktnutzung der Primärenergie und vermeidet Wandlungsverluste durch häufige Umladung des Direktspeichers)
- die Laderegelung des Direktspeichers (reduziert die erforderliche Direktspeicherkapazität, garantiert die Einhaltung der Ladegrenzen und damit der Versorgungssicherheit)
- die Beschränkung des maximalen Gradienten der Brennstoffzellenleistung (führt zur Reduzierung der dynamischen Beanspruchung und zur Erhöhung der Lebensdauer der Brennstoffzelle)
- die Beschränkung des Arbeitsbereichs der Brennstoffzelle (erhöht die Wandlungseffizienz und die Ausnutzung des primären Energieträgers Wasserstoff)

Für den Entwurf der Struktur und für die Auslegung des Sekundärreglers wird ein Modell der Sekundärregelstrecke benötigt. Dieses Modell beschreibt die Leistungsflussaufteilung innerhalb der in Abbildung 25 dargestellten Hybridsystemstruktur. Bei jedem Energiewandlungsprozess innerhalb des Hybridsystems treten Verluste auf. Die der Brennstoffzelle zugeführte chemische Leistung des Wasserstoffs  $P_{chH2}$  wird nur teilweise in elektrische Brennstoffzellenleistung  $P_{BZ}$  umgesetzt.  $P_{BZ_V}$  fasst die entstehende Wärme und Wasserstoff-Purgeverluste zusammen. Die Wandlungsverluste in den beiden DC/DC-Wandlern werden mit  $P_{V_W1}$  und  $P_{V_W2}$  bezeichnet. Sie sind vor allem vom Strom und von der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung abhängig und werden durch das experimentell ermittelte Kennfeldmodell beschrieben. Beim Laden und Entladen des Direktspeichers treten Verluste auf, die durch  $P_{V_DS}$  beschrieben werden. Die Ladezustände des Direktspeichers und des Wasserstoffspeichers werden mit  $SOC_{DS}$  und  $SOC_{H2}$  bezeichnet. Die elektrischen Größen auf Komponentenseite werden, wie aus Abbildung 25 ersichtlich, mit  $P_{BZ}$ ,  $I_{BZ}$ ,  $U_{BZ}$  sowie  $P_{DS}$ ,  $I_{DS}$  und  $U_{DS}$  abgekürzt. Leistung und Strom auf Busseite werden mit einem zusätzlichem "B" im Index versehen ( $P_{BZB}$ ,  $I_{BZB}$  sowie  $P_{DSB}$  und  $I_{DSB}$ ).



#### Abbildung 25: erweiterte Grundstruktur des untersuchten Brennstoffzelle-Direktspeicher Hybridsystems

Abbildung 26 zeigt das Blockschaltbild der resultierenden Sekundäregelstrecke. Die Steuergröße zur Beeinflussung der Leistungsflussaufteilung ist der Brennstoffzellenstrom  $I_{BZ}$ . Störgröße ist die Lastleistung  $P_{Last}$ . Ausgangsgrößen sind die konsumierte chemische Leistung an Wasserstoff  $P_{chH2}$ , die Brennstoffzellenspannung  $U_{BZ}$ , die Brennstoffzellenleistung  $P_{BZ}$  und die Brennstoffzellenleistung am Bus  $P_{BZB}$ , der Ladezustand des Direktspeichers  $SOC_{DS}$  sowie die Spannung des Direktspeichers  $U_{DS}$ . Die Schnittstellen zur Primär-, Sekundärregelung und Systembetriebsführung sind mit (PR), (SR) und (SBF) abgekürzt.



Abbildung 26: Modell der Sekundärregelstrecke und der Leistungsflussverteilung

Die Gleichungen (5-1) bis (5-8) beschreiben die Zusammenhänge der Leistungsflussaufteilung im Hybridsystem und gehen dabei von den zuvor vorgestellten Modellen der Einzelkomponenten aus. Es gilt:

$$P_{BZ} = f(I_{BZ}), U_{BZ} = f(I_{BZ}), P_{chH2} = f(P_{BZ})$$
 (5-1)

Die Verlustleistung von DC/DC-Wandler2 (Brennstoffzelle) ergibt sich über das experimentell bestimmte Wirkungsgradkennfeld  $v_{DCDC2}$  zu:

$$P_{V_{W2}} = V_{DCDC2}(U_{BZ}, I_{BZ})$$
(5-2)

Somit errechnet sich die durch die Brennstoffzelle eingespeiste Busleistung P<sub>BZB</sub> zu:

$$P_{BZB} = P_{BZ} - P_{V_{w2}}$$
(5-3)

Die Direktspeicherleistung  $P_{DSB}$  am Energiebus ergibt sich zu:

$P_{DSB} = -P_{Last} + P_{BZB}$	(5-4)
$P_{Last} = P_{EB} - P_{EA}$	(5-5)

Dabei wird der Energietransfer vom Bus in den Direktspeicher positiv und vom Direktspeicher zum Bus negativ gezählt. Die Lade- bzw. Entladeleistung des Direktspeichers  $P_{DS}$  ermittelt sich zu:

$$P_{DS} = P_{DSB} - P_{VW1} \text{ mit } P_{DS} = U_{DS} \cdot I_{DS}$$
 (5-6)

Über das Verlustleistungskennfeld  $v_{DCDC1}$  von DC/DC-Wandler1 ergibt sich:

$$P_{V_W1} = V_{DCDC1}(U_{DS}, P_{DSB})$$

(5-7)

Verluste, Klemmenspannung und Ladezustand des Direktspeichers ergeben über die vorgestellten Modelle:

$$U_{DS} = f(SOC_{DS}, I_{DS})$$

$$P_{V_{DS}} = \eta_{DS}(SOC_{DS}, I_{DS}) \cdot |P_{DS}|$$

$$SOC_{DS}(t) = \int_{0}^{t} P_{DS} - P_{V_{DS}} d\tau$$
(5-8)

Abbildung 27 zeigt die entwickelte Struktur des Sekundärreglers (s. auch [Boc10\_1]). Es handelt sich um einen nichtlinearen Mehrgrößenregler. Dieser besteht aus zwei separaten Eingrößenreglern, dem Laderegler  $K_{LR}$  für den Ladezustand des Direktspeichers  $SOC_{DS}$  als Regelgröße und dem Lastfolgeregler  $K_{FR}$  für die Brennstoffzellenleistung am Bus  $P_{BZB}$  als Regelgröße.



Abbildung 27: Wechselspiel von Primär- und Sekundärregelung

Ausgangspunkt für die Sekundärregelung bildet das online gemessene Profil der Lastleistung  $P_{Last}$ . Der Lastfolgeregler  $G_{FR}$  verfolgt das Ziel der Nachführung und Angleichung der Brennstoffzellenleistung am Bus  $P_{BZB}$  an das dynamische Lastprofil  $P_{Last}$ . Ziel ist die möglichst direkte Nutzung der Primärenergie von der Brennstoffzelle durch die Last ohne Doppeltwandlung und ohne Speicherverluste. Der Laderegler  $G_{IR}$  hat zum Ziel, die minimale und maximale Ladezustandsgrenze für den Direktspeicher sicher einzuhalten und den Direktspeicher auf einen gewünschten und durch die Systembetriebsführung einstellbaren Sollwert für den Ladezustand SOC<sub>DSSoll</sub> zu regeln. Damit werden die Ausregelung der Busspannung und die Versorgungssicherheit für beliebige dynamische Lastprofile gewährleistet. Die Regelziele stehen teilweise im Widerspruch zueinander. Beide Reglerausgänge sind über eine Differenzbildung zusammengeführt und wirken auf eine gemeinsame Stellgröße (Kompromissbildung), welche die Änderung der aktuellen Brennstoffzellenleistung  $dP_{BZ^2}/dt$  repräsentiert. Ein erster **Begrenzungsblock** ermöglicht die explizite Limitierung des Leistungsgradienten der Brennstoffzelle, auf ein einstellbares Maximum  $dP_{BZmax}/dt$ . Der folgende Integrations-Block bestimmt daraus in jedem Zeitschritt die neue Brennstoffzellenleistung. Diese wird über einen zweiten Begrenzungsblock auf den gewünschten optimalen Arbeitsbereich der Brennstoffzelle P<sub>BZmin</sub> bis P<sub>BZmax</sub> begrenzt. Beide Parameter werden, ebenso wie  $dP_{BZmax}/dt$ , durch die Systembetriebsführung vorgegeben und optimal nachgeführt. Die berechnete neue Brennstoffzellenleistung P<sub>BZ</sub> wird über eine experimentell ermittelte Kennlinie in den zugehörigen Brennstoffzellenstrom IBZSoll umgerechnet und schließlich der Primärregelung als Sollwert übergeben.

Da sich die Streckenzeitkonstanten von Primär- und Sekundärregelung um mehr als den Faktor 10 unterscheiden, kann davon ausgegangen werden, dass für die Sekundärregelung der gewünschte Brennstoffzellenstrom-Sollwert  $I_{BZSoll}$  nahezu sofort durch die Primärregelung realisiert wird.  $I_{BZSoll}$  ist somit identisch dem in Abbildung 26 dargestellten Brennstoffzellenstrom  $I_{BZ}$  am Eingang der Sekundärregelstrecke.

Lastfolgeregler und Laderegler sind aktuell als P-Regler ausgeführt. Die Reglerparameter (P-Verstärkung) des Lastfolgereglers  $K_{FR}$  und des Ladereglers  $K_{LR}$  wurden anhand von Simulationsuntersuchungen bestimmt. Sie haben großen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften der Sekundärregelung und damit letztlich auch auf die von der Systembetriebsführung optimierten Gütekriterien.

#### 5.3 Systembetriebsführung

Die Aufgabe der Systembetriebsführung besteht in der Bewertung der durch die Sekundärregelung realisierten Leistungsflussaufteilung für ein gewisses Zeitfenster T auf der Basis folgender Gütekriterien (s. [Boc10\_1]):

- Verbrauchsreduzierung an Wasserstoff VR
- dynamische Entlastung der Brennstoffzelle DE
- benötigte Direktspeicherkapazität SK


#### Abbildung 28: Grundprinzip der Systembetriebsführung, Bewertung der Leistungsflussaufteilung anhand der Gütekriterien Verbrauchsreduzierung VR, dynamische Brennstoffzellenentlastung DE, und maximal benötigte Direktspeicherkapazität SK

Ziel ist die Bestimmung eines im Bezug auf das Erreichen dieser Gütekriterien günstigen Parametervektors  $v_{sR}$  für die Sekundärregelung. Es gilt:

$$\mathbf{v}_{SR} = [dP_{BZ\max}, K_{FR}, K_{LR}, P_{BZ\min}, P_{BZ\max}]$$
(5-9)

Die aufgeführten Gütekriterien können auf der Basis der gemessenen bzw. simulierten Verläufe der Messwerte der Lastleistung  $P_{Last}(t)$ , der Brennstoffzellenleistung  $P_{BZ}(t)$  und des Ladezustands des Direktspeichers  $SOC_{DS}(t)$  bestimmt werden.

Die **Reduzierung des Wasserstoffverbrauchs** *VR* im Vergleich zu einer Energieversorgung ohne Direktspeicher wird über dem Zeitfenster *T* wie folgt ermittelt:

$$VR = 100\% \cdot \frac{VO - V}{V}$$

$$VO = \int_{0}^{T} P_{chH2^{*}}(P_{Last}(t)) dt , V = \int_{0}^{T} P_{chH2}(P_{BZ}(t)) dt - SOC_{DS}(T) + SOC_{DS}(0)$$
(5-11)

Dabei stellt *VO* den Wasserstoffverbrauch ohne und *V* den Wasserstoffverbrauch mit Direktspeicher dar.  $P_{chH2}$  repräsentiert Verbrauchskennlinie der Brennstoffzelle.  $P_{chH2*}$ berücksichtigt eine etwaige Skalierung der Brennstoffzellen-Verbrauchskennlinie für das System ohne Direktspeicher. Hierbei ist die Brennstoffzelle für die maximale Lastleistung auszulegen.

Die **dynamische Brennstoffzellen-Entlastung** *DE* wird im Vergleich zu einer Energieversorgung ohne Direktspeicher als Verhältnis der Integrale der quadrierten Gradienten der Brennstoffzellenleistung  $P_{BZ}$  und der Lastleistung  $P_{Last}$  definiert:

$$DE = 100\% \cdot \left( 1 - \frac{\int_{0}^{T} \left(\frac{dP_{BZ}}{dt}\right)^{2} dt}{\int_{0}^{T} \left(\frac{dP_{Last}}{dt}\right)^{2} dt} \right)$$
(5-12)

Der Kennwert für die **maximal benötigte Direktspeicherkapazität** *SK* bestimmt sich aus der Differenz des maximalen und des minimalen Ladezustands des Direktspeichers im Zeitintervall *T*:

$SK = \max(SOC_{DS}(t)) - \min(SOC_{DS}(t))$	(5-13)
	(0-10)

Die Minimierung der benötigten Direktspeicherkapazität ist aus folgenden Gründen wünschenswert:

- Reduzierung der Kosten für den Direktspeicher bei der Auslegung des Hybridsystems
- Erhöhung der Lebensdauer durch eine weniger starke Ladung bzw. Entladung

#### 5.4 Brennstoffzellen-Modell für das Energiemanagement

Grundlage für das Energiemanagement-Verfahren bildeten vereinfachte modellgestützte Beschreibungen des Brennstoffzellen-Verhaltens. Dazu wurden zahlreiche experimentelle Untersuchungen an der TU Chemnitz durchgeführt und die Spannung-Strom-, chemische Leistung-Stackleistungs- sowie Wirkungsgrad-Stackleistungs-Kennlinie ermittelt und über mathematische Modellansätze beschrieben. Die Spannung-Strom-Kennlinie definierte die Basis für die Auslegung des DC/DC-Wandlers. Weiterhin stellt der nichtlineare Verlauf dieser Kennlinie eine Störgröße für die Stromregelung des DC/DC-Wandlers dar, welche im Rahmen des Simulationsmodells für die Primärregelung berücksichtigt wird. Auch die Verluste des DC/DC-Wandlers sind jeweils von Eingangsspannung und -strom und somit vom Arbeitspunkt der Brennstoffzelle abhängig.

#### 5.4.1 Spannung-Strom-Kennlinie

Die Abhängigkeit der Brennstoffzellenspannung  $U_{BZ}$  vom Brennstoffzellenstrom  $I_{BZ}$  kann durch folgenden empirischen Funktionsansatz beschrieben werden [Boc10\_1]:

$$U_{BZ}(I_{BZ}) = \frac{k_1}{I_{BZ} + k_2} + k_3 + k_4 I_{BZ} + k_5 I_{BZ}^2$$
(5-14)

Die Parameter  $k_1$  bis  $k_5$  können auf der Basis von Messwerten über ein Schätzverfahren bestimmt werden. Der gewählte Funktionsansatz ermöglicht ein gutes Konvergenzverhalten für das Schätzverfahren.

Tabelle 5 zeigt die ermittelten Parameter. Die Spannung-Strom-Kennlinie wurde mit einer Stromänderungsgeschwindigkeit von ±1A/s durchfahren. Abbildung 29 zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Messwerten (blau) und Modell (rot).

Tabelle 5: geschätzte Modellparameter für ZBT-Brennstoffzelle

$k_1$ in VA	k <sub>2</sub> in A	$k_3$ in V	k₄ in V/A	$k_5$ in V/A <sup>2</sup>
17.319	4.0371	31.49	-0.27249	-0.000462



Abbildung 29: Spannung-Strom-Kennlinie der ZBT-Brennstoffzelle (blau: Messung, rot: Modell)

Die Parameter  $k_1$  bis  $k_5$  können wie folgt interpretiert werden:

- k<sub>1</sub> und k<sub>2</sub> repräsentieren Aktivierungsverluste
- $k_3$  definiert als Verschiebung gemeinsam mit  $k_1$  und  $k_2$  die Leerlaufspannung
- k<sub>4</sub> beschreibt den Ohmschen Spannungsabfall
- $k_5$  ist ein quadratischer Korrekturterm

#### 5.4.2 Wasserstoffverbrauch

Die Beurteilung der Wandlungseffizienz der Brennstoffzelle erfolgt zweckmäßigerweise auf der Basis der verbrauchten Wasserstoffmenge. Abbildung 30 zeigt eine Darstellung der gemessenen (blau) und modellierten (rot) chemischen Leistung  $P_{chH2}$  in Abhängigkeit der elektrischen Brennstoffzellen-Stackleistung  $P_{BZ}$ .



Abbildung 30: chemische Leistung-Stackleistung-Kennlinie

Die chemische Leistung wurde dabei auf der Basis des gemessenen zugeführten Wasserstoffmassestroms und des unteren Heizwerts von Wasserstoff (3 Wh/Normliter) berechnet. Die vereinzelt auftretenden Ausreißer und Spitzen in der chemischen Leistung repräsentieren die zusätzlichen Verluste während des Purgens (kurzzeitiges Abblasen von Verunreinigungen, Wasser und Restwasserstoff). Zugeführte chemische Leistung und an den Klemmen des Brennstoffzellen-Systems zur Verfügung stehende elektrische Leistung  $P_{BZS}$  (Stackleistung abzüglich Peripherieleistung) können für das Energiemanagement über Polynomansätze dritter Ordnung modelliert werden:

$$P_{ch}(P_{BZ}) = p_1 + p_2 P_{BZ} + p_3 P_{BZ}^{2} + p_4 P_{BZ}^{3}$$

$$P_{BZS}(P_{BZ}) = q_1 + q_2 P_{BZ} + q_3 P_{BZ}^{2} + q_4 P_{BZ}^{3}$$
(5-16)

<i>p</i> ₄ in 1/W²	<i>p</i> ₃ in 1/W	<b>p</b> 2	p₁ in W
4.51*10 <sup>-2</sup>	0.00105	1.23	6.48
<i>q</i> ₄ in 1/W²	<i>q</i> ₃ in 1/W	<b>q</b> <sub>2</sub>	<i>q</i> ₁ in W

Tabelle 6: Geschätzte Parameter für das Wasserstoffverbrauchsmodell

#### 5.4.3 Systemwirkungsgrad

Eine weitere Kenngröße ist der Brennstoffzellen-System-Wirkungsgrad  $\eta_{FC}$  unter Berücksichtigung der Peripherieverluste (s. Abbildung 31):

$$\eta_{BZ}(P_{BZ}) = 100\% \cdot \frac{P_{BZS}(P_{BZ})}{P_{ch}(P_{BZ})}$$
(5-17)

Für einen Leistungsbereich von 140-530 W ist der Wirkungsgrad  $\eta_{BZ}$  größer 50 %. Das Wirkungsgradmaximum liegt bei ca. 285 W und 54 %. Der Wirkungsgrad ist kleiner 40 % für Stackleistungen kleiner 80 W. Abbildung 31 zeigt eine große Schwankungsbreite zwischen dem Wirkungsgradverlauf beim Hochfahren (unterer Ast) und Runterfahren der Brennstoffzelle (oberer Ast).



Abbildung 31: gemessener und approximierter Brennstoffzellen-System-Wirkungsgrad  $\eta_{BZ}$ 

Eine Konsequenz ist, dass sich der Wirkungsgrad nicht sonderlich gut zur Beurteilung der Performance der Brennstoffzelle für das Energiemanagement eignet. Hier ist eine integrale Größe, z.B. der Wasserstoffverbrauch über einem definierten Zeitfenster, die bessere Alternative.

# 5.5 Superkondensator-Modell für das Energiemanagement

Superkondensatoren oder auch Doppelschichtkondensatoren sind Kurzzeit-Energiespeicher, die auf dem physikalischen Prinzip der elektrochemischen Doppelschicht beruhen. Einen guten Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise geben die Veröffentlichungen [Lev63], [Burk00], [Gräs00] und [Nam03]. Ausführungen zu sinnvollen Anwendungsfeldern finden sich in [Burk00], [Mell00], [Nam03] und [Ash06].

#### 5.5.1 Wahl und Auslegung der Superkondensator-Einheit

Als Superkondensator-Einheit wurde das Modul BPAK0058 der Firma Maxwell gewählt. In den beiden Demonstratoren wurden drei bzw. vier Superkondensator-Module in Reihe geschaltet (s. Abbildung 32). Die resultierenden Kennwerte und Arbeitsbereiche sind in Tabelle 7 dargestellt.



Abbildung 32: Superkondensator-Einheit aus drei BPAK0058-Modulen

	drei Module	vier Module		
Gesamtkapazität	$C_{ges} = 58F / 3 = 19.3F$	$C_{ges} = 58F / 4 = 14.5F$		
Spannungsbereich	$U_2 = 45V$ , $U_1 = 26V$	$U_2 = 60V$ , $U_1 = 26V$		
nutzbarer Energieinhalt	$E = \frac{1}{2}C_{ges}(U_2^2 - U_1^2)$ ,	$E = \frac{1}{2}C_{ges}(U_2^2 - U_1^2),$		
	E = 13018Ws = 3.62Wh	E = 21199Ws = 5.89Wh		

Tabelle 7: Überblick zur	Auslegung	der Superkonde	ensator-Einheit

Die Superkondensator-Spannung wurde dabei so gewählt, dass sie stets über der Busspannung von 24 V liegt. Vorteile der Beschränkung des Spannungsbereichs der Superkondensator-Einheit sind:

- die Reduzierung des technischen Aufwands, der Kosten und der Verluste durch Vermeidung einer aktiven oder passiven Einzelzellsymmetrierung
- die Minimierung der Lade-/Entladeverluste durch Vermeidung kleiner Superkondensator-Spannungen und großer Superkondensator-Ströme
- die Minimierung der DC/DC-Wandlerverluste durch Wahl der Superkondensator-Spannung größer als die Busspannung (Vermeidung großer Spannungshübe bei großen Strömen)

#### 5.5.2 Modellansätze

In der Literatur sind sehr unterschiedliche Modellansätze zu finden (s. [Gräs00], [Spyk00], [Bull02], [Nam03], [Sur03], [Doug04], [Bull05]). Meist wird dabei der Superkondensator als Netzwerk eines oder mehrerer RC-Zweige beschrieben. Zubieta untersucht z.B. eine Ersatzschaltung mit drei Zeitkonstanten und zeigt eine geringfügig bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Messdaten [Zub00]. Die Bestimmung der Modellparameter ist jedoch sehr aufwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird von dem in Abbildung 33 dargestellten vereinfachten Modell ausgegangen.



Abbildung 33: Ersatzschaltbild des Superkondensators

Die Kapazität des Superkondensators wird durch die ideale Kapazität *C* beschrieben. Der Innenwiderstand  $R_i$  charakterisiert die beim Laden und Entladen auftretenden Verluste und den stromproportionalen Spannungsabfall zwischen der inneren Spannung  $u_{SC}$  und der Klemmenspannung  $u_{SC}$ . Der Innenwiderstand  $R_i$  bestimmt sich als Quotient der Spannungs- zur Stromänderung:

$$R_i = \frac{\Delta u_{sc}}{\Delta i_{sc}}$$
(5-18)

Die Kapazität *C* kann über die Bilanzierung der umgeladenen Energiemenge  $\Delta E$  beim Entladen bestimmt werden. Es gilt:

$$\Delta E = \frac{1}{2} C(u_{SCi}(t_1)^2 - u_{SCi}(t_2)^2)$$
(5-19)

Über die Bestimmung von  $\Delta E$  aus dem Integral der Momentanleistung ergibt sich:

$$C = \frac{2}{u_{SCi}(t_1)^2 - u_{SCi}(t_2)^2} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_{SCi}(t) i_{SC}(t) dt$$
 (5-20)

#### 5.5.3 Verluste und Wirkungsgrad

Die über die Klemmen zugeführte bzw. abgegebene Leistung  $p_{SC}$  bestimmt sich zu:

$$\rho_{sc} = u_{sc} i_{sc} \tag{5-21}$$

Die Verlustleistung  $p_V$  über dem Innenwiderstand  $R_i$  ist:

$$p_{v} = R_{i} i_{sc}^{2}$$
 (5-22)

Der Wirkungsgrad  $\eta_{sc}$  beim Laden bzw. Entladen mit dem Strom  $i_{sc}$  ergibt sich zu:

$$\eta_{sc} = 100\% \cdot \frac{p_{sc} - p_v}{p_{sc}} = 100\% \cdot \frac{u_{sc}i_{sc} - R_i i_{sc}^2}{u_{sc}i_{sc}} = 100\% - 100\% \cdot \frac{R_i i_{sc}}{u_{sc}}$$
(5-23)

#### 5.5.4 Ladezustand und innere Spannung

Der Ladezustand *SOC<sub>sc</sub>* der Superkondensator-Einheit ergibt sich zu:

$$SOC_{SC}(t) = \int_{0}^{t} (p_{SC} - p_{V}) d\tau = \int_{0}^{t} (u_{SC} i_{SC} - R_{i} i_{SC}^{2}) d\tau = \frac{1}{2} C u_{SCi}^{2}$$
(5-24)

Die zugehörige innere Spannung  $u_{SCi}$  ergibt sich zu:

$$u_{SCi} = \sqrt{\frac{2 \cdot SOC_{SC}(t)}{C}} = \frac{1}{C} \int_{0}^{t} i_{SC} d\tau$$
 (5-25)

#### 5.5.5 Klemmenspannung

Die Klemmenspannung  $u_{sc}$  der Superkondensator-Einheit berechnet sich zu:

$$u_{sc} = u_{sci} + R_i i_{sc} \tag{5-26}$$

# 5.6 Energiemanagement-Software

#### 5.6.1 Implementierung des Energiemanagement-Verfahrens

Zur Implementierung des dreistufigen Energiemanagement-Verfahrens [Boc10\_1] wurde die in Abbildung 34 dargestellte Softwarestruktur realisiert [Pau11]. Die viereckigen Blöcke beinhalten Funktionen. Für jeden Block ist ein Dateiordner vorhanden. Die grünen Blöcke sind Interrupt abhängige Funktionen, z.B. Timer-Callbacks, welche durch ihre jeweiligen Timer aufgerufen werden. Die blauen Blöcke beinhalten Funktionen, die durch andere Funktionen oder bei Bedarf auch direkt von der Matlab-Eingabekonsole aus aufgerufen werden können. Die Pfeile zeigen, welche Funktionsgruppe welche andere vorrangig aufruft. Die Zylinder stellen globale Strukturvariablen dar, die von allen Funktionen gelesen und beschrieben werden können.



Abbildung 34: Strukturüberblick über Energiemanagement

Die Verbindung zwischen Hard- und Software wird über Funktionen der Matlab-Data-Aquisition-Toolbox erreicht. Die Struktur der Kommunikation zwischen Hard- und Software ist in Abbildung 35 dargestellt.



Abbildung 35: Prinzip der Kommunikation zwischen Hard- und Software

Die Kommunikation unterteilt sich in vier Abschnitte. Im unten Dreieck befindet sich die Hardware (AD/DA-Wandler und DC/DC-Wandlereinheit). Die Software ist in drei Abschnitte gegliedert, rechts die von den Modulen bestimmte Aufnahmefunktionalität, links die ebenso von der Hardware abhängige Ausgabefunktionalität und oben die von der eigentlichen Hardwarekommunikation unabhängig gestalteten Programmkomponenten (z.B. Regelroutinen und Benutzeroberfläche). Um die Softwareseite von der Hardware zu entkoppeln, sind die Kommunikationsfunktionen in Timer-Funktionen gekapselt. Dadurch läuft die Datenaufnahme und -ausgabe kontinuierlich und autark von Regelroutinen und Benutzerinteraktionen.

In Abbildung 36 ist schematisch dargestellt, welche wichtigen Datenströme zwischen Hardware und Software existieren.



Abbildung 36: Datenströme in der Energiemanagement-Software [Pau11]

Mit Hilfe eines Software-Timers werden die Messwerte der AD/DA-Wandler kontinuierlich und blockweise ausgelesen, gefiltert und in einem lokalen Feld gespeichert (1). Für die Regelung und Darstellung wäre es umständlich, die benötigten Daten ständig aus dem Speicherfeld zu ermitteln. Somit sind Funktionen zwischengeschaltet, die aus dem Speicher die erforderlichen Daten in ein für die Weiterverarbeitung brauchbares Format bringen (2) (Get-Funktionen, z.B. GetIBZ oder GetSOC). Wird zum Beispiel von der Regelung der letzte Wert des Ladezustands gebraucht, so sucht die Funktion den passenden Messwert aus dem Speicher (letzter Superkondensator-Spannungswert) und berechnet daraus den Ladezustand. Auf diese Weise können auch nicht direkt messbare Größen wie Leistungen von den Regelungs- und Darstellungsroutinen angefordert werden. Die Ausgabe von Daten erfolgt über einen Timer, der diese über einen FIFO Speicher an den AD/DA-Wandler ausgibt (3). Gefüllt wird dieser Speicher von der Regelroutine oder durch Benutzeranforderungen, zum Beispiel nach Testsignalen (4). Das Verfahren ermöglicht es, Ausgabeprofile einmalig vorzugeben und diese vom Ausgabetimer kontinuierlich ausgeben zu lassen. Sicherungsfunktionen die die Grenzen

des Superkondensator-Ladezustands überwachen und Gegenmaßnahmen ergreifen können, wurden umgesetzt. Ebenso ist eine Möglichkeit zur Abschaltung der Brennstoffzelle, während des Sekundärregelungsbetriebs, implementiert worden.

#### 5.6.2 Benutzerschnittstelle

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen die entwickelte Bediensoftware für die Energiemanagement-Einheit und die "FC-Hybrid-Control"-Einheit. Die komfortablen Softwareund Bedienfunktionen sind in Tabelle 8 dargestellt.



Abbildung 37: Bedienfenster der Energiemanagement-Software

📣 Last_Bedienung					>
Last Verbinden	Last Zuschalten				
Auswahl	Hand	Dreieck		Profil	
○ Hand	Strom 0	Minimum	0	N	10
○ Sinus	4	Maximum	10		
○ Dreieck	<u> </u>	t1	10	Profil	
C Rechteck	Amplitude 5	t2	10	A	[0 1 2]
• Fahrprofil	Offset 5			Tk	[1 1 1]
C Profil				Та	[1 1 1]
	Frequenz 1			Gener	rieren
An	Übernehmen			-	

Abbildung 38: Bedienfenster zur Wahl der Testsignale für die Zustandsdiagnose

Element	Name	Beschreibung
1	Menü	siehe Unterabschnitt Menü
2	Initialisierung	Setzt Startwerte zurück und initialisiert die Hardware.
3	Systemstart	Startet den Aufnahme und Ausgabe-Timer. Dadurch ist die Kom- munikation mit der Hardware aktiv.
4	BZ An	Schaltet die Brennstoffzelle über das Relais an. Erst danach wird die Peripherie der Brennstoffzelle hochgefahren, sodass diese Leistungs- bereit ist.
5	Regelung An	Startet den Regelungs-Timer. Dabei wird der Regelungsalgorithmus ausgeführt und die Brennstoffzellen Stromsollwerte werden automa- tisch erzeugt.
6	IStell	In diesem Textfeld kann, bei ausgeschalteter Regelung, ein Strom- sollwert für die Brennstoffzelle von Hand angegeben werden. Durch bestätigen mit <i>Enter</i> wird der eingegebene Stellwert auf die Strom- proportionale Spannung umgerechnet und als Sollwert an der Pri- märregelung angelegt.
7	Testsignale Starten	Mit diesem Button lassen sich Brennstoffzellen-Stromstellwerte in Form eines voreingestellten Profils aktivieren bzw. deaktivieren.
8	Textausgabefeld	Hier werden die aktuell ermittelten Messwerte dargestellt. (siehe Tabelle $5.10$ )
9	Statusanzeige	Wichtige Zustandsmeldungen auf einem Blick. (siehe Tabelle 5.11)
10	Diagramme	Öffnet ein zusätzliches Fenster, in dem die aufgenommenen Daten in 4 Diagrammen dargestellt werden.
11	Datenaufnahme	Schaltet das Vorhalten der aufgenommenen Daten für die spätere Speicherung in einer Datei zu oder ab.
12	Speichern	Speichert die aufgenommenen Daten in eine Datei, mit dem vom Benutzer anzugebenden Namen.
13	Auswertung	Startet das Auswerte-Programm, welches die gespeicherten Daten auswertet und die Ergebnisse in Diagrammen darstellt.

#### Tabelle 8: Software- und Bedienfunktionen der Benutzeroberfläche [Pau11]

# 6 Entwicklung des Brennstoffzellensystems

Bei der FS1 (ZBT) wurde zunächst ein Labor-Brennstoffzellentestsystem entwickelt (Kapitel 6.1), das mit umfangreicher Sensorik ausgestattet ist. Das System wurde nach dem aktuellen Stand bei Projektstart aufgebaut, weiterentwickelt und schrittweise optimiert. Im Herbst 2009 wurde ein entsprechendes kompaktes 19"-System aufgebaut (Kapitel 6.2), welches dem Entwicklungsstand zu dem Zeitpunkt entspricht, und der FS2 (TU Chemnitz) zur Verfügung gestellt (Abbildung 49). Parallel dazu wurde an der FS2 eine Entwicklungsplattform der Wandlereinheit aufgebaut. Diese wurde dann erfolgreich mit dem Kompakt-BZ-System gekoppelt. Im Frühjahr 2010 ist auch eine kompakte 19" Einheit der Wandler aufgebaut worden, die der FS1 (ZBT) zur Verfügung gestellt wurde. An beiden Forschungsstellen konnten so die gekoppelten Systeme erprobt und weiterentwickelt werden. Die jeweiligen weiteren Entwicklungen sind in enger Zusammenarbeit am gesamten System abgestimmt und umgesetzt worden.

# 6.1 Aufbau eines Labor-Brennstoffzellentestsystems

Das Labor-Brennstoffzellensystem wurde mit einer trockenen Kathodenversorgung aufgebaut. Das bedeutet, dass die Verdichtereinheit unmittelbar an den Eingang der Kathode angeschlossen wird. Es findet keine externe Befeuchtung der Produkte statt (Abbildung 39). Um den geforderten Leistungsbereich erfüllen zu können, werden in diesem System zwei Membranpumpen parallel eingesetzt. Die Kathoden Edukte werden direkt aus dem System geführt. Für die anodenseitige Versorgung wird eine Rezirkulation verwendet. Dabei wird frischer Wasserstoff über einen Druckminderer in die Brennstoffzelle gegeben. Das am Ausgang der Anode austretende Gas wird über eine Rezirkulationspumpe zusätzlich dem frischen Gas beigemischt. Dadurch wir eine bestimmte Menge Wasserstoff im Kreis gepumpt. Der frische Wasserstoff wird so nur in dem Maße dosiert, in dem er auch verbraucht wird. An der Anode stellt sich durch die Rezirkulation dabei eine hohe Stöchiometrie ein. Der gesamte Kreislauf ist isoliert, um eine Kondensation des Wassers, das in dem an der Anode austretenden Gas enthalten ist, zu vermeiden. Überschüssiges Wasser wird durch einen Wasserabscheider aus dem Kreislauf ausgeschieden. Der Wasserabscheider wies gelegentliche Undichtigkeiten auf und wurde zu einem späteren Zeitpunkt deaktiviert. Das Wasser wird dann zusammen mit dem Purgegas über das Purgeventil aus dem System ausgeschieden. Der hohe Partialdruck des Stickstoffs der Kathodenseite führt zu einer Diffusion von Stickstoff zur Anode. Durch den geschlossenen Kreislauf der Anode bedingt führt das zu einer stetigen anodenseitigen Stickstoffanreicherung. Um die Konzentration gering zu halten wird periodisch das so genannte Purgeventil geöffnet. Dabei strömt stickstoffreiches Gas aus dem Kreislauf und wird durch nachströmenden reinen Wasserstoff ersetzt. Die Brennstoffzelle wird durch eine mittels Lüfter erzwungene Konvektion gekühlt.



Abbildung 39: Fliessschema des Labor- und 19"-Brennstoffzellensystems

Für das Labor-Brennstoffzellensystem wird ein Stack mit 34-Zellen verwendet. Das System ist mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Die Volumenströme der Kathodenversorgung und des frischen Wasserstoffs werden mittels Massendurchflussmesser gemessen. Im System werden die Temperaturen und Drücke an den Eingängen der Kathode und der Anode gemessen. Es wird die Spannung jeder einzelnen Zelle des Stacks gemessen. Die Peripherie des Systems wird von einem 24 V Netzteil versorgt, der Strom wird mittels LEM-Stromwandler gemessen. Weitere LEM-Stromwandler messen den Anteil des Peripheriestromes der Rezirkulationspumpe, der Stacklüfter und der Kathodenversorgungspumpen, was eine exakte Leistungsbilanzierung ermöglicht. Die Messwerterfassung erfolgt zu einem Teil über Messtechnik der Firma National Instruments und zum anderen Teil über die Messwerterfassung des Steuergerätes. Das Labor-Brennstoffzellensystem ist die Plattform für die Optimierungen, die in den Kapiteln 6.1.1, 6.1.2, 6.1.3 und 6.1.4 beschrieben werden.

#### 6.1.1 Regelungstechnische Optimierung der Kathodenversorgung

An diesem Hardware-Systemaufbau wurden dann regelungstechnische Optimierungen vorgenommen. Das bisherige Regelungskonzept der Kathode sah eine Grundversorgung mit einer Pumpe vor, die nur im Volllast-Betrieb genutzt werden kann. Ab ca. 14 A Stackstrom wird eine stufenlos regelbare Pumpe hinzu geschaltet. Das jeweilige Stellsignal wurde empirisch ermittelt. Nachteil des Konzeptes ist eine Überversorgung im Bereich kleiner Ströme. Durch die reine Steuerung reagiert das System nicht auf Veränderungen des Strömungswiderstandes der Brennstoffzelle. Je nach Feuchte kann es hierbei zu deutlichen Unterschieden kommen.

Um das System geregelt betreiben zu können, wurden die Leistungsdaten der verwendeten Pumpen in einem separaten Versuchsaufbau ermittelt und auf dem Steuergerät hinterlegt. Dabei wurden der Volumenstrom mittelt Balgengaszähler, die Druckdifferenz über die Pumpe und die Stromaufnahme der Pumpe gemessen. Für die Messreihe wurden das Stellsignal der Pumpe und die Druckdifferenz über die Pumpe mittels Drossel in einem festen Raster variiert und der jeweilige Volumenstrom gemessen. Im Systembetrieb ermöglicht die Kenntnis der Druckdifferenz und des Stellsignals es dem Steuergerät, so den aktuellen Norm-Volumenstrom zu errechnet und auch zu regeln. Abbildung 40 zeigt den stöchiometrischen Verlauf über den gesamten Betriebsbereich der alten Regelung ("Stöch Gesteuert") und aktuell geregelte Verläufe mit Stöchiometrien von 1,5, 2 und 3. Ein deutlicher Unterschied ist in dem Bereich kleiner Ströme zu erkennen. Der geregelte Betrieb ermöglicht bereits ab einem Strom von 3 A eine definierte Stöchiometrie am Stack, wohingegen der alte gesteuerte Betrieb erst ab ca. 12 A einen stöchiometrischen Betrieb ermöglicht.

Für die Regelung der Pumpe sind dabei mehrere Regelalgorithmen mit den zugehörigen Parametrierungsverfahren getestet worden. Eine der Herausforderungen stellt dabei der durch die Membranpumpen stark pulsende Volumenstrom dar. Die Pulse erschweren zum einen die Massendurchflussmessung, die zusätzlich als Referenz im Teststand eingesetzt ist, und zum anderen die Druckmessung, die für die Regelung notwendig ist. Es erfolgte eine dynamische Vermessung der Pumpe. Anhand der Messwerte konnte ein Verzögerungsverhalten erster Ordnung festgestellt werden. Es wurde ein entsprechendes Modell in MATLAB/Simulink® erstellt, an dem verschiedene Regler entworfen und parametriert wurden. Es konnten zwei Regler die geforderten Stabilitätskriterien erfüllen. Der PI-Regler nach Takahashi weist ein etwas ausgeprägteres Überschwingungsverhalten (Abbildung 41) auf, überzeugt aber in kritischen Situationen, bei denen die gesteuerte Pumpe im laufenden Betrieb zur regelbaren Pumpe hinzugeschaltet wird. Ein sicherer Betrieb ist immer notwendig, weswegen der PI-Regler nach Takahashi auf dem Steuergerät zum Einsatz kommt. Der Dead-Beat-Regler zeigt bei bestimmten Sprüngen instabiles Verhalten. Die Gegenüberstellung in Abbildung 42 zeigt, dass der PI-Regler nach Aufschaltung der Störgröße nach kurzer Zeit, wieder seinen Endwert erreicht.



Abbildung 40: Stöchiometrischer Verlauf verschiedener Soll-Vorgaben



Abbildung 41: Regelverhalten bei zwei verschiedenen Führungssprüngen

Der Dead-Beat-Regler dagegen zeigt ein instabiles Verhalten. Dies lässt sich Anhand des Regelverhaltens erklären. Der Dead-Beat-Regler ändert seine Reglerausgangsgröße, je nach Regeldifferenz, mit großen Sprüngen. Da die Regelstreckenverstärkung für jeden Arbeitspunkt neu berechnet wird, kann dies zu großen Abweichungen zwischen momentaner Regelstreckenverstärkung und der für den stabilen Betrieb des Reglers notwendigen Reglerverstärkung führen. Der PI-Regler ändert seine Ausgangsgröße eher stetig und suggeriert somit einen stabilen Betrieb. Die Ergebnisse konnten direkt auf dem Steuergerät genutzt werden und zeigten ein identisches Verhalten zu den Simulationen.



Abbildung 42: Regelverhalten bei einem Störsprung

In dem Bereich zwischen 0 A und 20 A Stackstrom kann der in der Optimierung erarbeitete Regler arbeiten. Bei höheren Strömen arbeiten beide Pumpen an Ihrem maximalen Betriebspunkt und der Regler hat so keinen Einfluss. In der Abbildung 43 sind die Gesamtwirkungsgrade des Systems vor (gesteuert) und nach (geregelt) der Optimierung dargestellt. Besonders im Teillastbereich konnte der Gesamtwirkungsgrad um fast 10 % gesteigert werden. Grund hierfür ist die deutliche Überversorgung der Kathode vor der Optimierung.



Abbildung 43: Gesamtwirkungsgrad des Systems vor (gesteuert) und nach (geregelt) der Optimierung

#### 6.1.2 Vermeidung sensibler Spannungsbereiche (OCV) zur Steigerung der Lebensdauer

Eine Spannung oberhalb von 900 mV (OCV: Open Circuit Voltage) pro Zelle führt zur Korrosion/Oxidation von Kohlenstoff innerhalb der Brennstoffzelle [Kund08] [Wu10]. Der Katalysator einer Brennstoffzelle wird in der Regel auf einer dünnen Schicht Kohlenstoff, der als Trägermaterial fungiert, aufgebracht. Wird der Kohlenstoff oxidiert, so verliert der Katalysator seinen Träger und wird aus der Brennstoffzelle gespült oder er wird innerhalb der Zelle an Orte gespült, an denen er seine Funktion verliert. Im Systembetrieb kann der OCV erfahrungsgemäß beim An- und Abfahren des Systems auftreten und er tritt auf, wenn das System im regulären Betrieb frei geschaltet ist, aber mit einem zu geringen Strom belastet wird. Um die Lebensdauer des Systems zu steigern, ist in allen drei Bereichen eine Optimierung durchgeführt worden.

- Beim Anfahren des Systems wird das Schutzrelais direkt beim Überschreiten einer Grenzspannung, die noch unterhalb von 900 mV liegt, frei gegeben. Bei einer sofortigen Belastung der Brennstoffzelle mit einem Strom wird das System so ohne OCV gestartet. In einem Hybrid System kann eine sofortige Belastung gewährleistet werden.
- Beim kontrollierten Abfahren des Systems wird das Schutzrelais getrennt, die Belastung fällt weg und es liegt im Normalfall OCV an. Um diesen Fall zu vermeiden, ist das System zusätzlich mit einem Lastwiderstand ausgestattet worden, über den der Stack kurzgeschlossen werden kann. Soll das System abgefahren werden, so wird das Schutzrelais wie bisher getrennt, die Kathoden-Versorgungspumpen werden abgeschaltet, der im System verbleibende Sauerstoff wird über den Lastwiderstand abreagiert, wodurch der OCV vermieden werden kann.
- Im regulären Betrieb ist das Schutzrelais immer geschlossen und die Brennstoffzelle wird kontinuierlich mit Medien versorgt. Nur so kann eine dynamische Reaktion auf Lastwechsel gewährleistet werden. Wird die Brennstoffzelle dann nicht belastet, so tritt der OCV ein. Im Falle eines hybridisierten Systems kann die dynamische Reaktion bei Lastsprüngen von dem Zwischenspeicher übernommen werden. Das ermöglicht die Implementierung eines "Standby"-Zustandes für das Brennstoffzellensystem. Dieser Zustand kann von der übergeordneten Energiemanagement-Einheit geschaltet werden und versetzt das System in einen sicheren Zustand, bei dem möglichst wenig Energie verbraucht wird, das System schnell wieder gestartet werden kann und der OCV vermieden wird. Dafür werden sämtlich Pumpen abgeschaltet, alle Magnetventile geschlossen und die Medien, die sich noch in der Zelle befinden, über den Lastwiderstand abreagiert. Mit einem sinnvollen Einsatz des "Standby"-Zustandes kann zusätzlich der Bereich geringen Wirkungsgrades unterhalb von 3,5 A vermieden werden und so der Wirkungsgrad bei einer Zyklenvermessung gesteigert werden.

#### 6.1.3 Optimierung der Betriebstemperatur

Die Temperatur der Brennstoffzelle hat einen Einfluss auf die Leitfähigkeit der Membran, auf die benötigte Feuchte der Medien und auch auf die benötigte Kühlleistung des Systems, wobei die Vorteile dabei teilweise in unterschiedlichen Temperaturbereichen liegen. Um die optimale Temperatur für das System zu ermitteln ist es mit mehreren Temperaturen, ansonsten identischen Bedingungen, mit einem Lastzyklus vermessen worden. Der Lastzyklus hat einen entscheidenden Einfluss auf die optimalen Betriebsbedingungen. Aus diesem Grund ist für die Optimierung ein möglichst umfangreicher Zyklus für mobile Anwendungen aus drei einzelnen Zyklen zusammengefügt worden (Abbildung 44).

- Der NEFZ-Zyklus ist der aktuelle Testzyklus der PKW Industrie (RL 70/220/EWG)
- Der **PKW-Zyklus** wurde aus 4792km von 33 Probanden und 157 Einzelfahrten im Rahmen einer Diplomarbeit berechnet
- Der letzte Teilzyklus wurde in diesem Projekt bei dem Betrieb einer autonomen Plattform gemessen. Für eine gleichmäßige Gewichtung der Zyklen wird er um das zehnfache gestreckt. Der Zyklus der autonomen Plattform ist hoch dynamisch. Da das System ohne eine Hybridisierung mit einem Direktspeicher betrieben wird, kann so zusätzlich eine notwendige dynamische Entlastung des Systems realisiert werden.



Abbildung 44: Lastprofil für die Brennstoffzellen-Systemoptimierung

Das Labor-Brennstoffzellensystem wurde mit der Lastanforderung des Zyklus und mit einer Temperatur des Brennstoffzellenstacks von 55, 60, 65 und 70 °C belastet. Ein Unterschied des Spannungs- und Stromverlaufes der Brennstoffzelle konnte nicht festgestellt werden. In dem untersuchten Bereich scheinen sich die gegenläufigen Faktoren Membranwiderstand und relative Feuchte aufzuheben. Ein deutlicher Unterschied ist in der Leistungsaufnahme der Peripherie zu erkennen.



Abbildung 45: Leistungsaufnahme der Lüfter bei unterschiedlichen Brennstoffzellenstacktemperaturen

In den meisten Bereichen arbeiten die Lüfter lediglich in einem Pulsbetrieb. Dabei werden die Lüfter für eine kurze Zeit angeregt und anschließend drehen sich die Lüfter stromlos weiter, bis sie zum Stillstand kommen. Auf diese Weise wird, bei einer minimalen Leistungsaufnahme der Lüfter, eine stetige Umwälzung in dem System gewährleistet und die Gefahr einer Ansammlung von Wasserstoff bei einer Leckage vermieden. In der Abbildung 45 sind diese Pulse in Form kurzer Leistungsspitzen zu erkennen. Dieser Pulsbetrieb reicht in der Regel zur Kühlung aus, hat aber nur einen geringen Anteil an der gesamten Leistungsaufnahme der Lüfter. In den Bereichen um Sekunde 1100, 3000 und 3600 wird das System mit wesentlichen größeren Leistungen belastet, die Lüfter arbeiten permanent und benötigen den Großteil der Leistung. Die Leistungsaufnahme der Lüfter steigt stark mit einer sinkenden Sollwertvorgabe für die Brennstoffzellentemperatur an. Für eine Temperatur von 55 °C konnten Leistungsspitzen von 40 W gemessen werden, wohingegen für eine Temperatur von 70 °C lediglich eine Leistung von weniger als 10 W benötigt wird. So konnte für das gesamte System eine Steigerung des Wirkungsgrades über den gesamten Zyklus mit einer steigenden Temperatur von 53,5 % auf 57,5 % ermittelt werden (Abbildung 46). Der Gesamtwirkungsgrad beschreibt das Verhältnis aus zugeführtem Wasserstoff und Energie für die Peripherie zu der nutzbaren Energie an der elektronischen Lastsenke. Die Unstetigkeiten bei den berechneten Wirkungsgraden sind auf eine mangelnde Reproduzierbarkeit der Ausgangsbedingungen des Systems zurück zu führen. So spielt die verbleibende Feuchte und Temperatur im Brennstoffzellenstack zum Start des Prüfzyklus eine entscheidende Rolle für die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle und hat somit einen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad.



Abbildung 46: Wirkungsgrade der Temperaturmessungen

Eine weitere Anhebung der Temperatur wurde nicht in Betracht gezogen, da höhere Temperaturen bei dynamischen Lastwechseln zu einer Systemabschaltung geführt haben. Das System hat bei 80 °C eine Abschaltgrenze, im dynamischen Betrieb mit einer Stacktemperatur von 75 °C kam es wiederholt zu Temperatur-Überschwingungen und zur Abschaltung. Das Problem kann durch eine Anpassung der Regler für die Lüfter gelöst werden, konnte im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht abgeschlossen werden.

Das System wurde bisher mit der optimalen Temperatur betrieben und es konnten so keine Verbesserungen des Gesamtwirkungsgrades erzielt werden.

#### 6.1.4 Optimierung des Purgezyklus

Der hohe Partialdruck des Stickstoffs der Luft der Kathodenseite führt zu einer Diffusion von Stickstoff durch die Membran zur Anode. Durch den geschlossenen Kreislauf der Anode findet eine stetige anodenseitige Stickstoffanreicherung statt. Um die Stickstoff-Konzentration gering zu halten, und somit ausreichend Wasserstoff Partialdruck zur Anodenversorgung zu gewähren, wird periodisch das so genannte Purgeventil geöffnet. Dabei strömt stickstoffreiches Gas aus dem Kreislauf heraus und wird durch nachströmenden reinen Wasserstoff ersetzt. Variationen sind dabei in dem Öffnungsintervall und der Öffnungsdauer möglich. Auch hier wurde eine Optimierung nach dem selben Schema wie schon bei der Temperatur durchgeführt: Für die einzelnen Testzyklen wurde das Öffnungsintervall konstant gehalten, die Öffnungsdauer dt

wurde mit 0,06, 0,25 und 1 s variiert. Die Versorgung der Brennstoffzelle konnte in allen Varianten sicher gewährleistet werden und es konnte kein Unterschied im Spannungs- und Stromverlauf der Brennstoffzelle festgestellt werden. Ein Unterschied konnte in der Leistungsaufnahme der Rezirkulationspumpe festgestellt werden (Abbildung 47).



Abbildung 47: Leistungsaufnahme der Rezirkulationspumpe

Die kürzere Öffnungszeit des Purgeventils führt zu einer geringeren Spülung im Anodenkreis und zu einer stärkeren Stickstoff-Anreicherung. Das für die Rezirkulationspumpe zu förderne Medium hat so eine wesentlich höhere Dichte. Die eingesetzte Rezirkulationspumpe ist eine Membranpumpe, die zur Familie die "konstant Volumenstrom" Pumpen gehört. Das bedeutet, dass die Pumpe ein festes Volumen hat, und so nahezu das gleiche Volumen pro Umlauf gefördert wird. Somit steigen bei einer konstanten Umdrehungsgeschwindigkeit das resultierende Drehmoment und so die Stromaufnahme der Pumpe. Bei einer konstanten Spannungsversorgung steigt die Leistungsaufnahme in diesem Falle von ca. 12,5 W auf maximale 20 W. Bei einer verkürzten Öffnungszeit des Purgeventils wird dagegen weniger Wasserstoff ungenutzt an die Umgebung abgegeben. Für den Wirkungsgrad des Gesamtsystems ergibt sich, trotz einer steigenden Leistungsaufnahme der Rezirkulationspumpe, eine Steigerung des Wirkungsgrades mit einer verkürzten Öffnungsdauer (Abbildung 48).



Abbildung 48: Wirkungsgrade bei einer Variation der Öffnungsdauer des Purgeventils

In der Abbildung 47 ist neben den Messreihen 2, 3 und 4, die jeweils mit einer Stacktemperatur von 65 °C gemessen wurden, noch eine weitere Messreihe mit einer Öffnungszeit von einer Sekunde und einer Stacktemperatur von 55 °C abgebildet. Die Messreihe unterscheidet sich von der Messreihe 2, mit einer Stacktemperatur von 65 °C und der gleichen Öffnungszeit, in dem Bereich der Sekunde 4000. Zum Ende der hohen Leistungsanforderung dieses Bereiches steigt die Leistungsaufnahme der Rezirkulationspumpe. Die Wasserproduktion einer Brennstoffzelle ist proportional zum Strom der Zelle. Im Bereich der hohen Leistungsanforderung steigt der Strom der Brennstoffzelle mit einer sinkenden Spannung der Brennstoffzelle überproportional an. Es muss so auch eine größere Menge an Wasser aus dem Anodenkreis ausgeschieden werden. Zu dem Zeitpunkt der Messungen war der Wasserabscheider bereits deaktiviert und das Wasser musste über das Purgeventil aus dem Anodenkreis ausgeschieden werden (Kapitel 6.1). Mit einer Stacktemperatur von 55 °C sinkt auch die Temperatur des Anodenkreislaufes, da dieser einzig durch die Brennstoffzelle beheizt wird. Bei einer geringeren Temperatur kann das Gasgemisch des Anodenkreises weniger Wasser in der Gasphase mit sich führen und es entsteht mehr flüssiges Wasser. In dem Bereich um Sekunde 4000 ist die Wassermenge so groß, dass bei einem Purgevorgang ausschließlich Wasser ausgeschieden wird. Es findet also keine Stickstoffspülung statt und der Stickstoffgehalt des Gasgemisches steigt stetig an. Dieser erhöhte Stickstoffgehalt führt so zu einer erhöhten Leistungsaufnahme der Rezirkulationspumpe.

Durch die Optimierung des Purgezyklus konnte für das System einen nennenswerte Leistungssteigerung von bisher 57 % auf 59 %, gemessen an dem Testzyklus, erzielt werden.

# 6.2 Aufbau des 19"-Brennstoffzellensystems

Im Herbst 2009 wurde das 19"-Brennstoffzellensystem für die TU-Chemnitz aufgebaut. Zu dem Zeitpunkt war bereits die Optimierung der Kathodenversorgungspumpen (Kapitel 6.1.1) abgeschlossen und die Technik zur Vermeidung des OCV-Zustandes war vorhanden (Kapitel 6.1.2). Für das System sind weitere Anpassungen durchgeführt worden.



Abbildung 49: Fotos des 19"-Brennstoffzellensystems, welches der FS2 (TU Chemnitz) zur Verfügung gestellt wurde

• Um bei der geforderten Leistung von 500 W sicher über der im Rahmen der Schnittstellendefinition festgelegten Grenzspannung von 24 V zu bleiben, ist der Standard-Stack des ZBT um 4 weitere Zellen auf 38 Zellen verlängert worden. Der Stack

wird ausgangsseitig einzig durch ein Relais vom Wandler getrennt. Dadurch können Verluste an einer sonst notwendigen Diode vermieden werden. Das System wird jetzt nur durch eine Strommessung des Steuergerätes vor einer Rückspeisung geschützt.

- Die Peripherie des Systems wird direkt vom 24 V Bus versorgt. Diese Variante der Verschaltung ermöglicht es der Energiemanagement-Einheit, einerseits den Stack besser zu analysieren, andererseits können weitere Spannungsverluste zwischen dem Stack und dem Bus vermieden werden.
- Die gesamte Peripherie ist für eine 24 Volt Spannungsversorgung optimiert worden.

Die folgenden Kennlinien sind mit dem optimierten Systemaufbau aufgenommen worden, die Kennlinien von Leistung und Wirkungsgrad über dem System-Strom in Abbildung 50 zeigen die Nettoleistung des Systems unter Berücksichtigung der Peripheriekomponenten. Bei einer Ausgangsspannung  $\geq 24$  V für die Wandlereinheit werden gut 600 W elektrische Leistung erreicht. Der Wirkungsgrad-Sprung im Teillastbereich ist durch eine Taktung der Rezirkulationspumpe unterhalb von 4 A Stackstrom zu erklären.



Abbildung 50: Leistungsmessung des Systems mit 38 Zellen

Das System hat sich im Testbetrieb als äußerst robust und universal einsetzbar erwiesen. Es wurde am Prüflabor BrennstoffzellenTechnik geprüft, es wurde das CE-Konformitätsbewertungsverfahren durchgeführt und die CE-Kennzeichnung angebracht. Es wurde als Teil eines Stromversorgungsmoduls auf der Hannovermesse 2010 und der Weltwasserstoffkonferenz (World Hydrogen Energy Conference / WHEC) 2010 eingesetzt und präsentiert. Ein Datenblatt ist auf der Internetseite des ZBT erhältlich und befindet sich im Anhang des Berichtes.

# 7 Online-Analyse und Aktivierung des Brennstoffzellensystems

Der Feuchtehaushalt der Brennstoffzelle ist das zentrale Element ihrer Betriebsführung. Ist die Membran zu trocken, so sinkt die Leitfähigkeit, die Spannungsverluste steigen und die Zellen altern schneller. Wenn die Zellen zu feucht betrieben werden ist der Diffusionsweg der Edukte

zur aktiven Zone gehemmt. Weiterhin kann es zur vermehrten Kondensation in den Kanälen der Bipolarplatten kommen, was zu einer kurzfristigen Blockade des jeweiligen Kanals und so zu einer kurzfristigen Unterversorgung führen kann. Bei einer Unterversorgung kommt es schnell zu einer Umpolung der Zelle. Dabei wird Wasser an der Anode getrennt und der dabei frei werdende Sauerstoff reagiert mit dem Kohlenstoffträger des Katalysators. Eine starke Degradation ist die Folge.

Eine direkte Messung der Feuchte der Brennstoffzelle ist möglich [Hinds09], aber für ein mobiles System nicht praktikabel. Es gibt jedoch mehrere Möglichkeiten, die Feuchte der Zellen indirekt über die Spannung der Zelle zu messen. Im Rahmen dieses Projektes sind drei gängige Methoden im Hinblick auf Ihre Anwendung in einem mobilen System untersucht worden.

# 7.1 Elektrochemische Impedanz Spektroskopie

Die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) liefert Informationen über das frequenzabhängige, elektrochemische Verhalten des betrachteten Objektes indem man die Übertragungsfunktion ermittelt. Das System wird mit einem modulierten sinusförmigen Signal beaufschlagt. Handelt es sich um ein lineares System so wird die Systemantwort die gleiche Frequenz besitzen, sich jedoch in Phase und Amplitude vom Eingangssignal unterscheiden, Abbildung 51. Da es unmöglich ist, das System mit allen Frequenzen von [0 Hz,  $^{\infty}$ ) zu beaufschlagen, wird ein sinnvoller Frequenzbereich gewählt, der es ermöglicht, die interessanten Prozesse verfolgen zu können.



Abbildung 51: Systemverhalten im Zeitbereich

Die Übertragungsfunktion ist definiert als der Quotient der Laplace-Transformierten der Systemantwort zur Laplace-Transformierten des Eingangssignals. Handelt es sich um einen stationären Prozess so kann die Laplace-Transformation durch die einfachere Fourier-Transformation ersetzt werden.

Wird für die Berechnung der Übertragungsfunktion als Eingangssignal ein Strom angelegt und stellt das Ausgangssignal eine Spannung dar, so ergibt sich als Übertragungsfunktion eine Impedanz. Die Gleichung ergibt sich zu:

$Z(\omega) = \frac{A(\omega)}{S(\omega)}$	(7-1)
$h(t) = \Im^{-1}[Z(\omega)]$	(7-2)

Das Verfahren lässt sich nicht einfach anwenden, da elektrochemische Vorgänge nichtlinear sind. Linearisiert man sie jedoch in jedem einzelnen Punkt, so lässt sich die angenäherte Übertragungsfunktion mittels der Fourier-Transformierten bestimmen. Weiterhin müssen noch folgende Annahmen getroffen werden, damit aus den gemessenen Impedanzen Rückschlüsse auf das untersuchte System gezogen werden können:

- Es muss Kausalität vorliegen, das heißt, dass die Systemantwort a(t) ausschließlich von dem Signal s(t) hervorgerufen wird und nicht von anderen Größen wie z.B. Störgrößen oder durch das Gedächtnis des Systems mit beeinflusst wird.
- Weiterhin wird die Linearität des Systems angenommen, die Impedanz ist unabhängig von der Größe des Eingangssignals s(t).

- Ein weiteres Kriterium ist die Stabilität des Systems, dies bedeutet, dass das System in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehrt, sobald kein Eingangssignal mehr anliegt.
- Ebenso muss Endlichkeit und Kontinuität vorliegen, die Übertragungsfunktion ist als Funktion der Frequenz im gesamten Intervall [0 Hz, <sup>∞</sup>) endlich und weist keine Sprünge und Singularitäten auf. [Kuhn08]

Mit Hilfe der Kramers-Kronig-Beziehungen, die einen Spezialfall der Hilbert-Transformation darstellen, lassen sich der Real- und Imaginärteil der Funktion, sowie die Phase mit dem Betrag der Amplitude miteinander in Beziehung setzen:

$$\operatorname{Re}(Z(\omega)) - \operatorname{Re}(Z(\infty)) = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{x \operatorname{Im}(Z(x)) - \omega \operatorname{Im}(Z(\omega))}{x^{2} - \omega^{2}} dx \qquad (7-3)$$
$$\operatorname{Im}(Z(\omega)) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{\operatorname{Re}(Z(x)) - \operatorname{Im}(Z(\omega))}{x^{2} - \omega^{2}} dx \qquad (7-4)$$
$$\phi(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{\log(|Z(x)|)}{x^{2} - \omega^{2}} dx \qquad (7-5)$$

Mit diesen Formeln lässt sich die Genauigkeit der Messung überprüfen. Wie oben schon erwähnt wurde ist es messtechnisch unmöglich über den gesamten Frequenzbereich von  $[0 \text{ Hz}, ^{\infty})$  zu messen. Eine Möglichkeit, diese mathematischen Beziehungen trotzdem für die Bestimmung der Güte der durchgeführten Messung verwenden zu können, besteht in der Interpolation der Grenzwerte. Eine weitere Möglichkeit, diese Problematik zu umgehen, ist die Anwendung der logarithmischen Hilbert-Transformation, die den endlichen Messbereich berücksichtigt. [Kunh08]

$$\ln(|Z(\omega)|) \approx const + \frac{2}{\pi} \int_{\omega_u}^{\omega_o} \phi(\omega) d \ln(\omega) + \gamma \frac{d\phi(\omega)}{d \ln(\omega)}$$
(7-6)

Die Elektrochemische Impedanz Spektroskopie ist eine gängige Messmethode am ZBT, wird jedoch ausschließlich bei stationären Anwendungen im Teststand genutzt. Eine Messung benötigt ca. 15 Minuten kontinuierlichen Betrieb und ist so im laufenden System nicht mit einer realistischen Hybridisierung zu vereinbaren. Darüber hinaus sind im Anschluss an die Messungen rechenintensive Analysen der Messwerte erforderlich, die es einem erst ermöglichen, aus der Messung Rückschlüsse auf die Brennstoffzelle zu ziehen. Auch dieser Aspekt macht eine Implementierung der Elektrochemischen Impedanz Spektroskopie an einem kleinen System nicht praktikabel.

# 7.2 Strom-Puls-Methode / Strom-Unterbrechungs-Methode

Eine Messung nach der Strom-Puls-Methode wie auch der Strom-Unterbrechungs-Methode kann einen Aufschluss auf den Membranwiderstand der Brennstoffzelle geben. Der Membranwiderstand ist wesentlich für die Leistungsfähigkeit eine Brennstoffzelle verantwortlich. Er ist eng mit dem Feuchtegehalt der Membran verknüpft. Bei einer entsprechenden Messung wird der Strom der Brennstoffzelle für einen kurzen Zeitraum von ca. 50 µs verändert bzw. unterbrochen. Abbildung 52 skizziert einen exemplarischen Strom- und Spannungsverlauf einer derartigen Messung. Der mathematische Zusammenhang des Membranwiderstandes ist folgender:

$$\Delta U_1 = R_{Membran} \cdot \Delta I \tag{7-7}$$

Der zweite Bereich wird durch das Aufladen der Doppelschicht und den Durchtrittswiderstand geprägt und verhält sich wie eine Parallelschaltung aus einem Widerstand und Kondensator



Abbildung 52: Strom-Puls-Methode [Kuhn08]

Im Rahmen dieses Projektes sind Untersuchungen an einer Brennstoffzelle mit zwei Zellen nach der Strom-Puls-Methode durchgeführt worden. Die Abbildung 53 zeigt den Aufbau des Strom-Puls-Messsystems. Der Stromkreis der Brennstoffzelle kann mittels der Widerstände R1 und/oder R2 geschlossen werden. Es werden die Brennstoffzellenspannung und der Strom der Brennstoffzelle mittels Shunt gemessen. Die Spannung über den Widerstand R2 dient als Trigger. Die Brennstoffzelle wird mit dem Widerstand R1 dauerhaft betrieben. Für eine Messung wird kurzfristig der Widerstand R2 manuell parallel hinzu geschaltet, wodurch sich der Gesamtwiderstand senkt und der Strom der Brennstoffzelle sprungartig erhöht.



Abbildung 53: Aufbau des Strom-Puls-Messsystems

Um einen Anhaltswert über die Aussagekraft und Stabilität der Messmethode zu bekommen, wurde am 6.08.2010 eine Messreihe aufgenommen, bei der eine Brennstoffzelle, bestehend aus zwei in Reihe geschalteten einzelnen Zellen, mit definiert befeuchteten Gasen betrieben wird. Die Befeuchtung erfolgt in dem Versuch mit Bubblern (Blasenbefeuchtern), bei denen die Medien eine temperierte Wassersäule durchströmen. Dabei sättigen sich die Gase mit Wasser, wodurch der Taupunkt der Gase der Wassertemperatur entspricht. Der Verlauf der Wassertemperatur ist in Abbildung 54 in blau dargestellt. In dem ersten Bereich kühlen die Bubbler, nach einer ersten Heizphase, von ca. 35 °C auf 30 °C ab. Die Medien und die Brennstoffzelle trocknen so langsam aus. In diesem Bereich konnte nach der Strom-Puls-Methode ein Widerstand ermittelt werden, der kontinuierlich von 10 m $\Omega$  auf 13 m $\Omega$  steigt. In dem folgenden Abschnitt werden die Bubbler auf 60 °C geheizt. Der nach der Strom-Puls-Methode ermittelte Widerstand fällt in diesem Bereich auf konstante 5 m $\Omega$ . Die ermittelten Widerstände der Membran entsprechen den erwarteten Werten aus der Literatur [FC07]. Eine Wiederholung der Messreihe am 12.08.2010 liefert nahezu identische Messwerte und bestätigt so die Reproduzierbarkeit und Aussagekraft des Messverfahrens.



Abbildung 54: Temperatur- und Widerstandsverläufe der Strom-Puls-Messreihen

Die Abbildung 55 zeigt sämtliche Messungen bezogen auf die jeweilige Bubbler Temperatur. Der Zusammenhang scheint deutlich zu sein, ist aber noch nicht genauer beschrieben worden.



Abbildung 55: Zusammenfassung der Messungen nach der Strom-Puls-Methode

Eine Messung nach der Strom-Puls-Methode ist auch in einem laufenden System denkbar. Die Umsetzung der Technik auf ein portables und günstiges Messgerät wird am ZBT weiter verfolgt, konnte aber im Rahmen dieses Projektes nicht durchgeführt werden.

# 7.3 Strom-Spannungskennlinie (Polarisationskurve)

Die Strom-Spannungskennlinie, auch als Polarisationskurve bekannt, liefert einen groben Überblick über die Charakteristika einer Brennstoffzelle im stationären Zustand. Anhand des Verlaufs der Polarisationskennlinie lassen sich die vier wichtigen Vorgänge und Charakteristika innerhalb der Brennstoffzelle ablesen. Die Kennlinie wird im stationären Zustand der Zelle aufgenommen. Die Stromdichte-Spannungskennlinie lässt sich in drei Bereiche und die Leerlaufspannung einteilen (Abbildung 56).



Abbildung 56: Polarisationskurve einer Brennstoffzelle [Kuhn08]

**Leerlaufspannung**  $U_0$  (j=0): Die sich tatsächlich an den BZ-Klemmen einstellende Ruhespannung liegt unterhalb der theoretischen reversiblen Zellspannung. Ein Grund hierfür liegt in der Güte der Membran, welche die einzelnen Reaktanden von einander separiert. Abhängig vom Durchlässigkeitsgrad, kommt es zu einer Diffusion der einzelnen Reaktanden auf die Gegenseite. Ein Mischpotential entsteht, welches ein Absinken der Leerlaufspannung zur Folge hat. Weiteren Einfluss auf die Leerlaufspannung nehmen die verwendeten Katalysatoren, da es an ihnen zur Bildung von Nebenreaktionen und daraus resultierenden Mischpotentialen kommt.

Da die Membran kein idealer Isolator für die Elektronen ist, kommt es zu einem Leckstrom durch die Membran. Auf der Gegenseite reagieren sie zusammen mit den positiven Wasserstoffionen und dem Sauerstoff zu Wasser. Diese Elektronen stehen für den Ladungstransport nicht mehr zur Verfügung.

**Bereich I (j < 100 mA/cm<sup>2</sup>):** Dieser Bereich ist durch ein schnelles Absinken der Zellspannung gekennzeichnet. Damit es zu einer Reaktion der Reaktanden kommt muss erst die Aktivierungsenergie zugeführt werden. Dieser Bereich der Kennlinie wird durch die Sauerstoffreduktion (ORR) bestimmt. Der exponentielle Spannungsabfall gibt Aufschluss über ORR-Wirksamkeit des Katalysators.

**Bereich II (100 mA/cm<sup>2</sup> < j < 600 mA/cm<sup>2</sup>):** In diesem Abschnitt sinkt die Zellspannung mit steigender Stromdichte j nahezu linear ab. Dieser Spannungsabfall wird durch die ohmschen Verluste der Brennstoffzelle hervorgerufen. Dominierend für die Verluste ist hier vor allen

Dingen der Widerstand der Membran, der auf eine begrenzte Ionenleitfähigkeit zurückzuführen ist. Ein weiterer sich hier einstellender Effekt wird in [And02] beschrieben. Andreaus gibt an, dass mit steigender Stromstärke die aktive Katalysatoroberfläche abnimmt und es somit zu einer Erhöhung der Aktivierungsüberspannung kommt. Es ist folglich nicht möglich, den Membranwiderstand aus der Kennlinie abzulesen, da sich die beiden Effekte überlagern.

**Bereich III:** (j > 600 mA/cm<sup>2</sup>): Ab Stromdichten von 600 mA/cm<sup>2</sup> wird der im oberen Abschnitt dominante ohmsche Anteil der Zellen von der Massentransportlimitierung überlagert. Die fließenden Ströme gelangen in den Bereich des Grenzstromes I<sub>lim</sub> bzw. der Grenzstromdichte j<sub>lim</sub>. Die Menge der bei diesen Stromdichten für die Reaktion benötigten Gase kann nicht mehr in ausreichendem Maße zugeführt werden; dies führt zu einem Einbruch der Zellspannung. Des Weiteren kommt es zu einer Erhöhung des ohmschen Spannungsabfalls, da es durch den hohen Gasdurchsatz zu einem Austrocknen der Membran kommen kann, wodurch die Leitfähigkeit dieser abnimmt.

Die Polarisationskurve ist die gängigste Charakterisierungsmöglichkeit für Brennstoffzellen. Die Brennstoffzelle muss dafür jedoch in einem sehr breiten Bereich betrieben werden und ist so in der Regel nur in Testständen einsetzbar. Die starke und flexible Hybridisierung des Systems, das im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde, bietet jedoch die Möglichkeit, die Zelle in einem kurzen Zeitfenster frei zu bewegen. Die Brennstoffzelle wird, unabhängig von der Last, mit definierten Strömen über den gesamten Betriebsbereich angesteuert. Der Superkondensator gleicht die Differenz zwischen der durch die Zelle gelieferten Leistung und der durch die Last abgerufene Leistung aus. Das Zeitfenster, in dem die Brennstoffzelle frei bewegt werden kann, ist dabei abhängig von der Last. Die Polarisationskurve wird in diesem Projekt als Online-Analysemethode eingesetzt. Die technische Umsetzung wird in Kapitel 8.1 beschrieben.

# 7.4 Aktivierungsprozesse

Die Ermittlung eines unzureichenden bzw. nicht optimalen Betriebspunktes bringt einem Brennstoffzellensystem nur dann einen Mehrwert, wenn geeignete Reaktionsmöglichkeiten und Aktivierungsprozesse zur Verfügung stehen. Das System, das für dieses Projekt aufgebaut wurde, arbeitet mit einer trockenen Kathodenversorgung. Die Gefahr eines zu feuchten Betriebs ist somit nur in dynamischen Lastwechseln denkbar. Der Fokus für mögliche Aktivierungsprozesse wird somit auf eine Aktivierung durch eine Befeuchtung gelegt. Zusätzlich werden die positiven Effekte der OCV genutzt.

#### 7.4.1 Aktivierung durch Befeuchtung

Eine Möglichkeit der Aktivierung bietet eine Befeuchtung der Zellen. Da keine externe Befeuchtung im System vorhanden ist, muss diese Befeuchtung über das Produktwasser realisiert werden. Die Produktion des Wassers in der Brennstoffzelle ist einzig vom Strom abhängig, mit der die Zelle belastet wird. Wird bei einem konstanten Strom, also einer konstanten "Wasserproduktion", die Temperatur der Zelle gesenkt, so steigt die relative Feuchte der Zelle und die Membran wird befeuchtet. In diesem ersten Schritt der Aktivierung sinkt die Zellspannung durch die temperaturbedingte schlechtere Leitfähigkeit der Membran ab. Im zweiten Schritt wird die Zelle wieder auf die normale Betriebstemperatur erwärmt. Die Zelle kann die Feuchtigkeit halten und so ein höheres Spannungsniveau (Abbildung 57) erreichen. Vermutlich können durch die erhöhte Kondensation in der Zelle auch Verunreinigungen Untersuchungen Dieser ausgespült werden. Entsprechende stehen noch aus. Aktivierungsprozess wird im System halbautomatisiert eingesetzt (Kapitel 8.1).



Abbildung 57: Aktivierung der Zellen durch eine Befeuchtung

#### 7.4.2 Aktivierung mittels OCV

Eine weitere Möglichkeit der Aktivierung bietet der OCV. Bei der kurzzeitigen Beaufschlagung der einzelnen Zelle mit einen Spannung von mehr als 900 mV können Verunreinigungen, die sich im laufenden Betrieb an der Zelle angesammelt haben, abreagiert werden. Der negative Nebeneffekt dieser Technik ist der unter 6.1.2 beschriebene Alterungsmechanismus. Auch die Aktivierung durch kurzzeitige Belastung der Brennstoffzelle mit OCV wird halbautomatisiert im System umgesetzt (Kapitel 8.1).

# 8 Kopplung des Gesamtsystems am ZBT (FS1)

# 8.1 Betrieb des Systems mit Online-Analyse und Aktivierung

Die aus 7.3 und 7.4 gewonnenen Erkenntnisse sind halbautomatisiert auf dem Steuergerät des Brennstoffzellensystems und der Energiemanagement-Einheit umgesetzt worden. In der folgenden Messreihe wurde ein konstanter Betriebspunkt von 300 W als Belastung für die Brennstoffzelle gewählt. Der konstante Betrieb ermöglicht es, unabhängig von der Online-Analyse, den Spannungsverlauf der Zellen zu beobachten und als Hinweis auf den Zustand dieser zu deuten und schafft so eine Plausibilitätskontrolle. Ferner ist für einen konstanten Betrieb in diesem Leistungsbereich bekannt, dass das System kontinuierlich an Leistung verliert. Bis heute konnte nicht genauer geklärt werden, worin dieser Leistungsverlust zu begründen ist, vermutet wird aber eine langsame Austrocknung der Membran. Für die Online-Analyse wurde eine dynamische Polarisationskurve eingesetzt, die den Bereich zwischen 0 A, 20 A und 0 A dreimal in je 20 Sekunden linear durchfährt. Höhere Ströme sind, begrenzt durch die Wandlerarchitektur, nicht möglich. Das Steuergerät integriert dabei mit einer Geschwindigkeit von 40 ms die jeweiligen Stackspannungen auf (Abbildung 58). Eine Division des gesamten Integrals durch die Anzahl der Integrationsschritte würde so eine mittlere Stackspannung über den gesamten Betriebsbereich ergeben.

Für die Analyse ist das Integral, das so einen Anhaltswert für den Zustand des Stack über den gesamten Betriebsbereich gibt, das Kriterium, nach dem der Zustand beurteilt wird. Bei einem Wert, der kleiner als 95 % eines Referenzintegrals liegt, wird eine Aktivierung durchgeführt.

Abbildung 59 zeigt die Ergebnisse der Online-Analyse beim Start des Systems. Bei der zweiten und dritten Messung konnte die Messung nicht bis zum Ende durchgeführt werden, da die Superkondensator Einheit in die untere Ladegrenze gelaufen ist. Die Analyse wird in so einem Fall von der Energiemanagement-Einheit abgebrochen, um einen stabilen Systembetrieb zu gewähren. Da die Energiemanagement-Einheit und das Steuergerät der Brennstoffzelle aber nur halbautomatisiert miteinander synchronisiert sind, wird die Integration der Analyse bis zum Ende durchgeführt, was zu den stark abweichenden Ergebnissen der beiden Messpunkte geführt hat. In dem dargestellten Zeitbereich nach dem Start des Systems wurde kein Zustand ermittelt, der ein Eingreifen der Aktivierung erfordert.





Abbildung 59: Ergebnisse der Online-Analyse im Startbereich (Start bei Zeit = 0)

Abbildung 58: I-U-Verlauf während der Online-Analyse mittels Polarisationskurve

Nach insgesamt 195 Minuten Betriebszeit wurde die Online-Analyse wiederholt. Das ermittelte Integral lag mit 21557 Punkten und somit knapp unter der 95 % Grenze von 21565 Punkten. Das Brennstoffzellensystem führt in so einem Falle automatisch eine Aktivierung entsprechend der im Kapitel 7.4.1 beschriebenen Methodik durch. Dafür werden die Kühlungslüfter für 60 Sekunden auf maximale Drehzahl beschleunigt. Das System kühlt sich ab und es kommt zu einer Befeuchtung der Zellen. Im weiteren Verlauf erwärmt sich der Stack wieder und die Spannung steigt. Der zweite Messpunkt aus Abbildung 60 zeigt, dass die Aktivierung mit dem Erreichen der ursprünglichen Temperatur nicht abgeschlossen ist. Erst eine Messung nach mehreren Minuten bringt ein Ergebnis von über 95 % hervor.

Nach insgesamt 250 Minuten Betrieb wurde eine Online-Analyse durchgeführt (Abbildung 61) die mit 21501 Punkten erneut unter der 95 % Grenze lag. Die folgenden sechs Analysen sind anschließend in einer zu kurzen Abfolge durchgeführt worden, so dass die jeweiligen Aktivierungen nicht abgeschlossen werden konnten und kein positives Ergebnis erzielt werden konnte.

Im Anschluss an die Aktivierung der Analyse nach 270 Minuten ist eine manuell erweiterte Aktivierung durchgeführt worden. Das System wurde für mehrere Sekunden mit einem maximalen Strom, für eine maximale Wasserproduktion, belastet und im Anschluss für eine kurze Zeit, ohne Belastung, im OCV betrieben. Das Ganze wurde wiederholt und im Anschluss erneut eine Analyse durchgeführt. Das Ergebnis liegt mit 22239 Punkten weit über der 95 % Grenze.

Mit einer engen Abstimmung der Energiemanagement-Einheit und dem Steuergerät der Brennstoffzelle kann so eine sehr gute Aktivierung im laufenden Betrieb des Systems durchgeführt werden.





Abbildung 60: Ergebnisse der Online-Analyse nach ca. 195 min



Der gekoppelte Betrieb der Systeme lässt sich im Hinblick auf die Online-Analyse und Aktivierung folgendermaßen zusammenfassen:

- Mit der Messung einer dynamischen Polarisationskurve wurde eine Methode zur Analyse entwickelt, die ein Zustandserkennen im laufenden Betrieb ermöglicht
- In dem Fall, in dem ein unzureichender Betriebszustand erkannt wurde, ist das System in der Lage, automatisch eine Aktivierung der Brennstoffzelle durchzuführen.
- Die Aktivierung durch Befeuchtung kann eine nachhaltige Leistungssteigerung des Stacks erwirken. Auch die Aktivierung mittels OCV funktioniert gut, wobei sie nicht automatisiert umgesetzt wurde. Es müssten erst Untersuchungen bezüglich der langfristigen Degradation kurzer OCV-Zeiten durchgeführt werden. (Kapitel 6.1.2)

# 8.2 Optimierung des gekoppelten Gesamtsystems am ZBT

Das gekoppelte Gesamtsystem ist am ZBT auch hinsichtlich des Systemwirkungsgrades getestet worden. Als Lastprofil wurde das von der TU Chemnitz an der autonomen Plattform aufgenommene ausgewählt. Eine besondere Eigenschaft des hybridisierten Systems ist die starke dynamische Entlastung, weswegen der Zyklus mit der vollen 10Hz Dynamik für die Belastung vorgegeben wird. Für die Optimierung stehen bei der Energiemanagement-Einheit folgende Parameter zur Verfügung:

△I [A/s] die maximale Veränderung der Stromes der Brennstoffzellenbelastung pro Sekunde

- I<sub>min</sub> [A] der minimale Strom, mit der die Brennstoffzelle belastet wird
- I<sub>max</sub> [A] der maximale Strom, mit der die Brennstoffzelle belastet wird

Die Parameter  $I_{min}$  und  $I_{max}$  geben die Grenzen an, in denen sich das System im normalen Regelbetrieb bewegen soll.  $I_{max}$  verhindert eine Überlastung des Brennstoffzellensystems und wird in keinem Fall überschritten.  $I_{min}$  stellt die untere Regelgrenze dar, hier hat bei der Regelung die Ladegrenze der Superkondensatoren den Vorrang. Wird für eine längere Zeit keine Leistung vom System gefordert, so werden die Superkondensatoren kontinuierlich mit  $I_{min}$ x U<sub>BZ</sub> geladen. Wenn die obere Grenzspannung der Superkondensatoren erreicht ist, wird der Ladestrom ausgeschaltet und das Brennstoffzellensystem nicht weiter belastet. Die Energiemanagement-Einheit, die an der TU Chemnitz betrieben wird, hat für diesen Fall die Möglichkeit, das Brennstoffzellensystem in einen "Standby" Zustand zu versetzten. Die Energiemanagement-Einheit des ZBT verfügt noch nicht über diese Option und das Brennstoffzellensystem befindet sich in dem Fall, in dem es nicht mehr belastet wird, im OCV. Dieser Zustand ist wegen der beschleunigten Degradation unbedingt zu vermeiden. Durch den diskontinuierlichen Betrieb wird so zusätzlich die Vergleichbarkeit der Zyklen gemindert. Aus diesem Grunde wurde für eine Parameter Variation nur ein Bereich gewählt, in dem das System in den vorgegebenen Grenzen bewegt werden konnte. Durch die, verglichen zur Akkutechnologie, kleine Kapazität der Superkondensatoren ist eine Variation nur in sehr engen Grenzen möglich. Die Grenzen sind so für einen breiten Betriebsbereich eingestellt und konstant gehalten worden.

Der Parameter  $\Delta I$  verändert die dynamische Belastung des Systems und bekommt, durch die konstanten Stromgrenzen der Energiemanagement-Einheit, die bedeutendste Rolle in der Optimierung. Je kleiner er gewählt wird, desto stärker wird das System dynamisch entlastet. Die Brennstoffzelle kann mit einer zunehmenden dynamischen Entlastung kontinuierlicher und so stabiler bewegt werden. Für die Parameter Variation wurde  $\Delta I$  so weit verändert, dass sich das System ständig im Regelbetrieb befindet und es zu keine Grenzabschaltung kommt. Der kleinste mögliche Wert für  $\Delta I$  war 0,75 A/s.

Für die Messreihe, die in Abbildung 62 dargestellt wird, wurde das System mit einer Stromänderungsgeschwindigkeit zwischen 0,75 A/s und 10 A/s betrieben. Um einen Einfluss eines anderweitig verursachten Leistungsverlustes über mehrere Stunden als Quelle veränderlicher Leistungen auszuschließen, wurde die Messreihe erst mit einer steigenden und anschließend mit einer sinkenden maximalen Stromänderungsgeschwindigkeit durchgeführt. Für jede Stromänderungsgeschwindigkeit wurden vier aufeinander folgende Zyklen durchfahren und die Messwerte wurden über den gesamten Bereich aufsummiert.



Abbildung 62: Gesamtsystemwirkungsgrad bei einer Variation der Stromänderungsgeschwindigkeit dl und einer chronologischen Nummerierung Nr.1 bis Nr.9 der Messreihen

Der Gesamtwirkungsgrad variiert über die Messungen in einem Bereich zwischen 42,5 % und 43,2 %. Ein Einfluss der veränderten maximalen Stromänderungsgeschwindigkeit kann dabei nicht erkannt werden. Generell scheint wieder der zeitliche Effekt eine leichte Verschlechterung über die Messreihen zu verursachen, wobei sich die Streuung der Messungen in einem ähnlichen Bereich bewegen und auch diese Aussage fraglich ist. Um die Streuung der Messungen zu reduzieren ist eine Kenntnis über Ladungszustand des Superkondensators erforderlich. Diese Spannungsmessung stand mit der hohen 10 Hz Auflösung leider nicht synchronisiert zu Verfügung.

Ein kleiner Unterschied kann in der Zusammensetzung des gesamten Wirkungsgrades erkannt werden. So wird bei der Berechnung zwischen dem Wirkungsgrad des Stacks und dem des Leistungselektronischen Systems unterschieden. Der Wirkungsgrad des Stack setzt die

thermisch zugeführte Energie ins Verhältnis zur Klemmleistung des Stack. Unter der Berücksichtigung der allgemein sinkenden Stackleistung, durch den unter Kapitel 8.1 beschriebenen Effekt, scheint sich die Begrenzung der maximalen Stromänderungsgeschwindigkeit positiv auf die Stackleistung auszuwirken.



Abbildung 63: Wirkungsgrad des Stack bei einer Variation der Stromänderungsgeschwindigkeit dl und einer chronologischen Nummerierung Nr.1 bis Nr.9 der Messreihen

Ein Unterschied der begrenzten Stromänderungsgeschwindigkeit kann dazu führen, dass das System häufiger in Bereichen betrieben wird, in denen höhere Wirkungsgrade erzielt werden. So kann ein optimal ausgelegtes und mit einem sehr großen Zwischenspeicher versehenes Hybridsystem dazu führen, dass das Brennstoffzellensystem permanent in dem Punkt eines optimalen Wirkungsgrades betrieben wird. Bei einem nicht hybridisierten System ist dagegen die Stromhäufigkeitsverteilung des Brennstoffzellensystems direkt von der Leistungsverteilung des Lastprofils und der jeweiligen Stackspannung abhängig. Eine Betrachtung der Stromhäufigkeitsverteilung (Abbildung 64; Aus Gründen der Übersicht werden hier nur die ersten fünf Messreihen dargestellt) gibt aber keinen deutlichen Hinweis auf die Ursache des veränderten Wirkungsgrades. Einzig im Bereich zwischen 2,5 A und 7 A ist der Trend zu erkennen, dass mit einer höheren dynamischen Entlastung sich die Stromhäufigkeitsverteilung in den Bereich oberhalb von 5 A verschiebt und somit die wirkungsgradtechnisch gesehen ungünstigeren Bereiche unterhalb von 3,5 A vermieden werden (Abbildung 50). Da sich die Unterschied des Wirkungsgrades im Bereich eines Prozentes bewegen, kann dieser kleine Unterschied in der Verteilung durchaus eine Erklärung sein.

Die Messungen lassen aber vermuten, dass deutliche Wirkungsgradverbesserungen über die Verschaltung mit dem "Standby" Zustand zu erwarten sind (Kapitel 6.1.2). Mit einer sinnvollen Implementierung des Zustandes in der Energiemanagement-Einheit kann der Peak der Stromhäufigkeitsverteilung bei 2,25 A vermieden und auf wirkungsgradtechnisch günstigere Bereiche verlagert werden.



Abbildung 64: Stromhäufigkeitsverteilung der ersten fünf Messreihen

Der Wirkungsgrad des leistungselektronischen Systems setzt die Klemmleistung der Brennstoffzelle ins Verhältnis zur elektrisch nutzbaren Energie am 24 V-Bus. Dieser Wirkungsgrad sinkt bei einer Reduzierung der maximalen Stromänderungsgeschwindigkeit (Abbildung 65). In diesem Falle findet eine vermehrte Be- und Entladung des Superkondensators statt bei der jeweils eine verlustbehaftete Spannungswandlung erfolgt. Für die Berechnung des Gesamtwirkungsgrades heben sich diese beiden gegenläufigen Effekte wieder auf.



Abbildung 65: Wirkungsgrad der Leistungselektronik bei einer Variation der Stromänderungsgeschwindigkeit dl und einer chronologischen Nummerierung Nr.1 bis Nr.9 der Messreihen

# 9 Experimenteller Funktionsnachweis an der TU Chemnitz (FS2)

# 9.1 Funktionsnachweis Primärregelung

Abbildung 66 bis Abbildung 69 demonstrieren die Grundfunktionen der Primärregelung der DC/DC-Wandlereinheit, nämlich zum einen die stabile Ausregelung der Busspannung auf 24 V und zum anderen die Ausregelung bzw. Folgeregelung des Brennstoffzellenstroms auf einen vorgegebenen Sollwert oder nach einem vorgegebenen Sollwertverlauf (Testsignalgenerierung). Es wird ein sehr gutes Regelverhalten erreicht.



Abbildung 66: stabile Ausregelung der Busspannung und dynamische Entlastung der Brennstoffzelle bei sinusförmigem Lastprofil



Abbildung 67: dynamische Entlastung der Brennstoffzelle bei sinusförmigem Lastprofil



Abbildung 68: Generierung von Testsignalen für die Zustandsdiagnose [Boc10\_2]

#### 9.2 Funktionsnachweis Sekundärregelung

Abbildung 69 zeigt die Beschränkung des Leistungsgradienten der Brennstoffzelle durch die Sekundärregelung. Die Lastsprünge werden geglättet, die Brennstoffzelle folgt mit Verzögerung (dargestellt ist nicht die Brennstoffzellen-Leistung am Bus, daher muss keine Übereinstimmung zwischen  $P_{Last}$  und  $P_{BZ}$  sein), der Superkondensator übernimmt die Bereitstellung der Differenzleistung und die Abfederung der Leistungsspitzen.



Abbildung 69: Verzögerung und Glättung der Brennstoffzellenleistung bei Lastsprung [Pau11]

Abbildung 70 zeigt die experimentellen Ergebnisse der Leistungsflussaufteilung für ein synthetisches Lastprofil (rot). Man erkennt deutlich, dass der Arbeitsbereich der Brennstoffzelle (blau) begrenzt ist und die Brennstoffzelle folglich von Lastspitzen und Alterung im Extremteillastbetrieb verschont bleibt. Weiterhin erkennt man die gewünschte Beschränkung des Leistungsgradienten der Brennstoffzelle und die damit verbundene dynamische Entlastung. Diese Maßnahmen tragen zur Steigerung der Brennstoffzellenlebensdauer bei.



Abbildung 70: synthetisches Lastprofil zum Test des Energiemanagement-Verfahrens [Pau11]

# 9.3 Demonstrationsanwendung

Als Demonstrationsanwendung kam die in Abbildung 71 dargestellte, an der Professur für Systemtheorie an der TU Chemnitz entwickelte, mobile autonome Transportplattform zum Einsatz. Nach einem "Trockentest" mit emulierten Last- bzw. Fahrprofilen am Hybridsystem-Versuchsstand wurden alle Komponenten auf die Transportplattform montiert, um die "FC-Hybrid-Control"-Einheit unter realen Betriebsbedingungen im Betrieb auf der Transportplattform untersuchen zu können. Dabei wurden zahlreiche Experimente durchgeführt und die Funktionalität aller Baugruppen sowie des erarbeiteten Energiemanagement-Verfahrens nachgewiesen [Pau11].


Abbildung 71: Demonstrationsanwendung an der TU Chemnitz: mobile autonome Transportplattform mit Brennstoffzellen-Hybridstromversorgung

Abbildung 72 zeigt ein typisches experimentell aufgenommenes Fahrprofil der Transportplattform. Deutlich sichtbar sind verschiedene Lastabschnitte mit unterschiedlicher Leistungsaufnahme und Dynamik. In [Pau11] wurden die Funktionalität der Sekundärregelung und des Energiemanagement-Verfahrens für zahlreiche Kombinationen und Variationen dieser Lastabschnitte untersucht.



Abbildung 72: Fahrprofil der mobilen Transportplattform und Unterteilung in typische Abschnitte

Abbildung 73 und Abbildung 74 zeigen beispielhaft die Ergebnisse für eine wiederholte Laborfahrt. Es ergibt sich eine deutliche dynamische Entlastung der Brennstoffzelle von 85 % bzw. 66 % und eine Verbrauchsreduzierung von ca. 2 %. Die Verbrauchsreduzierung fällt wegen der kleinen Direktspeicherkapazität (Superkondensator mit ca. 2 Wh) gering aus und könnte durch die Verwendung eines Batteriespeichers mit größerer Kapazität und durch die Optimierung des Arbeitsbereichs noch gesteigert werden.



Abbildung 73: Laborfahrt: 85 % dynamische Entlastung, 2 % Verbrauchsreduzierung (KFR=0.25, KLR=3, dlmax=1A/s, lmin=1.5A, lmax=12A)



Abbildung 74: Laborfahrt: 66% dynamische Entlastung, 2% Verbrauchsreduzierung (KFR=0.25, KLR=3, dlmax=1 A/s, lmin=1.5 A, lmax=12 A)

# **10 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Ergebnisse dieses Projekts sind wesentliche Fortschritte in den folgenden Technologiebereichen:

DC/DC-Wandlersystems mit Energiemanagement-Einheit (TU Chemnitz)	An der TU Chemnitz wurden zwei Wandlersysteme bestehend aus insgesamt vier DC/DC-Wandlermodulen und zwei Energiemanagement-Einheiten entwickelt, aufgebaut, optimiert, vermessen und erfolgreich eingesetzt.
Entwicklung eines Brennstoffzellensystems (ZBT Duisburg)	Entwicklung eines modular einsetzbaren Brennstoffzellensystems, das durch Standard-Baumaße und eindeutige Schnittstellen in unterschiedliche Anwendungen integrierbar ist.
<b>Energiemanagementverfahren</b> Ziele: Versorgungssicherheit, geringe (dynamische) Brennstoffzellen- Beanspruchung, hohe Effizienz (TU Chemnitz)	Ein neues optimierendes Energiemanagement-Verfahren wurde an der TU Chemnitz entwickelt, implementiert und für reale Lastprofile und eine mobile Demonstrations- anwendung getestet.
Aktive Nutzung des Brennstoffzellen- Stroms zur Zustandsdiagnose Aussagen zur Brennstoffzellen- Lebensdauer sowie zu im aktuellen Betriebszustand förderlichen und unerwünschter Stromänderungen (ZBT Duisburg)	Die Teilsysteme konnten am ZBT erfolgreich gekoppelt und betrieben werden. Es konnten Verfahren zur Online- Analyse entwickelt und getestet werden. Die Systeme konnten im Hybridverbund online aktiviert und auf einem hohen Wirkungsgradniveau betrieben werden.

### Tabelle 9: Überblick über wichtige Projektergebnisse

Im Projekt wurde eine flexible **wandlerbasierte Energiemanagement-Einheit** für Brennstoffzellen-Hybridsysteme einer Leistungsklasse von 400-1200 W am Beispiel der Integration einer Superkondensator-Einheit als Direktspeicher realisiert. Folgende technischen Verbesserungen gegenüber einer autarken Energieversorgung auf ausschließlich Brennstoffzellenbasis konnten erreicht werden:

- Erhöhung der Leistungsdichte und Reduktion der Systemkosten (aufgrund einer kleineren Brennstoffzelle und einer Superkondensator-Einheit als Leistungspuffer)
- verminderter dynamischer Stress und gleichmäßigere Medienversorgung für die Brennstoffzelle sowie Reduzierung weiterer Belastungseinflüsse
- Verbesserung der dynamischen Eigenschaften und der Überlastfähigkeit des Systems
- leichte Erhöhung der Effizienz (Betrieb der Brennstoffzelle in Arbeitspunkten hoher Wirkungsgrade und Reduzierung peripherer Verluste, z.B. des Zuluftgebläses)

Aufgrund der Notwendigkeit leistungselektronischer Wandler in Brennstoffzellen-Hybridsystemen und dem Fehlen flexibler und anpassbarer Lösungen auf dem Markt, wurde in diesem Projekt eine neue Hardwareplattform zur Steuerung der Leistungsflüsse und zur Spannungsanpassung mit folgenden Zielsetzungen entwickelt:

- bewährte DC/DC-Wandler-Topologie angepasst an den Brennstoffzellen typischen weiten Eingangsspannungsbereich (bei vergleichsweise großen Strömen)
- gestaffelte Regelungsarchitektur (Primärregelung, Energiemanagement)
- umfangreiche Messwerterfassung als Basis für Energiemanagementprozesse

Dabei wurde die Wandlerauslegung sowohl unter dem Gesichtspunkt der Wirkungsgradoptimierung (geringe Schalt- und Leitverluste) als auch unter dem Gesichtspunkt des schonenden Betriebs der Brennstoffzelle (definierte Verzögerung des Arbeitspunktwechsels bei dynamischer Lastanforderung) durchgeführt. Zusätzlich zum Nutzen des reinen Leistungstransfers wurden mit Hilfe dieses Wandlers zum Teil neue Verfahren zur Optimierung der Betriebsführung von Brennstoffzellen erprobt und integriert. Hierfür wurden Untersuchungen im Bereich der Regelung und des Energiemanagements des Hybridsystems sowie Untersuchungen zur aktiven Beeinflussung von Brennstoffzellen-Systemen durch Stromregelung durchgeführt. Der entscheidende innovative Beitrag ist die Kombination der Einzelstrategien zu einer hoch integrierten Systemsteuerung, die die Optimierungsziele Versorgungssicherheit, Effizienz und Lebensdauer des Gesamtsystems und seiner Teilkomponenten miteinander verbindet.

Im Rahmen des Projektes wurde ein **Brennstoffzellensystem** entwickelt, das in mehrfacher Hinsicht optimiert und für die Schnittstellen des Hybridsystems angepasst wurde. Eine intelligente Definition der Schnittstellen macht das System in weiteren Bereichen einfach integrierbar. Folgende Punkte können dabei aufgelistet werden:

- Anpassung der Brennstoffzelle für eine 24 V Anwendung mit einer Leistung von 500 W durch einen Stack mit 38 Zellen
- Systematische Optimierung regelungstechnischer Parameter und Regler im Bereich der Kathodenversorgung, Anodenversorgung/Purgezyklus und der Betriebstemperatur.
- In Teilbereichen sind bis zu 10 % Wirkungsgradsteigerung erzielt worden
- Anpassung der Betriebsstrategie des Brennstoffzellensystems im Sinne einer optimalen Ausnutzung der Möglichkeiten, die durch ein derart flexibel hybridisiertes System gegeben sind. Anpassung im Bezug auf den Wirkungsgrad und die Vermeidung alterungstechnisch sensibler Betriebsbereiche

Die Integration des Brennstoffzellensystems in der flexibeln Wandlerumgebung ermöglicht einen gezielten Betrieb des Brennstoffzellensystems unter definierbaren Rahmenbedingungen. Der gekoppelte Betrieb konnte erfolgreich getestet werden und die Rahmenbedingungen wurden optimiert. Dabei wurden folgende Ziele Erreicht:

- Begrenzung des Betriebsbereichs des Brennstoffzellensystems auf einen Bereich optimalen Betriebs und Wirkungsgrades
- Abdeckung der Spitzenleistungen und dynamischen Lastfolgen durch eine Nutzung der Superkondensator-/Wandler-Einheit als dynamische steuerbare Einheit
- dynamische Entlastung des Brennstoffzellensystems durch eine begrenzte maximale Stromänderungsgeschwindigkeit

Neben allgemeiner Betriebs- und Systementwicklungen konnte das Ziel einer Schnellcharakterisierung im laufenden Betrieb erreicht werden. Zusätzlich wurden Methoden zur Aktivierung der Brennstoffzelle in dem Falle eines unzureichenden Betriebszustandes erarbeitet.

- Untersuchung gängiger Brennstoffzellencharakterisierungen auf eine mögliche Implementierung als Methode zur Schnellcharakterisierung des Brennstoffzellensystems
- Erarbeitung verschiedener Aktivierungsmethoden im Rahmen der Möglichkeiten des Brennstoffzellensystems
- Implementierung einer Online-Analyse zur Zustandserkennung in Form einer dynamischen Polarisationskurve
- Echtzeitauswertung der Messwerte von dem Brennstoffzellencontroller
- Implementierung einer automatischen Routine zur Aktivierung der Brennstoffzelle in dem Falle eines unzureichenden Zustandes

Somit steht als Ergebnis eine hoch integrierte Systemlösung aus Wandler- und Energiemanagement-Hardware sowie Diagnose- und Energiemanagement-Software für Brennstoffzellen-Hybridsysteme zur Verfügung. Mit der Minimierung der Optimierungskriterien dynamische Beanspruchung der Brennstoffzelle und Wandlungsverluste ist eine Senkung der Investitions-, der Betriebs- und der Wartungskosten erreichbar. Zusätzlich führt die technische Integration der Wandler- und Steuerungskomponenten zu einer Kostenreduktion. Das integrierte Wandler-/Energiemanagementkonzept kann seinen Einsatz sowohl zur Versorgung von mobilen Systemen (z.B. elektrische Kleinfahrzeuge, Transportplattformen) als auch dezentralen portablen und stationären Anwendungen (tragbare Stromerzeuger, Unterbrechungsfreie Stromversorgung, etc.) finden. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die methodischen Ansätze auch auf Brennstoffzellen-Hybridsysteme höherer Leistung (zum Beispiel im KFZ-Bereich) skaliert werden können.

Folgende weitere spezifische Erfahrungen konnten im Verlaufe des Projekts gesammelt werden:

- Die Brennstoffzelle sollte im Verhältnis zum Wasserstoffspeicher klein ausgelegt werden (Kostenreduzierung und Steigerung der Energiedichte, Ziel: Energiedichte größer als die handelsüblicher Lithium-Ionen Batterien)
- Die Größe des Direktspeichers ist entscheidend für die erzielbare Effizienzsteigerung und für die möglichen Testsignale
- Das anwendungstypische Lastprofil bestimmt die Wahl des Direktspeichers und überhaupt, ob ein Hybridsystem sinnvoll ist. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn sich Spitzenleistung und mittlere Leistung signifikant unterscheiden
- Die Wahl der Leistung der Brennstoffzelle sollte sich am Mittelwert der Lastleistung orientieren
- Ein Hybridsystem mit Superkondensator erfordert zwei DC/DC-Wandler, um die volle Kapazität des Superkondensators ausnutzen zu können und gleichzeitig dem Verbraucher eine konstante Ausgangsspannung zu garantieren
- Die Wahl der DC/DC-Wandlertopologie muss mit der Brennstoffzelle und der zu realisierenden Busspannung abgestimmt werden, günstig ist die Verwendung einer robusten, kostengünstigen und effizienten Wandlertechnologie (z.B. Tiefsetzsteller). Der Spannungsbereich der Brennstoffzelle kann ggf. durch die Variation der Zellenzahl und der Querschnittsfläche ein Stück angepasst werden
- Die Versorgung peripherer Komponenten (z.B. Gebläse der Brennstoffzelle) vom Hybridsystembus ist sinnvoll und garantiert auch hier die dynamische Entlastung der Brennstoffzelle

- Optimierendes Energiemanagement-Verfahren:
  - Die Primärregelung ermöglicht eine separate Regelung der Busspannung und des Brennstoffzellenstroms
  - Die Sekundärregelung ermöglicht die aktive Begrenzung des Brennstoffzellenstroms und des Stromgradienten sowie die Laderegelung des Direktspeichers
  - Die übergeordnete Systembetriebsführung ermöglicht die Optimierung von Gütewerten (z.B. Verbrauchsreduzierung an Wasserstoff und dynamische Entlastung der Brennstoffzelle)

Das Projekt konnte so erfolgreich abgeschlossen werden.

## 11 Veröffentlichungen

- [Boc10\_1] Bocklisch, Th.: "Optimierendes Energiemanagement von Brennstoffzelle-Direktspeicher-Hybridsystemen", Dissertation an der TU Chemnitz, Chemnitz, März, 2010
- [Boc10\_2] Bocklisch, Th.; Warsitz, R.; Paulitschke, M.; Besorna, K.; Schufft, W.; Bocklisch, S.F.: "Modelling and control of a DC/DC-converter system for fuel cell – direct storage – hybrid units", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion – PCIM, Nürnberg, 2010
- [Boc10\_3] Bocklisch, Th; Schufft, W.; Bocklisch, S.F.: "Optimizing Energy Management of Decentralized Photovoltaic – Fuel Cell – Direct Storage – Power Supply Units", 5th European Conference on PV-Hybrid System and Mini-grids, Tarragona, Spain, 2010
- [Boc09\_1] Bocklisch, Th.; Paulitschke, M.; Bocklisch, S.F.; Beckhaus, P.: "Control-oriented, optimizing energy management concept for fuel cell hybrid systems", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion – PCIM, Nürnberg, 2009
- [Boc09\_2] Bocklisch, Th.: "Optimierendes Energiemanagement für dezentrale Photovoltaik Brennstoffzelle – Direkt-speicher – Energieversorgungseinheiten", 4. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien (IRES2009), Berlin, 24.-25.11. 2009
- [Göß09\_1] Sönke Gößling, Peter Beckhaus, Thorsten Notthoff, Sina Souzani, Michael Schoemaker, Angelika Heinzel: Hydrogen powered fuel cell systems - different designs for variable specifications - Hydrogen + Fuel Cells 2009: International Conference + Trade Show, Vancouver
- [Göß09\_2] Sönke Gößling, Peter Beckhaus, Angelika Heinzel: Hydrogen powered fuel cell systems interaction of simulation and real systems 6th Symposium on Fuel Cell Modelling and Experimental Validation, Karlsruhe, März 2009

# 12 Quellenverzeichnis

- [And02] B. Andreaus, Die Polymer-Elektrolyt Brennstoffzelle-Charakterisierung ausgewählter Phänomene durch elektrochemische Impedanzspektroskopie; Dissertation, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002
- [Ash06] Ashtiani, C.; Wright, R.; Hunt, G.: "Ultracapacitors for automotive applications," Journal of Power Sources, 2006, pp. 561–566
- [BA06] Bedienungsanleitung Outdoor Brennstoffzellen-Stromversorgung LG22T2 / LG45T2, Firma Flexiva, Chemnitz, 2006
- [BA07] Bedienungsanleitung EFOY UM1 Automatic Charge Control 1600 | 1200 | 600; SFC Smart Fuel Cell AG, 85649 Brunnthal, 2007
- [Bar04] El-Barbari: "Steuerung und Regelung eines Vierphasenwechselrichters an Photovoltaik-Inselnetzanlagen", Dissertation TU Chemnitz, 2004
- [Beck] P. Beckhaus, S. Souzani, T. Notthoff, M. Schoemaker, A. Heinzel, L. Frahm, Nutzung des Kathodenabgases aus Brennstoffzellen für medizinische und sportliche Anwendungen; Brennstoffzelle - Forschung - Demonstration -Anwendung - VDI-Berichte 2036 - ISBN 978-3-18-092036-8

- [Beck06] Beckhaus, P.; Burfeind, J.; Kreuz, C.; Matten, C.; Souzani, S.; Heinzel, A.: PEM fuel cell stacks and efficient system topologies for hydrogen based low power applications; Fuel Cell Science & Technology 2006 - Scientific Advance in Fuel Cell Systems, 13.-14. September 2006, Turin, Italien
- [Beck07] Beckhaus, P.: Optimized fuel cell stacks for portable and mobile applications Hydrogen & Fuel Cells 2007: International Conference and Trade Show -Vancouver, Kanada, 29. April - 02. Mai 2007
- [Boc06] Bocklisch, T.; Graube, L.; Hofmann, W.: "Modular DC/DC-converter concept for a multi-storage hybridsystem", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion PCIM, Nuernberg, 2006
- [Boc07\_1] Bocklisch, T.; Hofmann,W.: "Optimal and predictive energy management of photovoltaic-fuel cell hybrid systems with short-time energy storage", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion PCIM, Nuernberg, 2007
- [Boc07\_2] Trompke,W.-J.; Bocklisch,T. et al: "Optimal design of fuel cell-battery hybrid power supplies for mobile transport platform applications", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion PCIM, Nuernberg, 2007
- [Boc09\_1] Bocklisch, Th.; Paulitschke, M.; Bocklisch, S.F.; Beckhaus, P.: "Control-oriented, optimizing energy management concept for fuel cell hybrid systems", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion – PCIM, Nürnberg, 2009
- [Boc09\_2] Bocklisch, Th.: "Optimierendes Energiemanagement für dezentrale Photovoltaik Brennstoffzelle – Direktspeicher – Energieversorgungseinheiten", 4. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien (IRES2009), Berlin, 24.-25.11. 2009
- [Boc10\_1] Bocklisch, Th.: "Optimierendes Energiemanagement von Brennstoffzelle-Direktspeicher-Hybridsystemen", Dissertation an der TU Chemnitz, Chemnitz, März, 2010
- [Boc10\_2] Bocklisch, Th.; Warsitz, R.; Paulitschke, M.; Besorna, K.; Schufft, W.; Bocklisch, S.F.: "Modelling and control of a DC/DC-converter system for fuel cell – direct storage – hybrid units", Conference on Power Conversion and Intelligent Motion – PCIM, Nürnberg, 2010
- [Boc10\_3] Bocklisch, Th; Schufft, W.; Bocklisch, S.F.: "Optimizing Energy Management of Decentralized Photovoltaic – Fuel Cell – Direct Storage – Power Supply Units", 5th European Conference on PV-Hybrid System and Mini-grids, Tarragona, Spain, 2010
- [Bul07] Kevin Bullis: Batterien verbilligen Brennstoffzellen-Autos; Technology Review 13.03.2006 (http://www.heise.de/tr/artikel/70741 Status Juni 2007)
- [Bull02] Buller, S.; Karden, E.; Kok, D.; De Doncker, R.W. : "Modeling the dynamic behavior of supercapacitors using impedance spectroscopy", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 6, 2002, pp. 1622-1626
- [Bull05] Buller, S.; Thele, M.; De Doncker, R., Karden, E.: "Impedance-based simulation models of supercapacitors and Li-ion batteries for power electronic applications," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, 2005, pp. 742-747
- [Burk00] Burke, A.: "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", Journal of Power Sources, 2000, pp. 37-50
- [Chiu06] H.-J. Chiu, L.-W. Lin: A Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicle Driving System; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 4, July 2006
- [Chiu06] Chiu, H.J.; Lin, L.W.: "A Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicle Driving System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 4, July 2006

- [Creuz08] C. Kreuz, PEM-Brennstoffzellen mit spritzgegossenen Bipolarplatten aus hochgefülltem Graphit-Compound; Dissertation, 2008
- [Cuk76] Cuk, S.; Middlebrook, R.D.: "A general unified approach to modelling switchingconverter power stages", Power Electronics Specialists Conference, Cleveland, Ohio; United States, 8-10 June 1976, pp. 18-34
- [Cuk78] Cuk, S.; Middlebrook, R.D.: "Modelling, Analysis and Design of Switching converters", California Institute of technologies, Pasadena, California 1978
- [Des06] B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer: "A new interleaved multi-channel DC/DC converter specially dedicated to low voltage, high current applications; Conference on Power Electronics and Intelligent Motion PCIM", Nuernberg, 2006
- [Des06] Destraz, B.; Barrade, P.; Rufer, A.: "A new interleaved multi-channel DC/DC converter specially dedicated to low voltage, high current applications", Conference on Power Electronics and Intelligent Motion PCIM, Nürnberg, 2006
- [Doug04] Dougal, R.A.; Gao, L.; Liu, S.: "Ultracapacitor model with automatic order selection and capacity scaling for dynamic system simulation", Journal of Power Sources, 2004, pp. 250-257.
- [Eng01] Engler, A.: "Regelung von Batteriestromrichtern in modularen und erweiterbaren Inselnetzen", Dissertation an der Universität Kassel, 2001
- [Föll94] Föllinger, O.: "Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung", 8. Auflage, Hüthig Buch Verlag, Heidelberg 1994
- [FC07] Friedrich, W., FuelCon AG: "Grenzen der Current Interrupt (CI) Methode im Vergleich zur Impedanzspektroskopie (EIS)", Anwendungsbericht, 2007
- [Gar06] O. Garcia, P. Zumel, A. de Castro, J. A. Cobos: Automotive DC-DC Bidirectional Converter Made With Many Interleaved Buck Stages; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 3, May 2006
- [Garc06] Garcia, O.; Zumel, P.; de Castro, A.; Cobos, J.A.: "Automotive DC-DC Bidirectional Converter Made With Many Interleaved Buck Stages", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 3, May 2006
- [Göß09\_1] Sönke Gößling, Peter Beckhaus, Thorsten Notthoff, Sina Souzani, Michael Schoemaker, Angelika Heinzel: Hydrogen powered fuel cell systems - different designs for variable specifications - Hydrogen + Fuel Cells 2009: International Conference + Trade Show, Vancouver
- [Göß09\_2] Sönke Gößling, Peter Beckhaus, Angelika Heinzel: Hydrogen powered fuel cell systems - interaction of simulation and real systems - 6th Symposium on Fuel Cell Modelling and Experimental Validation, Karlsruhe, März 2009
- [Gräs00] Gräser, D., Schmid, C.: "Supercap: Grundlagen Eigenschaften Anwendungen", Semesterarbeit in Technologie und Deutsch, 2000 http://home.datacomm.ch/graeser/Dateien/supercap.pdf
- [Ham98] C.H. Hamann, W. Vielstich, Elektrochemie, 3., vollständig überarbeitete Auflage, Wiley-VCH, 1998
- [Han03] Handschin, E.; Neumann, H.: "Betrieb und Optimierung dezentraler Anlagen", Tagungsband zum 8. Kasseler Symposium Energie-Systemtechnik, Energie und Kommunikation, Kassel 13.-14. Nov. 2003
- [Haub08] J. Haubrock, Parametrierung elektrischer Äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen; Dissertation, Universität Magdeburg, 2008
- [Him91] Himmelstoss, F.A.; Zach, F.C.: "State Space Control for a Step-Up Converter", 13th International Telecommunications Energy Conference, 1991
- [Hinds09] G. Hinds, M. Stevens, J.Wilkinson, M. de Podesta, S. Bell Novel in situ measurements of relative humidity in a polymer electrolyte membrane fuel cell; Journal of Power Sources 186 (2009) 52–57

- [Kaz08] Herstellung und Charakterisierung von Membran-Elektroden-Einheiten für Niedertemperatur Brennstoffzellen, Dissertation, Universität Stuttgart, 2008
- [Key03] Key, T.S.; Sitzlar, H.E.; Geist, T.D. "Fast Response, Load-Matching Hybrid Fuel Cell: Final Technical Progress Report", NREL/SR-560-32743. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, June 2003.
- [Kuhn06] H. Kuhn, Charakterisierung von Polymer-Elektrolyt Brennstoffzellen mittels Elektrochemischer Impedanzspektroskopie; Dissertation; Universität Karlsruhe, 2006
- [Kund08] Sumit Kundu et al., "Degradation analysis and modeling of reinforced catalyst coated membranes operated under OCV conditions", Journal of Power Sources 183 (2008) 619–628
- [Lapp87] Lappe, R.; Conrad, H.; Kronberg, M.: "Leistungselektronik", 1. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1987
- [Lev63] De Levie, R.: "On porous electrodes in electrolyte solutions", Electrochimica Acta, Vol. 8, pp. 751-780, 1963
- [Max08] Maxwell: "Datenblatt Maxwell BOOSTCAP", Maxwell Technologies SA, 2008
- [Mell00] Mellor, P.H.; Schofield, N.; Howe, D.: "Flywheel and supercapacitor peak power buffer technologies," IEE Seminar of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, Durham, April 2000, pp. 8/1-8/5.
- [Mohr] Malte Mohr, Friedrich W. Fuchs:Comparison of Three Phase Current Source Inverters and Voltage Source Inverters Linked with DC to DC Boost Converters for Fuel Cell Generation Systems
- [Myr00] Myrzik, J.:,,Topologische Untersuchungen zur Anwendung von tief-/hochsetzenden Stellern für Wechselrichter", Dissertation an der Universität Kassel, 2000
- [Nic98] U. Nicolai, T. Reimann, J. Petzoldt, J. Lutz: Applikationshandbuch IGBT- und MOSFET-Leistungsmodule, Verlag ISLE, SEMIKRON International, S. 4, 1998
- [Nic98] Nicolai, U.; Reimann, T.; Petzoldt, J.; Lutz, J.: "Applikationshandbuch IGBT- und MOSFET-Leistungsmodule", Verlag ISLE, SEMIKRON International, S. 4, 1998
- [Oliv06] Olivia, A.R.; Ang, S.S.; Bortolotto, G.E.: "Digital Control of a Voltage-Mode Synchronous Buck Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 1, Jan. 2006
- [PA1] Projektantrag "Entwicklung, Erprobung und Optimierung eines neuen Antriebskonzeptes mittlerer Leistung mit Brennstoffzellentechnik", Forschungsvereinigung Antriebstechnik, Universität Duisburg-Essen (EUT, SRS), AiF-FVA 14858N
- [Peng04] F. Z. Peng, H. Li, G.-J. Su, J. S. Lawler: A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 1, January 2004
- [Peng04] Peng, J.A.; Li, H.; Su, G.J.; Lawler, J.S.: "A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 1, January 2004
- [Pesch80] Peschel, M.: "Ingenieurtechnische Entscheidungen Modellbildung und Steuerung mit Hilfe der Polyoptimierung", Berlin: Verl. Technik, 1980, 1. Aufl., ISBN/ISSN 552 854 6
- [Schif05] J. Schiffer, O. Bohlen, D. U. Sauer, R. De Doncker, K. Ahn, Optimized Energy Management for FuelCell-SuperCap Hybrid Electric Vehicles, 2005 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC'05), September 7-9, Chicago, Illinois, USA

- [Schind06] L. Schindele, Einsatz eines leistungselektronischen Stellglieds zur Parameteridentifikation und optimalen Betriebsführung von PEM-Brennstoffzellensystemen; Dissertation, Universität Karlsruhe, 2006
- [Spyk00] Spyker, R.L.; Nelms, R.M.: "Classical equivalent circuit parameters for a doublelayer capacitor", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 36, pp. 829-836, 2000
- [Sur03] Surewaard, E.; Tiller, M.; Linzen, D.: "A comparison of different methods for battery and supercapacitor modelling" Sae Technical Paoer Series, 2003
- [Tao05] H. Tao, A. Kotsopoulos, J. L. Duarte, M. A. M. Hendrix: Multi-Input Bidirectional DC-DC Converter Combining DC-Link and Magnetic-Coupling for Fuel Cell Systems; Proceedings of 40th IAS, Hong Kong, 2005
- [Tao05] Tao, H.; Kotsopoulos, A.; Duarte, J.L. ; Hendrix, M.A.M.: "Multi-Input Bidirectional DC-DC Converter Combining DC-Link and Magnetic-Coupling for Fuel Cell Systems", Proceedings of 40th IAS, Hong Kong, 2005
- [Vor90] Vorpbrian, V.: "Simplified Analysis of PWM Converters Using Model of PWM Switch Part II: Discontinuous Conduction Mode", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 26, No. 3, 1990
- [Vlad] D. Vladikova, The technique of the differential impedance analysis Part I: Basics of the impedance spectroscopy
- [Wang03] Wang, J.; Peng, F.Z.; Anderson, J.; Joseph, A.; Buffenbarger, R.: "A New Low Cost Inverter System for 5 kW Fuel Cell", 2003 Fuel Cell Seminar, Miami 2003
- [Wu10] Jinfeng Wu et al., "Proton exchange membrane fuel cell degradation under close to open-circuit conditions Part I: In situ diagnosis", Journal of Power Sources 195 (2010) 1171–1176
- [Zub00] Zubieta, L.; Bonert, R.: "Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications", IEEE transactions on industry applications, vol. 36, pp. 199-205, 2000

## Zusätzliche Quellen

- [Nam03] Namisnyk, A.M.: "A survey of electrochemical supercapacitor technology", diplome thesis, Sydney University of Technology, 2003
- [Pau11] Paulitschke, M.: "Implementierung eines Energiemanagement-Verfahrens für eine Brennstoffzelle-Supercap-Hybrideinheit für eine mobile Anwendung", Diplomarbeit, TU Chemnitz, 2011

## ANHANG



Brennstoffzellen-System-Modul

#### Hintergrund

Die Brennstoffzellentechnologie ist dank hoher Wirkungsgrade und geringer Emissionen eine hochinteressante Option für die netzunabhängige Stromversorgung (engl.: Auxiliary Power Units, APU). Zahlreiche Spezialanwendungen erfordern minimale Startzeiten und hohe Dvnamiken. Hier ist Wasserstoff der optimale Energieträger für Brennstoffzellensysteme.

#### Modul-Konzept

In der Regel wird heute für die technische Integration der Brennstoffzelle in die jeweilige Anwendung mit hohem Aufwand das komplette Brennstoffzellensystem auf diese speziellen Anforderungen adaptiert. Um diesen Aufwand zu vermeiden hat das ZBT nun erstmals ein Brennstoffzellen-System-Modul entwickelt, das durch einfache Schnittstellen in zahlreiche Anwendungen zu integrieren ist. Das System hat ein 19" Gehäuse und für den Betrieb ist lediglich eine Wasserstoffversorgung und eine 24V Stützspannung notwendig.



#### Einsatzmöglichkeiten

Durch die modulare Systemtechnik und das gewählte Gehäusekonzept ist eine einfache Integration des Systems in verschiedene Anwendungen möglich. Die 19"-Gehäuse erlauben beispielsweise den Einbau in standardisierte Schaltschränke im Bereich Telekommunikation oder Gebäudetechnik. Der Leistungsbereich von 500 Watt im Dauerbetrieb bei 24 V<sub>DC</sub> adressiert aber auch zahlreiche andere Anwendungen, für die das gewählte Gehäusekonzept geeignet ist. Durch die modulare Bauform ist auch die Parallelschaltung mehrerer Module zur Realisierung größerer Leistungen möglich. Für Aufgaben im Bereich Forschung und Entwicklung können wesentliche Prozessparameter über die Datenschnittstelle bereitgestellt werden.

#### Kenndaten des Moduls

- Baugröße: 483 x 230 x 300 mm (B/H/T)
- · Gewicht: ca. 17 kg
- Luftgekühlter Stack mit 38 Zellen .
- Wasserstoffbetrieb (3.0) / 2 6 barabs
- Spannungsversorgung Periphere: 24 V<sub>DC</sub> •
- Ausgangsspannung: 20 V 35 V<sub>DC</sub>
- Dauerleistung: 500 W / max: 750 W
- Umgebungsbedingungen: 4 °C 30 °C
- Startzeit ca. 2 sec.
- Schnittstellen analog und digital (RS232)
- CE Zertifiziert



Mobiles 500 W BZ-System-Modul

#### Kooperation

Das ZBT bietet dieses System-Modul als solches zunächst zur Testung an, gerne stehen wir auch als Partner für eine Systementwicklung zur Verfügung, die sich auf die jeweilige Anwendung konzentriert.

#### Danksagung

Die Entwicklung dieses Moduls erfolgte im Rahmen des Projektes "Brennstoffzellen-Hybridsystem" 286 ZBG, gefördert im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung durch das BMWi über die AiF.

Zentrum für Brennstoffzellen Technik ZBT GmbH Carl-Benz-Straße 201 - D-47057 Duisburg Telefon +49-(0)203-7598-0 - Fax +49-(0)203-7598-2222 info@zbt-duisburg.de - www.zbt-duisburg.de Brennstoffzellen- und Systemtechnik Dr. Peter Beckhaus p.beckhaus@zbt-duisburg.de +49-(0)203-7598-3020

Kontakt