

Schlussbericht Dezember 2002

Personenwagen mit Brennstoffzellen- und Supercap-Antrieb

ausgearbeitet durch
Paul Scherrer Institut

CH-5232 Villigen PSI
Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie



Ausstellung des Versuchsfahrzeugs an einem eigenen Stand am Automobilsalon 2002 in Genf

Zusammenfassung

In einem Volkswagen BORA wurde ein Antriebsstrang realisiert, der ein Brennstoffzellensystem, bestehend aus 6 Stapeln mit je 8 kW elektrischer Leistung, einen elektrischen Zwischenspeicher, ausgestaltet mit 282 Supercap-Zellen, die gesamthaft 360 Wh Elektrizität speichern können, einen DCDC-Konverter und einen 75 kW-Elektromotor umfasst. Der Antriebsstrang wird geregelt über ein Energiemanagement, das die geforderte Leistung optimal auf die Brennstoffzelle und den Supercap verteilt. Das Brennstoffzellensystem erreicht über einen weiten Bereich des Betriebs einen Wirkungsgrad oberhalb von 40%. Der Antrieb wurde in einem 5 plätzigen PW integriert (Volkswagen BORA). Als HY.POWER[®] fuhr dieses als Technologieplattform aufgebautes Fahrzeug am 16. Januar 2002 über den Simplonpass. Damit konnte nachgewiesen werden, dass dieses Konzept die Reife erreicht hat, dass es auf öffentlichen Strassen betrieben werden kann und harte Testbedingungen bestehen kann. Die Kernelemente des Konzepts sind die Anwendung neuer Technik bei der Herstellung der Bipolarplatten für die Brennstoffzellen, dem Systemaufbau des Brennstoffzellensystems und der Weiterentwicklung der Energiedichte der Supercaps. Die Kombination von Brennstoffzelle und Supercap zusammen mit einem äusserst effizienten DCDC-Wandler führte zu einem neuartigen Antriebskonzept. Der Verbrauch im europäischen Testzyklus von 5-6 Litern Benzinäquivalent für ein Fahrzeug mit ca. 2000 kg Gewicht ist beachtlich.

Das Fahrzeug diente auch der Kommunikation der neuen Technik an die breite Öffentlichkeit. Neben der Passfahrt als Medienereignis wurde das Fahrzeug am Genfer Autosalon (März 2002) und am Earth-Summit in Johannesburg (September 2002) ausgestellt.

Summary

In a Volkswagen BORA a power train has been realized, which includes a fuel cell system consisting of 6 stacks with 8 kW electrical power output each, a electrical storage device that is realized with 282 supercap cells storing 360 Wh of electrical energy, a DCDC converter and a electric motor which delivers up to 75 kW. The power distribution between supercaps and fuel cell is managed by an energy management device, which optimize the distribution taking the actual operation points into account. The fuel cell system operates in a wide range with an efficiency higher than 40%. The power train has been integrated in a five seater car. This car named HY.POWER[®], realized as technology platform, drove over the Simplon pass on 16 January 2002. This test drive proved the maturity of this concept to drive this technology on public road and that also severe operating conditions can be handled successfully. The key aspects of that concepts are the new manufacturing process of the bipolar plates for the fuel cells, the system configuration of the fuel cell system and the enhanced energy density of the supercap cells. The combination of a fuel cell system, a supercap storage device and the integration of the DCDC converter lead to a new power train concept. The consumption in the NEDC is equal to the energy of 5-6 l gasoline, which is quite impressive if it is remebered that the car has a empty mass of nearly 2000 kg.

The HY.POWER[®] has been used heavily for the communication of the new technology to the public. The first event was the test drive across the Simplon pass. The main other events was the international auto motor show at Geneva in March 2002 and the presentation of the vehicle at the earth summit at Johannesburg in September 2002.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	4
2	Zielsetzungen dieses Projektes	6
3	Lösungsweg	6
4	Hauptergebnisse	7
5	Ergebnisorientierte Lösung der Teilaufgaben	8
5.1	Brennstoffzelle	8
5.1.1	Membranentwicklung	8
5.1.2	Stapelentwicklung	9
5.1.3	Brennstoffzellensystem	14
5.2	Superkondensatoren	17
5.2.1	Supercap-Zellenentwicklung	17
5.2.2	Ladungsausgleichselektronik	20
5.2.3	Ergebnisse der 10 kW-Modul-Untersuchungen	22
5.2.4	Aufbau der SC-Module für das Fahrzeug	24
5.2.5	Ergebnisse mit dem Fahrzeugmodul	25
5.3	Leistungselektronik	26
5.3.1	Konzeptauswahl und Realisierung	27
5.3.2	Messwerte des DCDC-Wandlers	29
5.4	Steuerung des Antriebstranges	30
5.4.1	Regelung des BZ-Systems	30
5.4.2	Energie-Management	31
5.4.3	Steuerungshardware	32
5.5	Fahrzeuganpassungen	32
5.5.1	Fahrzeugkonzept	32
5.5.2	Elektroantrieb	34
5.6	V Versuchsergebnisse mit dem Antriebssystem und dem HY.POWER®	36
5.6.1	Ergebnisse des dynamischen Prüfstandes	36
5.6.2	Messungen auf dem Rollenprüfstand	44
5.6.3	Versuchsfahrten auf der Strasse	47
6	Öffentlichkeitsarbeit	48
6.1	Passüberquerung	48
6.2	Automobilsalon Genf 2002	48
6.3	Pressekontakte	49
6.4	Umwelt-politische Öffentlichkeitsarbeit	49
7	Erkenntnisse	50
7.1	Brennstoffzelle	50
7.2	Supercaps	51
7.3	Systemaspekte	51
7.4	Projektmanagement	52
8	Nationale Zusammenarbeit	52
9	Internationale Zusammenarbeit	52
10	Literaturverzeichnis	53
10.1	Publikationen	53
10.2	Zeitungsartikel	54
10.3	Semester- und Diplomarbeiten	54

1 Ausgangslage

Im Bereich der individuellen Mobilität besteht ein ungebrochener Trend zu erhöhtem Verkehrsaufkommen. Weltweit prognostiziert die UNO einen Anstieg der Fahrzeuge von heute ca. 800 Mio auf 1600 Mio Fahrzeuge im Jahr 2030, was einer Verdoppelung gleichkommt. Dabei ist ein grosser Anteil dieses Wachstums nicht in Europa oder Amerika, sondern in Asien und Lateinamerika.

Gleichzeitig soll der Ausstoss an Treibhausgasen in dieser Zeit deutlich gesenkt werden. In der Schweiz ist der Verkehrssektor derjenige Bereich mit dem grössten Wachstum sowohl an Energieverbrauch als auch am Ausstoss von Treibhausgasen, da bis heute der Verkehr zu ca. 96% auf fossilen Treibstoffen basiert.

Der Wirkungsgrad von heutigen Personenwagen liegt im Bereich von 16-22%, falls die Fahrzeuge im neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) betrieben werden.

Mit den neuen Anstrengungen (gesetzliche Grenzwerte) zur Reduktion von limitierten Schadstoffen ist es gelungen den Anstieg des jährlichen Ausstosses zu bremsen und eine Trendumkehr zu erreichen. Dies gilt für HC und CO sehr deutlich, etwas weniger für das NOx. Bei den Partikeln wird dies mit der absehbaren Einführung von Partikelfiltersystemen auch erfolgen.

Aus den oben genannten Gründen ist es dringend erforderlich, neue Antriebs- und Fahrzeugformen zu entwickeln, die effizienter, noch sauberer und möglichst treibhausgas-neutral sein werden. Diese Antriebe werden aber nur eine Chance für einen breiten Einsatz haben, sofern die Wirtschaftlichkeit erreichbar ist.

Mit den Entwicklungen auf dem Sektor der Brennstoffzellentechnologie stehen heute Materialien zur Verfügung die es erlauben neue und deutlich effizientere Systeme darzustellen. Weiter ist bekannt, dass der Elektromotor eine ideale Antriebsquelle für den Personenwagen darstellt, da die Drehmomentcharakteristik und der weite Drehzahlbetriebsbereich dazu führen, dass eine hohe Fahrdynamik vom Stillstand weg erzeugt werden kann bei gleichzeitig einfacherem Triebstrang (Wegfall einer Kupplung und allfälligem Verzicht auf ein schaltbares Getriebe). Der Engpass war bis jetzt meist der elektrische Energiespeicher. Weiter ermöglicht der Einsatz einer Elektromaschine die Nutzung der Bremsenergie im Generatorbetrieb.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

2 Zielsetzungen dieses Projektes

Das Ziel dieses Projektes ist es aufzuzeigen, wie mit einem Personenwagen, der mittels einer Brennstoffzelle und einem Doppelschichtkondensator (Supercap) ausgerüstet ist, effiziente Mobilität als Schritt in Richtung eines nachhaltigeren Individualverkehrs erreicht werden kann.

- Darstellung eines Fahrzeuges mit einer Brennstoffzelle und einem Supercap-Modul
- Das Brennstoffzellensystem von ca. 30 kW soll mit gasförmigem Wasserstoff angetrieben werden, das in Hochdrucktanks gespeichert wird.
- Die Doppelschicht-Kondensatoren mit ca. 60 kW Leistung sollen Beschleunigungsvorgänge unterstützen und die Nutzung der Bremsenergie sicherstellen.
- Eine Leistungselektronik soll entwickelt werden, die wirkungsgradoptimiert die verschiedenen Energieflüsse ermöglicht und für einen Fahrzeugbetrieb geeignet ist.
- Ein Steuerungssystem soll entwickelt werden, das den wechselnden Anforderungen des Versuchsbetriebs gerecht wird und die die Funktionen des Energiemanagements übernehmen kann.
- Das Fahrzeug soll ein Leichtbaufahrzeug sein, mit dem ein Verbrauch von 30 kWh/100km erzielt werden kann.

Die Ergebnisse und die Darstellung es Fahrzeugs sollen genutzt werden, die Vorteile und das Potenzial der Brennstoffzellentechnik und die Möglichkeit der Schweizer Beteiligung in diesem Umfeld der breiten Öffentlichkeit vorzustellen.

3 Lösungsweg

Die Struktur des Antriebsstranges wird so gewählt, dass der Betrieb des gesamten Stranges optimiert wird. Zu diesem Zweck wurden die Leistungsstränge der Brennstoffzelle und des Supercaps (SC) über die Leistungselektronik an das Spannungsniveau des Zwischenkreises angepasst (vgl. Fig. 1). Dieser DCDC-Konverter regelt die Spannung des Zwischenkreises auf einem konstanten möglichst hohen Niveau, so dass die Elektromaschine leistungsoptimiert und bei besten Wirkungsgraden betrieben werden kann.

Die Realisierung des Gesamtantriebsstranges erfolgte in mehreren Schritten. Bereits in einem Vorprojekt wurde die prinzipielle Beherrschbarkeit der gewählten Kombination auf dem Niveau von max. 900 W für die BZ und 350W auf der SC Seite mit einem Prinzipaufbau des DCDC-Wandlers realisiert.

In einem zweiten Schritt wurde auf dem Niveau von einem 6 kW BZ-Stapel ein BZ-System entwickelt, dass über einen Luft-Verdichter verfügt und mit dem ein dynamischer BZ-Betrieb realisiert werden konnte. Dieses BZ-System wurde mit einem 10 kW SC-Modul und einem DCDC-Wandler gekoppelt und kann die Leistung auf eine elektronische Last abgeben. So kann ein Grossteil der Systemaspekte untersucht werden.

Als nächsten Schritt wurde ein Gesamtsystem aufgebaut, das als Gesamtsystem am dynamischen Prüfstand getestet wurde. Anschliessend fand der Einbau ins Fahrzeug und die Fahrversuche statt.

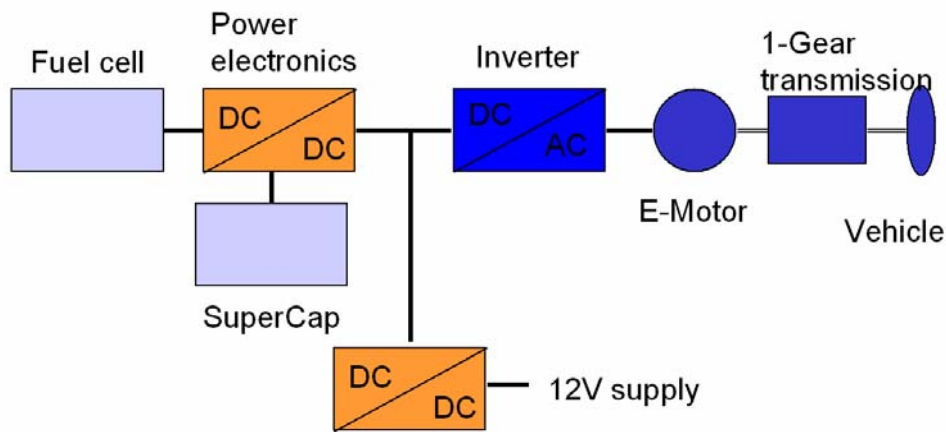


Figure 1: Schema des Antriebsstranges

Mit diesem Vorgehen mit verschiedenen Iterationen konnte das Projektrisiko gesenkt werden, da einerseits ein scale-up in mehreren Schritten erfolgen konnte und gleichzeitig Informationen über die komplexen Interaktionen möglichst früh erkannt und allenfalls korrigierend in die nächste Iteration einfließen konnten. Zusammen mit dem Ziel die Teilsysteme in möglichst selbständige Module zu unterteilen, konnte bei der Systemintegration die Fehlerquote relativ tief gehalten werden und sehr viel Zeit bei der Inbetriebnahme eingespart werden.

4 Hauptergebnisse

Als Hauptergebnis ist sicher die sichere Funktion des Antriebstranges in einem Fahrzeug auf öffentlichen Strassen zu nennen. Wir haben mit diesem Fahrzeug mehr als 1000 Versuchskilometer zurückgelegt (vgl. Fig. 2). Dabei haben sowohl die BZ wie auch die SC als Hauptkomponenten ihre Funktion bewiesen. Die Integration eines Abgasschalldämpfers stellte eine Verbesserung dar, wo mit kleinem Aufwand eine deutliche Reduktion der Schallemission erzielt werden konnte und so den Eindruck des Fahrzeugs stark verbessert werden konnte.

Neue Erkenntnisse konnten auf der Ebene des BZ-Systems sowie dem zeitlichen Verhalten der SC gewonnen werden. Auch der Einsatz der Hilfsantriebe zeigte auf, wo es durch den Einsatz von Wasserstoff, mehr aber noch durch den Einsatz von de-ionisiertem Wasser zu Korrosionsproblemen führen kann.



Figure 2: Fahrt an der Nordrampe des Simplon Passes.

Auf der Ebene der Öffentlichkeitsarbeit für den Fortschritt von Antriebskonzepten mit gutem Wirkungsgrad und dem Potenzial zur Nutzung nachhaltig erzeugter Energie kann dieses Projekt als sehr erfolgreich gewertet werden.

Das Projekt wurde in einem Beitrag der Sendung Menschen-Technik-Wissenschaft am SF 1 und Sat1 ausgestrahlt. Beiträge anlässlich der Passfahrt erfolgten in verschiedenen Radiostationen und Print-Medien.

Die Ausstellung des Versuchsfahrzeuges am internationalen Genfer Automobilsalon 2002 war das mediale Hauptereignis. Das Fahrzeug wurde anlässlich der Eröffnung des Salons zu bester Sendezeit im SF1 gezeigt (Tagesschau und 10vor10). Weitere TV-Stationen beschrieben das Fahrzeug in Sendungen. Das Interesse der Besucher war über die ganze Dauer der Ausstellung gross (Fig. 3), obwohl es sich um ein Prototypenfahrzeug handelt und nicht um ein käufliches Produkt.



Figure 3: Das Interesse am Fahrzeug anlässlich des Genfer Autosalons 2002 war gross.

5 Ergebnisorientierte Lösung der Teilaufgaben

In diesem Kapitel wird auf die detaillierten Ergebnisse der Teilprojekte eingegangen.

5.1 Brennstoffzelle

Bei der Brennstoffzelle wurden mehrere Teilaspekte angegangen. Zum einen wurde das Ziel verfolgt, in den Stapeln die am PSI entwickelte Membran einzusetzen. Weiter wurden Wege gesucht die Leistungsdichte im Stapel zu erhöhen und gleichzeitig die Leistung eines Stapels zu erhöhen. Letztendlich ging es darum, das Brennstoffzellensystem, bestehend aus dem Stapel, des Luft- und Wasserstoffkreislaufes und der Kühlung zu entwickeln, das in der Lage ist, das inzwischen erhöhte Ziel von 40 kW elektrische Nettoleistung bereitzustellen.

5.1.1 Membranentwicklung

Um die erforderliche Anzahl Membranen herzustellen, die es in diesem Projekt benötigt (für ca. 750 Zellen), ist eine zumindest teilweise industrielle Produktion notwendig. Innerhalb der Projektlaufzeit ist es aber nicht gelungen einen Industriepartner zu finden, der bereit war, die Membranen basierend auf dem PSI-Verfahren in der Quantität herzustellen. Für eine industrielle Fertigung ist das Los zu klein und ein kontinuierlicher Markt, der für eine rentable Membranproduktion erforderlich wäre, ist im Moment noch nicht abzusehen.

Die Herstellung der Membranen im Handbetrieb birgt, neben der Personalkapazität die dazu benötigt wird, auch das Risiko einer grösseren Qualitätsschwankung, die für den Testbetrieb mit den Stapeln sehr störend sein kann. Aus diesem Grund wurden im Fahrzeug Nafion-Mem-

branen von Dupont (112) und E-Tek Elektroden verwendet. Die Zusammenfügung zu einer Membran-Elektroden-Einheit erfolgte am PSI.

Neben der nicht erfolgreichen Suche nach einem industriellen Hersteller der Membran konnten die Eigenschaften der PSI-Membran in der Temperaturstabilität verbessert werden. Dies konnte auch in einem Langzeit-Test nachgewiesen werden (Fig. 4).

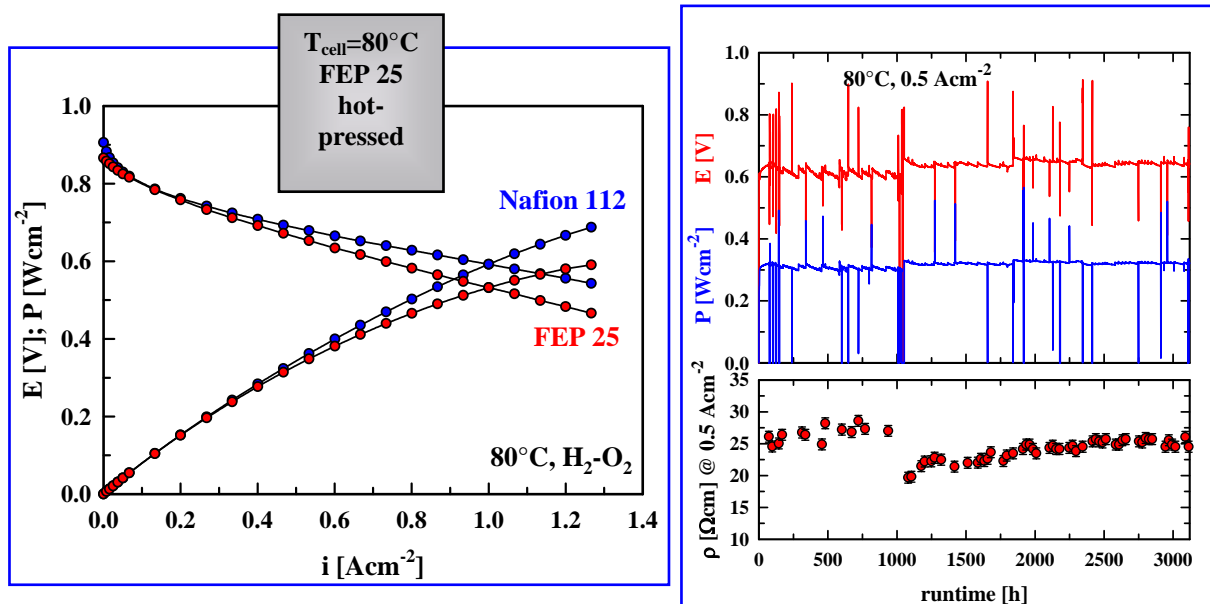


Figure 4: Vergleich der Nafion 112 und der PSI-Membran (FEP25) und 3000 Stundentest.

5.1.2 Stapelentwicklung

Bei der Stapelentwicklung konnte von den Vorentwicklungen der Dissertation Ruge profitiert werden. Als Hauptaufgaben stellten sich die Themata:

- Bipolarplattendesign für die Fertigung mittels Warmpressen
- Kleben der zwei Halbplatten und Dichtigkeitstest
- Dichtung über der Membran
- Endplattendesign
- Druckaufbau über dem Stapel zur Dichtung der einzelnen Zellen gegen aussen
- Elektrische Leitfähigkeit innerhalb des Stapels
- Zuführung der Medien
- Qualitätskontrolle der gefertigten Teile

Bipolarplattendesign: Mit dem Design der Bipolarplatten sind die Funktionen der Medienzuführung, Medienverteilung und Stromleitung auf kleinstem Raum durchzuführen. Zudem sind mit dem Design Möglichkeiten auszuschöpfen, um die Fertigungskosten der Platten zu reduzieren. Das gewählte Design ist sichtbar in Fig. 5.

Die Form wurde so gewählt, dass die Platten auch durch Warmpressen hergestellt werden konnten. Dieses Herstellverfahren bietet bei grösseren Stückzahlen Preisvorteile gegenüber dem heute üblichen Fräsen der Konturen. Die Laschen an der Aussenkontur sind die Sammler für die Zu- und Abluft, das Kühlwasser und den Wasserstoffzu- und -abfluss. Mit der entwickelten Plattenkonstruktion konnte eine Wiederholeinheit von 3.1 mm Länge erzielt werden.

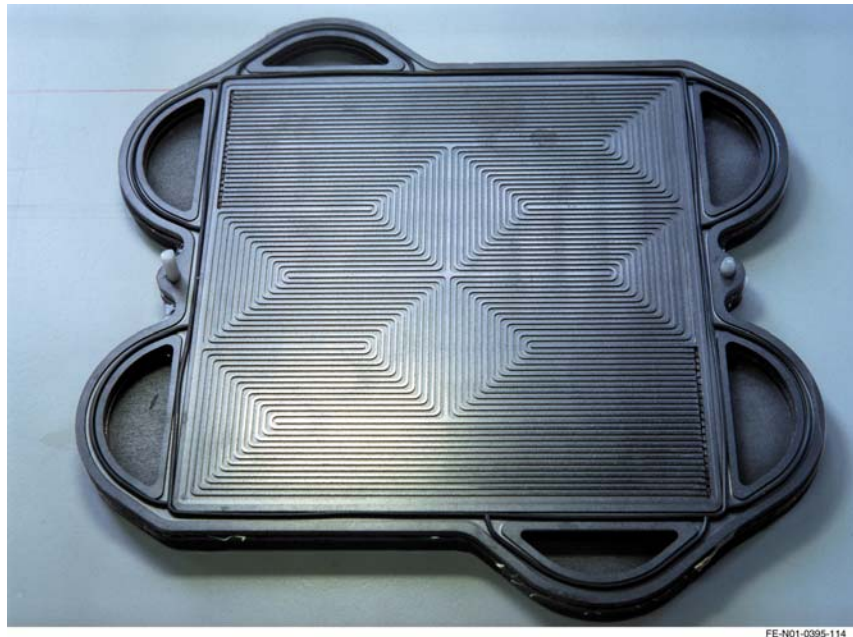


Figure 5: Bipolarplatte mit der Sicht auf die Verteilung der Luft über die Membran. Zusätzlich ist die O-Ring Dichtung sichtbar, die je 2 Bipolarplatten gegen aussen abdichtet.

Kleben der zwei Halbplatten und Dichtigkeitstest: Da jede Bipolarplatte eine Ebene für die Versorgung der Membran mit Wasserstoff und eine Ebene (gegenüberliegend) für die Versorgung mit Luft aufweist, bleibt für die Kühlung der Platte nur eine Mittelebene (vgl. Fig. 6). Diese wird herstelltechnisch durch die Teilung der Platte erzielt. Die geteilte Platte erhält eine Struktur von Kanälen, die sicherstellt, dass die ganze Platte gleichmässig gekühlt wird. Vor dem Einbau müssen diese zwei Halbplatten zu einer Einheit zusammengebaut werden. Dabei ist sicherzustellen, dass der Raum in dem das Kühlwasser fliesst nach aussen, aber auch gegenüber den wasserstoff- sowie luftführenden Teilen dicht ist. Die beiden Plattenhälften werden geklebt und anschliessend durch Anbringung eines Vakuums auf Dichtigkeit geprüft. Dieser Teil des Bearbeitungsprozesses ist sehr arbeitsintensiv, da sehr genau gearbeitet werden muss und eine gewisse Fertigkeit erforderlich ist. Hier besteht in Hinblick auf vergrösserte Fertigungslose durchaus Verbesserungspotenzial, um die Fertigungskosten zu senken.

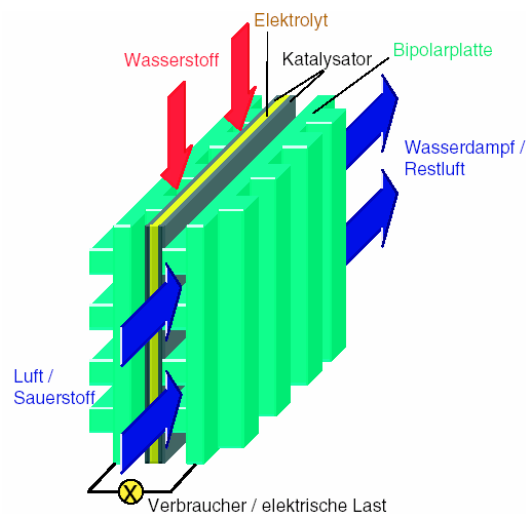


Figure 6: Aufbau einer Brennstoffzelle mit den Hauptkomponenten

Dichtung über der Membran: Als Dichtung über der Membran zwischen den beiden Bipolarplatten hat sich eine O-Ring-Dichtung als ideale Lösung herausgestellt. Mit einem

nach Mass gefertigten Dichtungsring aus einem Teil (Fig. 5) bestehend, konnte auch der Montageaufwand reduziert werden. Es traten keine Dichtungsprobleme nach aussen auf.

Endplattendesign: Die Endplatten wurden wie das Design der Bipolarplatten an der ETHZ (IMES) entwickelt. Mit einem Ansatz von neuronalen Netzwerken wurde eine Endplatte entwickelt, die gewichtsoptimal die Anforderungen erfüllt. Sie wurde so gestaltet, dass sie im eingespannten Zustand eine gleichmässige Belastung der Bipolarplatten erzeugt und somit die Dicht- und elektrische Leitfunktion optimal erfüllt. In Fig. 7 ist diese Endplatte gut sichtbar.

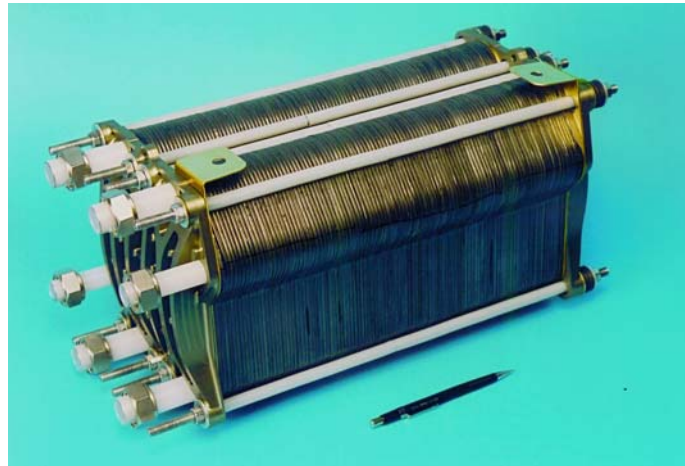


Figure 7: Foto des 100 Zellen-Stapels mit 6.5 kW Nennleistung. Alle Medienanschlüsse (Zu- und Abführungen) sind auf derselben Seite des Stapels angeordnet.

Qualitätskontrolle: Beim Einsatz von ca. 750 Zellen innerhalb der 6 Stapel, die im Fahrzeug benötigt werden, ist eine Qualitätskontrolle erforderlich. Da die Membranen und Elektroden am PSI auf die Masse zugeschnitten werden, war hier die Eingangskontrolle einfach. Bei den Bipolarplatten gestaltete sich dies etwas aufwändiger, da hier ca. 2000 Teile kontrolliert werden mussten.

Unterschiede fanden sich hier in den beiden benutzten Herstellverfahren. Ein Teil der Platten wurde gefräst, der restliche Teil gepresst. Fig. 8 zeigt die Gewichtsstreuungen zwischen den beiden Herstellverfahren. Die Toleranzen der Kanalfertigung führt bei den gefrästen Platten zu einer deutlichen Streuung des Plattengewichts, das nicht durch die Plattendicke erklärt werden kann. Bei den gepressten Platten tritt dieses Phänomen praktisch nicht auf.

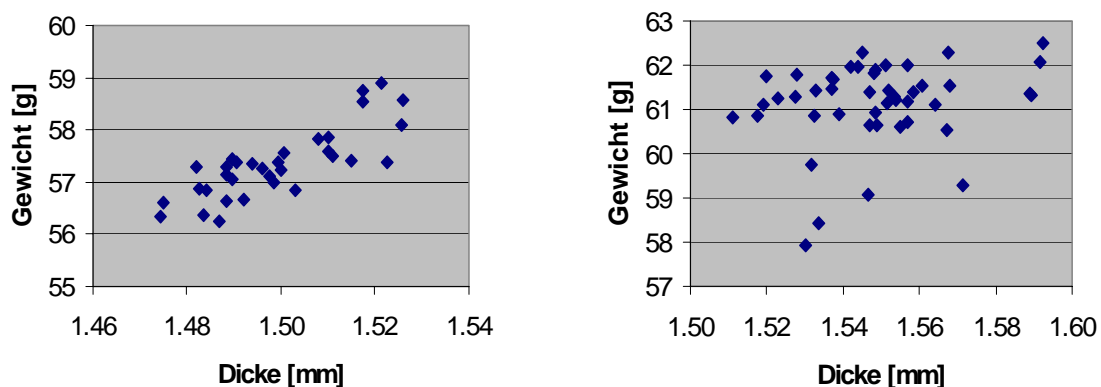


Figure 8: Korrelation von Gewicht zu Plattendicke bei gepressten (links) und gefrästen (rechts) Bipolarplatten.

Leistungsdaten der Stapel: Die Hauptwerte des Stapels wurden an einem Kleinstapel von 2-5 Zellen entwickelt (Fig. 9). Die so ermittelten Daten konnten ohne Verlust auf den 100er

Stapel resp. den Stapel mit 125 Zellen hochskaliert werden. Es zeigt sich, dass dieses Design eine gute Variabilität der Stapelleistung ermöglicht.

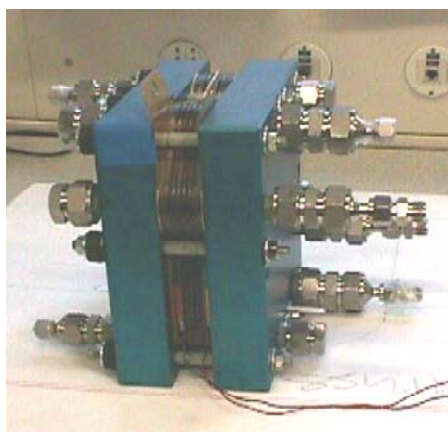


Figure 9: Fünf-Zellenstapel, für eine nominelle Leistung von 300W.

In Abhängigkeit des Betriebsdruckes konnten folgende Leistungen des Stapels erzielt werden (Fig. 10).

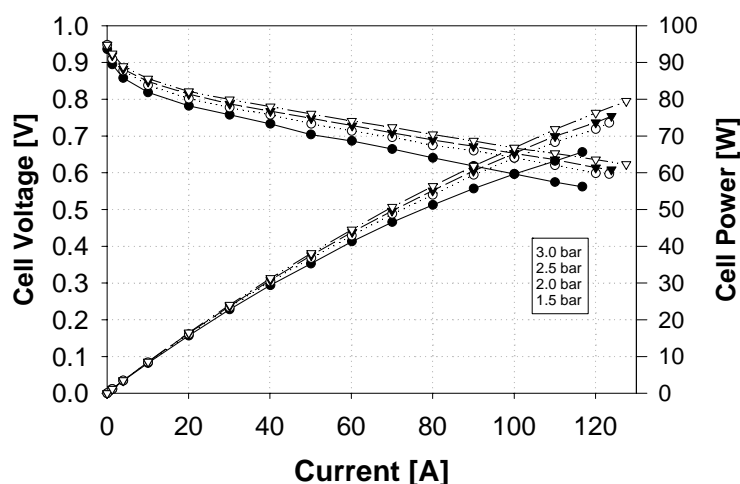


Figure 10: Druckabhängigkeit der Stapelleistung (♦ 1.5bar, ○ 2, ▼ 2.5 und ▽ 3 bar)

Die Reproduzierbarkeit der Leistungsdaten der verschiedenen Stapel sind in Fig. 11 dargestellt. Der Abfall des Stapels 3 kann dadurch erklärt werden, dass mit diesem Stapel eine grössere Havarie geschah, bei der mehrere Hot-Spots zum Versagen mehrerer Bipolarplatten führte. Dieser Schaden konnte nie mehr ganz behoben werden. Die Vermutung liegt nahe, dass durch die hohe thermische Belastung durch einen überhöhten Stromfluss und die Hot-Spots zu Veränderungen im Bipolarplatten Material geführt hatten.

Neben den Leistungsdaten bei Betriebstemperatur im Bereich von 50-70°C interessiert auch das Startverhalten bei tieferen Temperaturen (Fig. 12). Die Strom-Spannungskurven wurden bei 20°C gestartet und somit bei möglichst kalten Bedingungen aufgenommen. Wie erkennbar ist, bleibt eine Leistungsfähigkeit von > 70% erhalten. Diese kurzzeitige Einschränkung ist akzeptabel und durch den Fahrer nur schwer festzustellen.

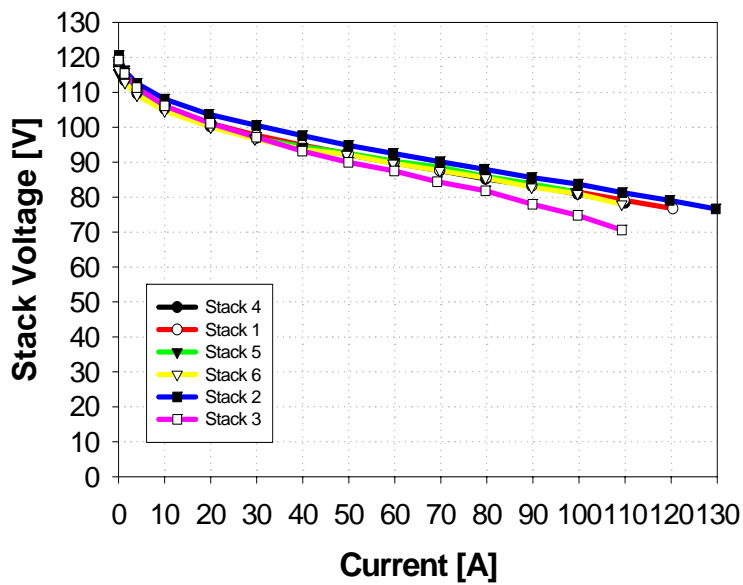


Figure 11: Strom-Spannungskurven der verschiedenen Stapel für den Fahrzeugeinsatz.

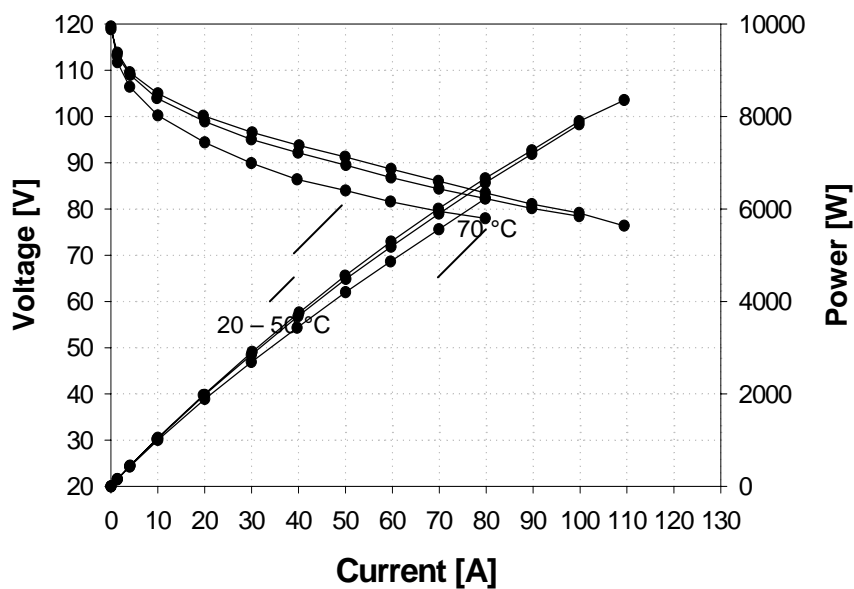


Figure 12: Strom-Spannungskurven und Leistungskurven bei Kaltstart, Aufwärmphase und bei Betriebstemperatur.

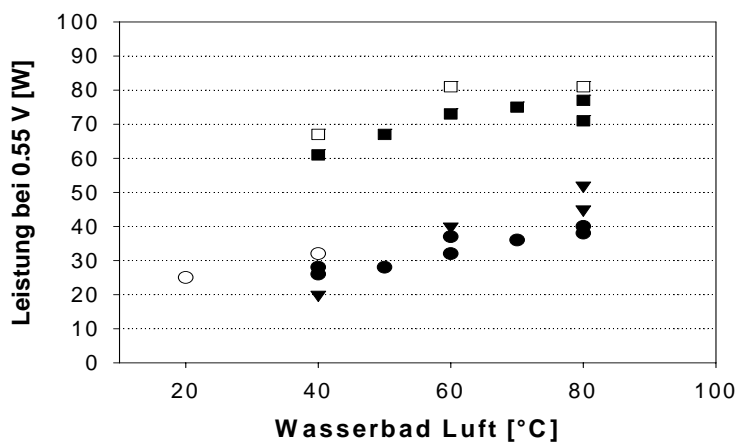


Figure 13: Einfluss der Befeuchtung (Taupunkt) und Membrandicke auf die Zellenleistung bei 70°C Stapeltemperatur. ■ Nafion 112 Membran, ● und ▼ Nafion 115 Membran. ausgefüllte Symbole stehen für trockenen H₂, leere Symbole stehen für befeuchteten H₂.

Die Leistungsfähigkeit der BZ ist einerseits von der Membrandicke und von der Befeuchtung abhängig. In Fig. 13 ist deutlich ersichtlich, dass bei steigendem Taupunkt die Leistungsfähigkeit der Einzelzelle steigt.

5.1.3 Brennstoffzellensystem

Bei der Brennstoffzelle müssen alle Medien aktiv zu- und abgeführt werden, d.h. beim Stapel handelt es sich um ein passives Element. Für die Auslegung des Luftkreises war die FEV Motorentechnik GmbH in Aachen zuständig. Auf der Wasserstoffseite war das PSI für die Prozessführung zuständig. Bei der Kühlung wurde ein minimaler Aufwand zum Anschluss an eine Fahrzeugkühlung getrieben.

Wasserstoffversorgung: Die Wasserstoffversorgung muss unter allen Betriebsbedingungen die Stapel mit genügend Wasserstoff versorgen können. Zusätzlich muss der Wasserstofffluss durch die Zellen die gebildeten Wassertropfen auf der Wasserstoffseite entfernen können. Während der Phase, wo ein Pilotsystem auf mit einem 6 kW Stapel aufgebaut wurde, sind verschiedene Speisekonfigurationen getestet und verglichen worden.

Der Wasserstoff wird in Drucktanks (im Fahrzeuge werden 2 Tanks mit je 26 L nutzbaren Volumens verwendet und wiegen je 14 kg) bei bis 350 bar gespeichert. Die Tanks bestehen aus einem Alu-Layer, der mit Kohlefasern verstärkt ist. Die Brennstoffzellen werden bei ca. 2 bar betrieben und die Druckreduktion erfolgt in zwei Stufen. Zuerst wird mit einem Druckminderer ein Arbeitsdruck von ca. 8-10 bar eingestellt. Anschliessend wird über ein Regelventil der Druck feingeregelt. Der genaue Wasserstoffdruck wird als Funktion des Druckes der komprimierten Luft geregelt.

Die einfachste Anordnung der Versorgung der Stapel mit Wasserstoff ist die sogenannte dead-end Versorgung (Anordnung A in Fig. 13). Bei dieser Konfiguration wird dem Stapel nur gerade die Menge Wasserstoff zugeführt, die in Strom umgesetzt wird. Die Dynamik dieser Anordnung ist sehr begrenzt und wird durch die Anpassung des Massentransportes an Wasserstoff in den Stapel bestimmt.

Die Dynamik kann durch ein übermässiges Durchströmen an Wasserstoff durch den Stapel verbessert werden. Um ein Entweichen des überschüssigen Wasserstoffes an die Umgebung zu vermeiden, und so einen Abfall des Systemwirkungsgrades zu verhindern, kann der Treibstoff über eine Rezirkulationspumpe zum Stapeleingang zurückgeführt werden. Dabei muss nur der Druckabfall über den Stapel kompensiert werden. Dies wird in der Anordnung nach B in Fig. 14 erzielt.

Bei der Dead-end-Anordnung sinkt die BZ-Spannung langsam aber kontinuierlich. Öffnet man das Magnetventil „M“ kurzzeitig, so erholt sich die BZ-Spannung. Bei einer charakteristischen Frequenz des Ventil-Öffnens kann ein Abfall der BZ-Spannung auf etwa das gleiche Niveau beschränkt werden wie in der Konfiguration B, wo der Stapel mit einem gewissen „Überfluss an Wasserstoff versorgt wird.

Das Abblasen von Inertgasen aus dem System rechtfertigt dieses Verhalten der Konfiguration A nicht allein. Durch das öffnen des Ventils wird eine Druckwelle im System erzeugt, die einen kurzzeitigen Anstieg der Flussgeschwindigkeiten in den Wasserstoffkanälen erzeugt. Dabei werden kleinste Wassertropfen, die sich in den winzigen Kanälen gebildet haben mitgerissen und aus dem Stapel entfernt. Zusätzlich ist die Diffusionsschicht in der MEE durch diese Druckwelle beaufschlagt. Dadurch wird der Abtransport von störenden

Wasserpartikeln und die frische Versorgung mit Wasserstoff unterstützt. Dadurch wird die für den Wasserstoff zugängliche Fläche zur Membran wieder erhöht und mehr elektrische Leistung kann erzeugt werden.

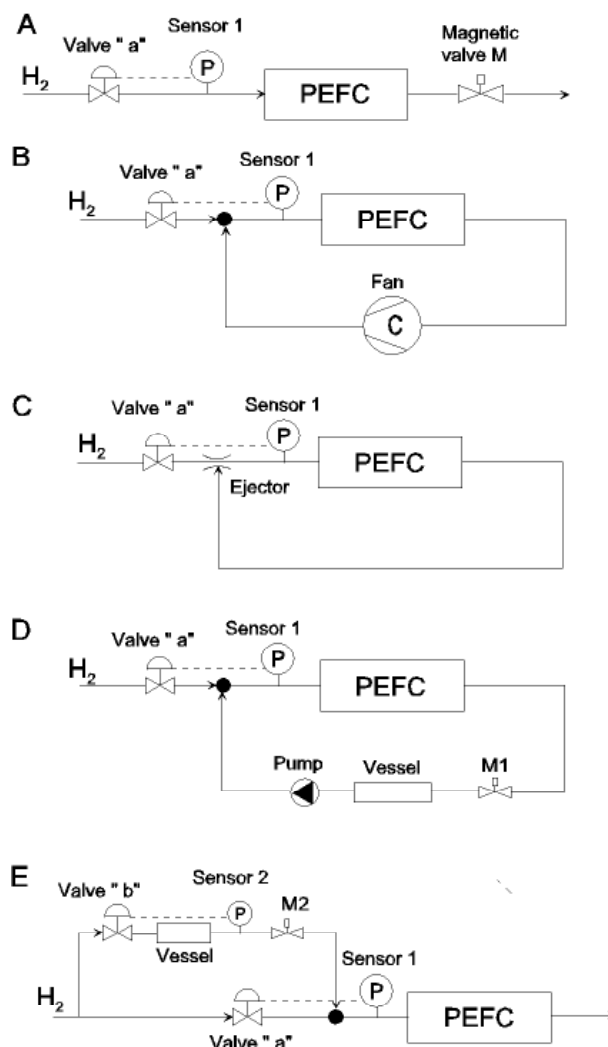


Figure 14: Schematischer Aufbau verschiedener Versorgungssysteme der Stapel mit Wasserstoff

Mit der Anordnung D können durch ein kleines Vakuum gegenüber dem Druck im Stapel aktiv Druckwellen erzeugt werden. Dieses Vakuum wird in einem Behälter durch das auspumpen des abgeschlossenen Behälter erzielt. Durch das schlagartige Öffnen des Einlassventils M1 strömt Wasserstoff aus dem Stapel in den Behälter und es entsteht eine Unterdruckwelle. Nach dem Schliessen des Ventils wird die Wasserstoffmenge wieder ausgepumpt. Die Pumpe fördert den Treibstoff zurück zur Speisleitung. Der Einfluss der Druckwellen ist etwa vergleichbar mit dem in Anordnung A. der Vorteil liegt hier darin, dass die Leistung für die Rezirkulationspumpe auf ca. 10% derjenigen in Anordnung B beschränkt werden kann.

Ist der Druck in diesem Speicherbehälter höher als im Stapel funktioniert das Prinzip analog. Man realisiert damit die Anordnung E. Den Antrieb für diese Art von Druckwellen kann durch die Nutzung der Druckenergie des gespeicherten Wasserstoffs sichergestellt werden.

Im realisierten System für den Pilotprüfstand wie auch im Fahrzeug ist die Kombination der Anordnungen A, C, D und E gewählt. Das Regelventil „a“ ist vor dem Injektor im Hauptspeisepfad platziert. Es regelt auch den Betriebsdruck im Stapel über den Druck vor Stapel-einlass. Im Injektor wird der frische Wasserstoff mit dem rezirkulierten Wasserstoff gemischt. Der Druck im Speicher für die Überdruckwellen wird über ein zweites Regelventil „b“ geregelt. Auf der Auslassseite entstehen drei mögliche Pfade: Erstens der Rezirkulationspfad

zum Injektor, zweitens der Speisepfad zum Unterdruckbehälter und drittens die Entlüftung in die Umgebung.

Die in Fig. 15 dargestellte Leistungsfähigkeit der verschiedenen Konfigurationen wurde am 6.5 kW Pilotsystem getestet. Die jeweiligen Messpunkte sind über die Zeitspanne von je 15 Sekunden gemittelt. Wichtig ist dabei zu sagen, dass, wie oben erwähnt, das Pilotsystem aus einem Stapel besteht und somit auch die Laufzeit der Druckwellen auf einen Stapel abstimmbare waren. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die Kombination der Überdruck- und Unterdruck-Druckwellen zur erfolgreichen Austreibung der Wassertropfen führt und zu einer guten Langzeitstabilität der Messungen ohne Abblasen in die Umgebung beiträgt. Zudem kann damit die Effizienz des Gesamtsystems gesteigert werden.

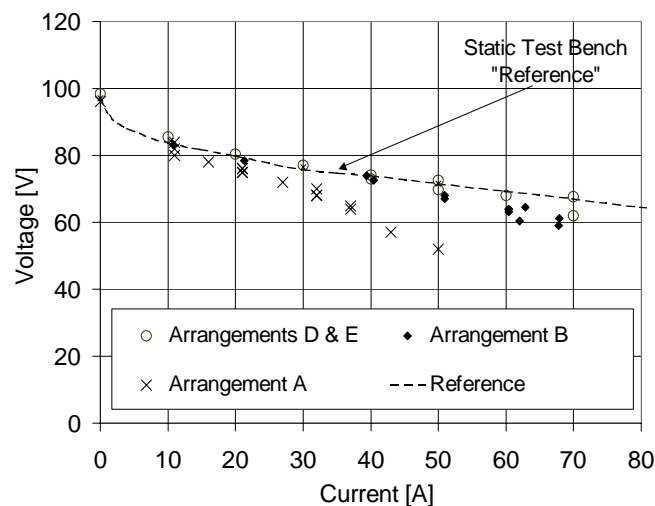


Figure 15: Einfluss der Wahl des Wasserstoffversorgungssystems auf die Stapelleistung.

Luftversorgung: Das gesamte Luftversorgungssystem muss die folgenden Funktionen umfassen:

- Bereitstellung des gewünschten Luftmassenflusses
 - Kompression der Luft auf den gewünschten Luftenddruck
 - Befeuchtung der Ansaugluft
 - Temperaturbegrenzung der Luft am Stapeleintritt
 - Lieferung der Startluftmenge

Die hohen Anforderungen bezüglich minimalem Volumen und Gewicht der Komponenten, die dynamische Ansprechzeit, Systemwirkungsgrad erforderten eine innovative und integrierte Lösung für die Luftverdichtung und Befeuchtung. Mit ausgedehnter Modellierung und Hardware-in-the-loop Messungen wird der Entwicklungsprozess optimiert.

Der schematische Aufbau der Luftversorgung und der Befeuchtung ist in Fig. 16 aufgezeigt. Nach dem Luftfilter wird die Ansaugluft über einen Wasser-Luftwärmetauscher aufgewärmt. Anschliessend wird die Luft im elektrisch angetriebenen Schraubenlader verdichtet. Ein intermittierend angesteuertes Magnetventil zur Wassereinspritzung ist direkt im Verdichter integriert (Fig. 17). Damit wird zum einen die Befeuchtung geregelt und andererseits wird die Lufttemperatur nach oben begrenzt.

Für den Startvorgang, wird ein Startlüfter, der mit 12V-Spannung arbeitet, mit einem Rückschlagventil kombiniert. Der Luftdruck wird über ein Drosselventil hinter der Brennstoffzelle geregelt. Die Luftfeuchte wird vor dem Stapeleingang mit einem beheizten Feuchtigkeitssensor gemessen. Die Luftmasse wird hinter der Luftvorwärmung mit einem Heissfilmsensor gemessen und über die Drehzahl des Verdichters geregelt.

Kühlung: Die Brennstoffzelle wird mit de-ionisiertem Wasser gekühlt. Dazu wird das Wasser mit einer drehzahlgeregelten Pumpe gefördert. Die Wärme wird über einen Luft-Wasserwärmetauscher an die Umgebung abgegeben. Die erforderliche Luftmenge wird mit zwei getrennt ansteuerbaren Lüftern sichergestellt. Durch die geringe Betriebstemperatur kann das Ausgleichsgefäß verhältnismässig klein gehalten werden. Auf einen kurzen Bypasspfad der Kühlwasserförderung wurde verzichtet.

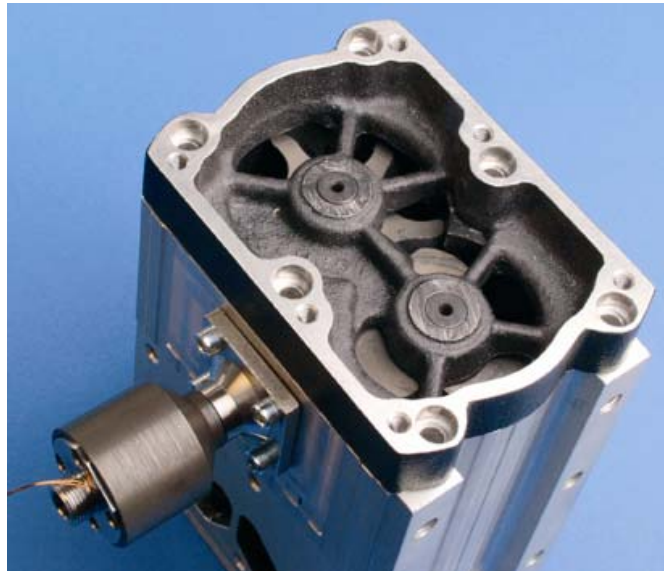


Figure 17: Schraubenverdichter mit integrierter Einspritzdüse für Befeuchtungswasser

5.2 Superkondensatoren

Der Begriff Supercaps (SC), - wie er in diesem Bericht verwendet wird – versteht sich als Doppelschicht-Kondensator, der einen organischen Elektrolyten und eine Elektrode verwendet, die aus aktiviertem Russ besteht.

Die Aufgaben in diesem Teilprojekt umfassten die Verbesserung der Elektroden, so dass die Energiedichte der SC-Zelle erhöht werden konnte. Diese Aufgabe wurde vom PSI in Zusammenarbeit mit der montena components SA bearbeitet. Die Herstellung der im Fahrzeug benötigten SC übernahm montena. Durch die absehbar grössere Zahl der benötigten Zellen wurde an der EPFL eine Ladungsausgleichselektronik entwickelt, die letztendlich die Spannungsunterschiede der einzelnen Zellen minimierte.

Die Integration der Einzelzellen in Module erfolgte wieder in Zusammenarbeit zwischen montena und dem PSI.

Das Vorgehen war ähnlich gegliedert wie bei den Brennstoffzellen. Zuerst folgte eine Phase der Elektrodenentwicklung, gefolgt von einem Pilotaufbau. Es wurde ein Modul für 10 kW maximaler Leistung zusammengebaut, um die Systemaspekte zu untersuchen, bevor dann die beiden Teilmodule fürs Fahrzeug hergestellt worden sind.

5.2.1 Supercap-Zellenentwicklung

Durch verschiedene Entwicklungsstufen wurde letztendlich die Energiedichte der Einzelzelle um ein mehrfaches verbessert.

Die ersten Elektroden wurden mit einer Aktivkohle von Norit (Norit supra A) und einem Binder (CMC) hergestellt. Die aus Binder und Kohle mit MetOH und Wasser hergestellte Elektrodenpaste wurde mittels Rakel im Labor und mittels Schlitzgussverfahren bei einer Beschichtungsfirma (UBW) auf eine Al Folie aufgetragen. Die Energiedichte der mit diesen Elektroden von montena hergestellten Kondensatoren war 1.5 Wh/kg und die leistungsdichte 1 kW/kg (vgl. Fig. 18). Untersuchungen der Elektroden zeigten, dass die relativ grosse mittlere Teilchengrösse der Kohle und die breite statistische Grössenverteilung zu wenig dicht gepackten Elektroden führen.



Figure 18: Ansicht der 800F, 2.5 V SC-Zellen mit den Anschlusspunkten auf derselben Seite.

Durch Optimierung der Teilchengrösse konnte eine deutliche Verbesserung der Elektroden-eigenschaften erzielt werden. Sieben der Kohle und Verwendung der Fraktion mit Teilchengrössen zwischen 10 μm und 60 μm (Fig. 19) führte zu Elektroden, die im Kondensator eine Energiedichte von 2.5 Wh/kg und eine Leistungsdichte von 6.5 Wh/kg ergaben. Die Ragone Plots der ersten und zweiten Elektrodengeneration sind in Fig. 20 dargestellt.



Figure 19: Teilchen in der Elektrode links Ausgangsbasis, rechts Teilchengrösse 10-60 μm

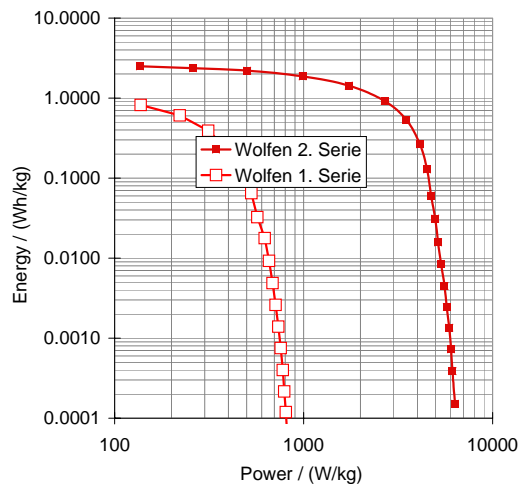


Figure 20: Vergleich der 1. und 2. Elektroden generation und Abmasse der SC-Zellen

Mit diesen Kondensatoren wurde ein erstes SC Modul (10 kW siehe unten) mit 60 V, 60 F gebaut und getestet.

Die Selbstentladung der Kondensatoren ist in Fig. 21 für Raumtemperatur und für eine Temperatur von 60 °C dargestellt. Bei Raumtemperatur beträgt die Selbstentladung ca. 50 %/ Monat. Bei 60°C ist der Kondensator nach ca. 20 Tagen entladen.

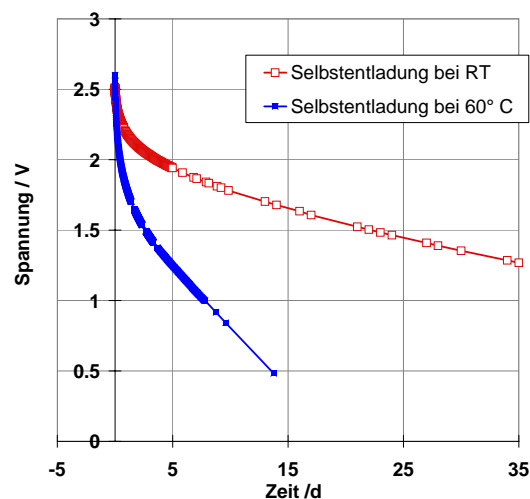


Figure 21: Selbstentladung eines SC bei RT und bei 60°C

Eine weitere Steigerung der Energiedichte der Kondensatoren könnte über einer Erhöhung der Dicke und Dichte des aktiven Elektrodenfilms erreicht werden. Mit der oben genannten Rezeptur konnte keine Steigerung der Energiedichte erreicht werden, da dickere Filme schlechtere mechanische Eigenschaften (Haftung, Brüchigkeit) zeigten. Es wurde eine erweiterte Rezeptur entwickelt, bei der ein neuer Binder (PVDF) für dieselbe Kohle verwendet wurde. Ausserdem wurde vor dem Auftragen der Kohlepaste auf den Träger eine Haftschrift (PVDF) aufgetragen. Die so hergestellte Elektrode wurde zusätzlich durch einen Walzschrift verdichtet (Fig.22). Mit dieser dritten Generation konnten Energie und Leistungsdaten der besten auf dem Markt erhältlichen Elektrode erreicht werden. Fig. 23 zeigt den Vergleich der PSI-Elektrode mit dem Marktleader.

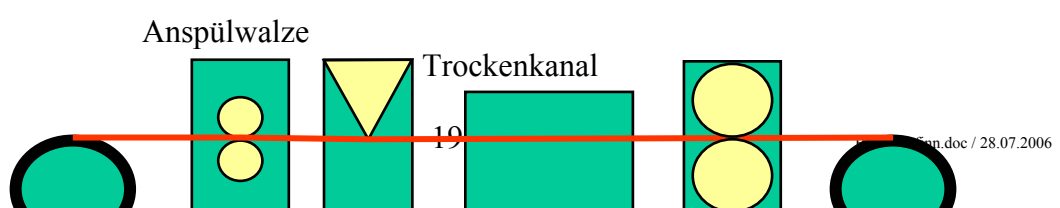


Figure 22: Schema des Herstellprozesses der Elektroden

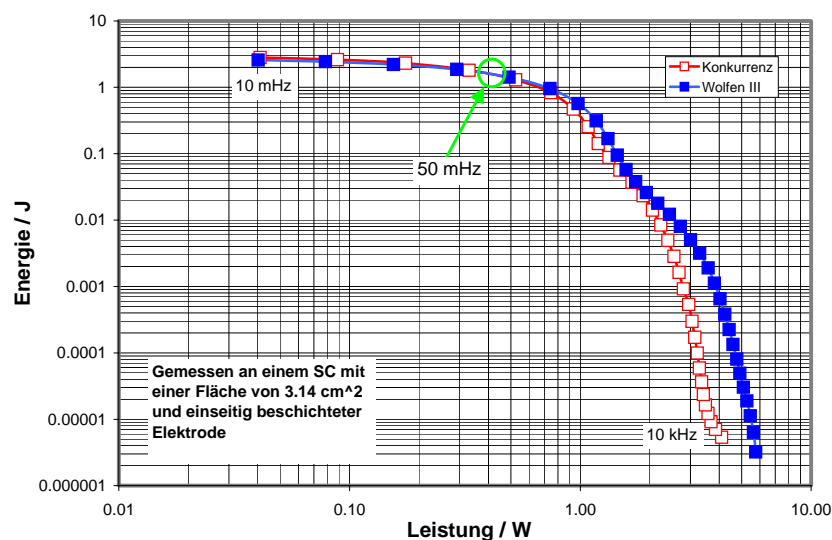


Figure 23: Vergleich einer PSI-Elektrode mit der besten Elektrode auf dem Markt.

Von der Elektrode (3. Generation) wurden mehrere hundert Meter Elektrodenband bei einer Beschichtungsfirma hergestellt. Die von montena hergestellten Kondensatoren hatten eine Kapazität von 1500 F. Die Elektrodenlänge reichte allerdings nicht, um alle im Fahrzeug benötigten 282 Kondensatoren herzustellen. Daher - und aus anderen Gründen - wurden diese Elektroden nicht im Fahrzeug verwendet.

Im Fahrzeug wurden SC eingesetzt (BOOSTCAP BCAP0012), die nach Grösse und Kapazität an den vorhandenen Platz angepasst worden sind. Der BCAP0012 hat 1500 F bei 2.5 V und einen inneren Widerstand $ESR = 1 \text{ m}\Omega$. Die Leistungsdichte von 4.8 kW/kg und die Energiedichte von 5.3 Wh/kg wurden aus elektrochemischen Impedanzmessungen [7,8] ermittelt. Die geometrischen Abmessungen sind 50 mm Durchmesser und eine Länge von 150 mm (vgl. Fig. 18). Dabei sind bei Kontakte auf derselben Seite.

5.2.2 Ladungsausgleichselektronik

Das Ziel der Ausgleichselektronik liegt im Ausgleich der Spannung durch Ladungsverschiebung in Phasen mit geringem Leistungstransfer mit dem Antriebsstrang. Unterschiedliche Entladeverhalten sind die Folge von Kapazitätsunterschiede in den einzelnen Zellen, unterschiedliche Entladeverhalten der einzelnen Zellen durch Temperaturunterschiede innerhalb des Moduls und letztlich ist die Spannung über einer Serie von Zellen nicht ganz gleichmässig über alle Zellen verteilt. Falls diese Effekte nicht

ausgeglichen werden besteht das Risiko einer lokalen Überspannung über einzelne Zellen und somit deren Zerstörung. Weiter kann die gespeicherte Energie nicht optimiert werden.

Bekannte Lösungsmöglichkeiten: Eine einfache Art, die Spannung über einer Serie von SC-Zellen auszugleichen ist die Anordnung eines Widerstandes über jede SC-Zelle. Die Grösse des Widerstandes ist von verschiedenen Kriterien abhängig. Als Hauptkriterium ist die Dynamik der Spannungsteilung zu sehen, die mit der Dynamik einer typischen Ladungsdynamik übereinstimmen muss. Dies verhindert eine Spitzenspannung in einzelnen Zellen. Der Nachteil dieser einfachen Lösung ist der Leistung, die ständig über diese Widerstände verloren wird und somit den Wirkungsgrad des Moduls belastet. Zusätzlich entsteht eine höhere Selbstentladeleistung.

Eine, der ersten Ausführung ähnliche Schaltung, allerdings mit Zener-Dioden kann die Spannung der einzelnen Zellen limitieren (z.b. bei einem Maximum von 2.5 V). Dabei entsteht keine Verlustleistung, solange die Spannungen unterhalb der maximalen Spannung bleiben.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verbindung jeder Zelle mit einem eigenen DCDC-Konverter auf einen gemeinsamen Leistungsbuss. Diese teure Lösung erlaubt eine maximale Isolation der gegenseitigen Beeinflussung der SC-Zellen. Damit kann eine hohe Verfügbarkeit erzielt werden.

Die Schaltung dargestellt in Fig. 24 verwendet eine aktive Ladungsausgleichselektronik. Diese Schaltung arbeitet nach dem Prinzip der back-boost Topologie. Diese Schaltung vermeidet eine Überspannung und garantiert maximale gespeicherte Energie mit hohem Wirkungsgrad. Die Ladungen der Nachbarzellen werden über einen Vergleich der Zellspannungen verglichen und über Transistor-Schalter ausgeglichen. Ein selektiver Ausgleich ist möglich wobei ein direkter Austausch nur zwischen den Nachbarzellen möglich ist.

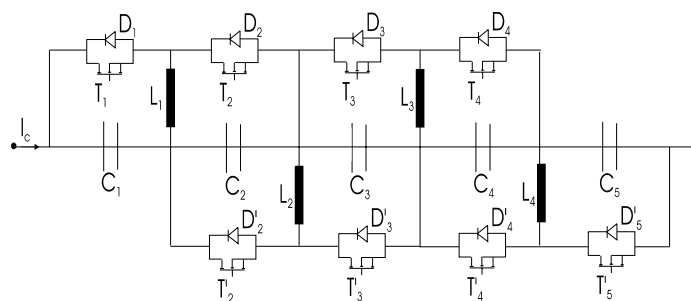


Figure 24: Schema des aktiven Spannungsausgleichs basierend auf einer backboost Topologie

Virtuelle-parallele Schaltung: Als letzte Schaltung betrachten wir die gewählte und umgesetzte sogenannte virtuelle-parallele Schaltung (VP). Die Anordnung ist in Fig. 25 dargestellt und hat den Vorteil, dass die SC-Zellen in Abhängigkeit der Abweichung von den anderen SC-Zellen belastet werden. Somit sind sie selbstregelnd [5]. Die Zellen sind über eine fest gepulste DC-Spannung an den Leistungsbuss gekoppelt. Somit kann mit einer einzelnen Steuerung ein ganzes Modul betrieben werden. Weder eine Umpolarisierung noch eine Überladung kann passieren. Im Gegenteil, es können verschiedene Technologien wie Batterien oder Supercaps im selben Modul eingesetzt werden. Zudem wird der Ausfall einer Zelle/Batterie das Gesamtsystem nicht tangieren und trägt somit zur guten Verfügbarkeit bei.

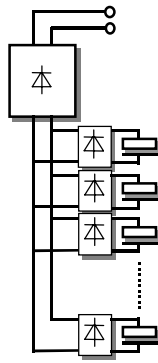
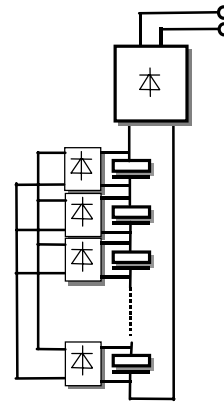


Figure 25: a) VP als Leistungsmodul



b) VP als Ausgleichsschaltung

Zum Ladungsausgleich eingesetzte VP-Schaltungen verfügen über eine zusätzliche parallel geführte Verbindung. Somit kann der Ladungsausgleich direkt und ständig betrieben werden. Dabei ist allerdings die Ausgleichsleistung limitiert. Die Wirksamkeit des Ladungsausgleichs kann in Fig. 26 gesehen werden, wo 5 Zellen über Zyklen betrieben wurden. Nach 5000 Zyklen ist das Spannungsverhalten ohne Ausgleichselektronik (links) und mit Ausgleichselektronik (rechts) zu sehen.

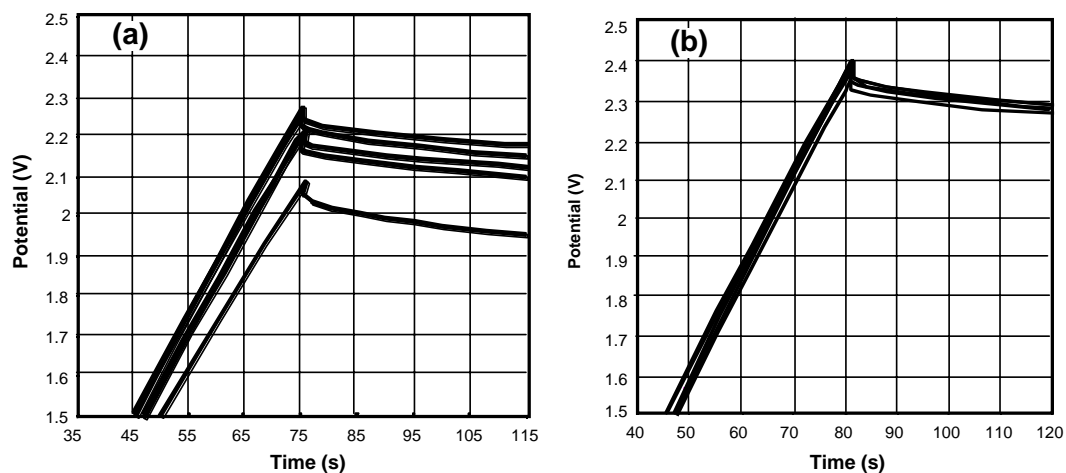


Figure 26: Spannungsverlauf über die 5 SC-Zellen eines Paketes, das über eine Ladungsausgleichsschaltung nach letzter Topologie verfügt.

5.2.3 Ergebnisse der 10 kW-Modul-Untersuchungen

Die Untersuchungen mit dem Pilotmodul hatten zum Ziel Sicherheit über die Fragen der Leistungsfähigkeit des Moduls, dem Wirkungsgrad des Moduls und somit des Kühlungsbedarfes zu gewinnen und eine Aussage über die Funktionsweise des Ladungsausgleichs zu erhalten (Fig. 27). Weiter wurde das Modul eingesetzt, um das Gesamtsystem auf dem reduzierten Leistungsniveau zu testen.

Passfahrtsimulation: Mit einer dynamischen Last wird eine Passfahrt simuliert, die mit einem Elektromobil aufgenommen wurde und vom Leistungsniveau auf das Pilotmodul herunterskaliert wurde. In den ersten 1800 Sekunden wird die Anfahrtsrampe durchfahren, wo die Hauptlast des Antriebes über die langsam adaptierte Brennstoffzellenleistung abgedeckt wird. Erst auf dem letzten Teilstück treten Serpentincurven auf, die an den positiven und negativen Leistungsspitzen erkannt werden können, die der SC liefern/aufnehmen muss. In Fig. 28.



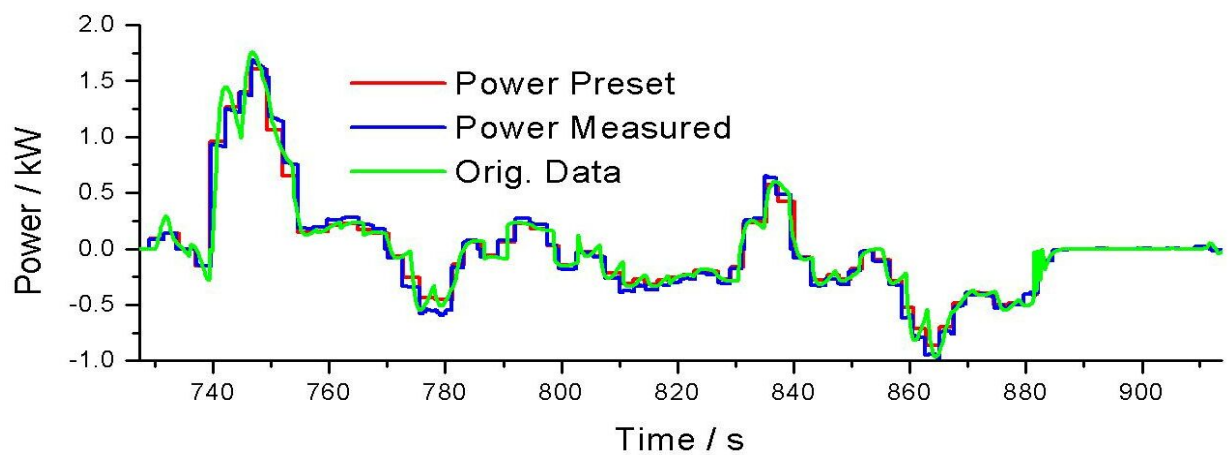


Figure 27: Ansicht des 10-kW Moduls mit dem ersten Funktionsmuster mit aktiver

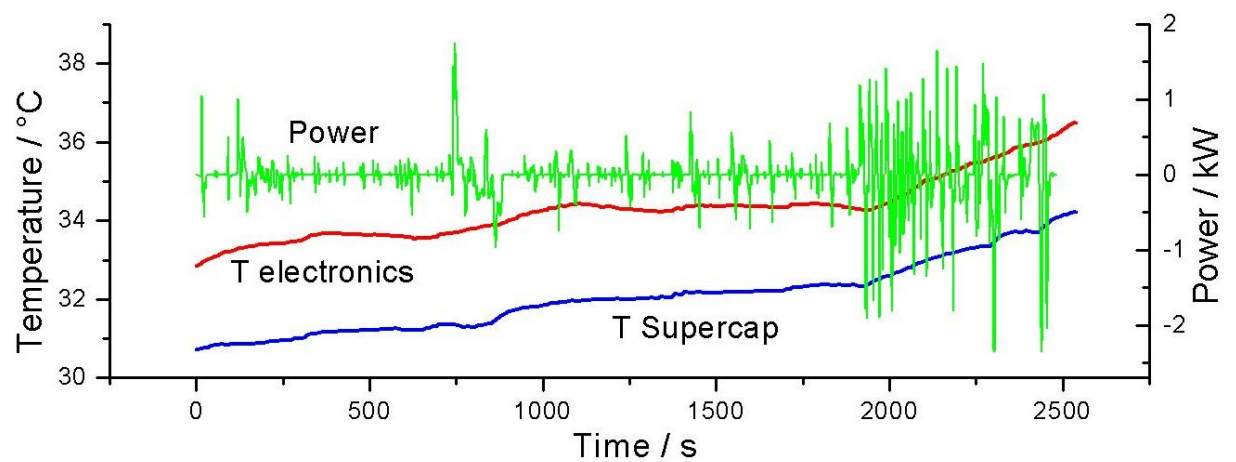


Figure 28: Leistungsfluss und Temperaturverlauf des SC-Moduls in einem skalierten Pass-Zyklus

5.2.4 Aufbau der SC-Module für das Fahrzeug

Der Aufbau der beiden Module für das Fahrzeug basiert auf den BCAP0012-Zellen mit den oben genannten Eigenschaften. Um die maximal mögliche Spannung von 360 V zu erreichen wurden 141 Zellen in Serie geschaltet. Dies ergibt eine Einzelzellenbelastung von maximal 2.55 V. Um auf die gewünschte Speicherenergie von 360 Wh zu kommen wurde je 2 BOOSTCAP Zellen parallel geschaltet. Die Aufteilung der Gesamtzellen erfolgte in ein Modul mit 140 Zellen und im anderen Modul sind 142 Zellen untergebracht (vgl. Fig. 29). Der entwickelte Energiespeicher verfügt über 90 kg Supercap-Zellen, 20 kg Verbindungselemente, Ladungsausgleichselektronik und 58 kg für das umschliessende Gehäuse, Sicherung und Sicherheitsschutz. Das Modul ist über einen CAN-Bus-Knoten an die Fahrzeugsteuerung angeschlossen und benötigt ein Volumen von 160 Litern.

Ein niedriger elektrischer Widerstand des Gesamtmoduls ist eine Voraussetzung für eine hohe Leistung bei hohem Wirkungsgrad. Der serielle Widerstand bei Gleichstrom für beide Module zusammen beträgt 112 m Ω . Um diesen Widerstand zu minimieren wurden zwischen den SC-Zellen Aluminiumbrücken verwendet. Es zeigte sich, dass sich die Kontaktwiderstände bei Einsatz unterschiedlicher Metallkontakte deutlich erhöhte. Um den tiefen Widerstandswert zu erzielen, mussten alle Kontakte von den Oxidschichten befreit werden, um so die effektive Kontaktfläche zu vergrössern.

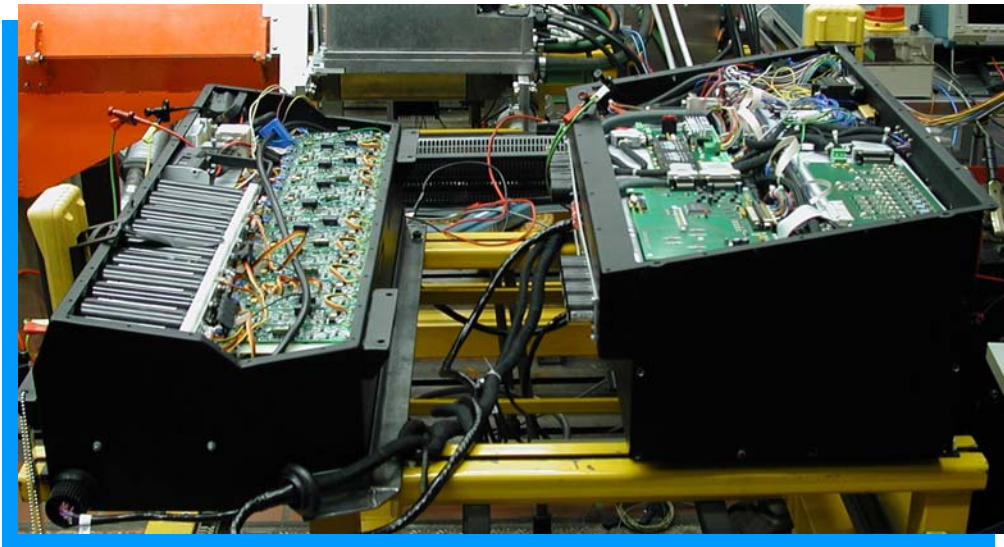


Figure 29: Ansicht der beiden Supercap-Module, die im Fahrzeug eingebaut worden sind.

Der Betriebsbereich des SC-Subsystems wurde auf 60 kW begrenzt, um über einen weiten Teil des Betriebsgebietes eine gleichbleibende Performance des Subsystems zu erzeugen. Im Gebiet mit tieferen Spannungen wird der zulässige Strom relevant, so dass dort die Leistung reduziert worden ist (vgl. Fig. 30). Sichtbar wird hier auch, dass das Betriebsgebiet nicht ganz symmetrisch ist, da die Verluste der Kette anders anfallen.

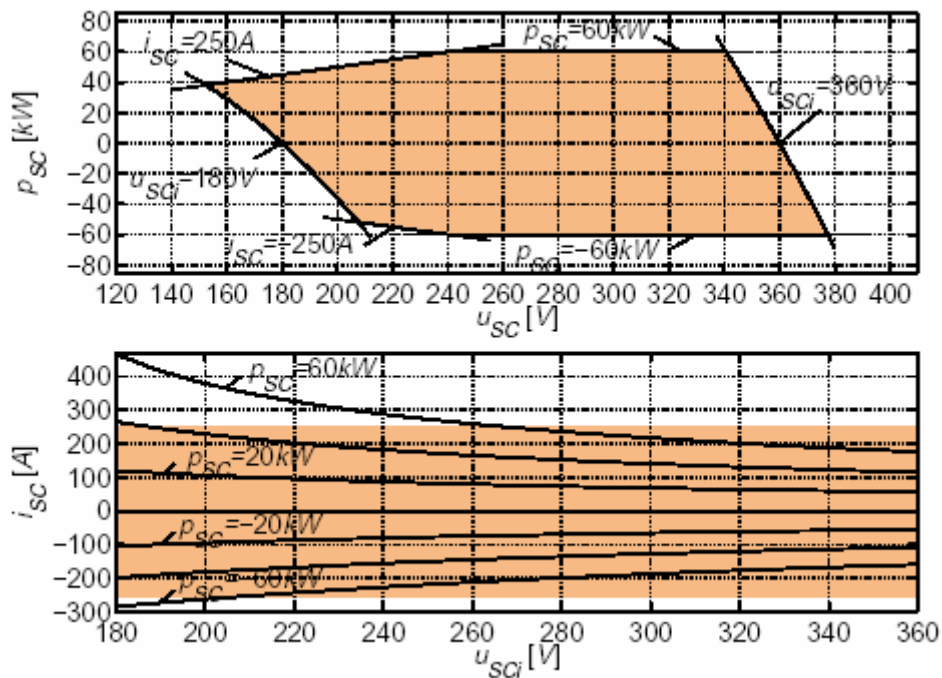


Figure 30: Betriebsgebiet des SC-Subsystems über den Hauptgrößen Spannung und Strom.

Die oben beschriebene aktive Spannungsausgleichsschaltung wurde in den Modulen integriert. Über je 5 Zellen wurde eine Ausgleichseinheit montiert. Die Spannungsunterschiede konnten auf ± 10 mV begrenzt werden. Es muss allerdings gesagt werden, dass in der gewählten Ausführung auch im abgeschalteten Zustand die Versorgung der Ausgleichselektronik Leistung von den SC-Zellen bezieht, so dass in diesem Entwicklungsstadium eine erhöhte Selbstentladung auftritt. Aus diesem Grund sollten die Elektronik abgeschaltet werden, wenn sie nicht unbedingt gebraucht wird.

5.2.5 Ergebnisse mit dem Fahrzeugmodul

Der Energieinhalt und die Leistungsfähigkeit der Module wurden am dynamischen Prüfstand vermessen. Dabei konnte die Entlade- oder die Ladeleistung durch den Elektromotor, der durch den Prüfstand belastet wurde, eingestellt werden. Die In Fig. 31 dargestellte Entladung wurde von vollem Ladezustand (360 V) bis zur halben Maximalspannung (180 V) durchgeführt. Die 50 kW konnten während 15 Sek. geliefert werden, was einer nutzbaren Energie von 210 Wh@50 kW entspricht. Durch den Innenwiderstand wird bei dieser Leistung trotzdem ein Entladewirkungsgrad von 0.92 erzielt. Die Differenz zum statischen Potenzial entsteht durch die Spannungsreduktion im Module bei Belastung durch den Innenwiderstand.

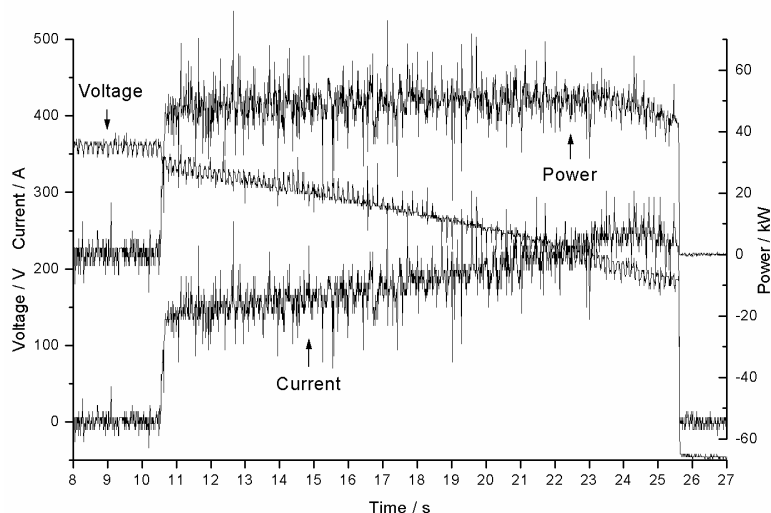
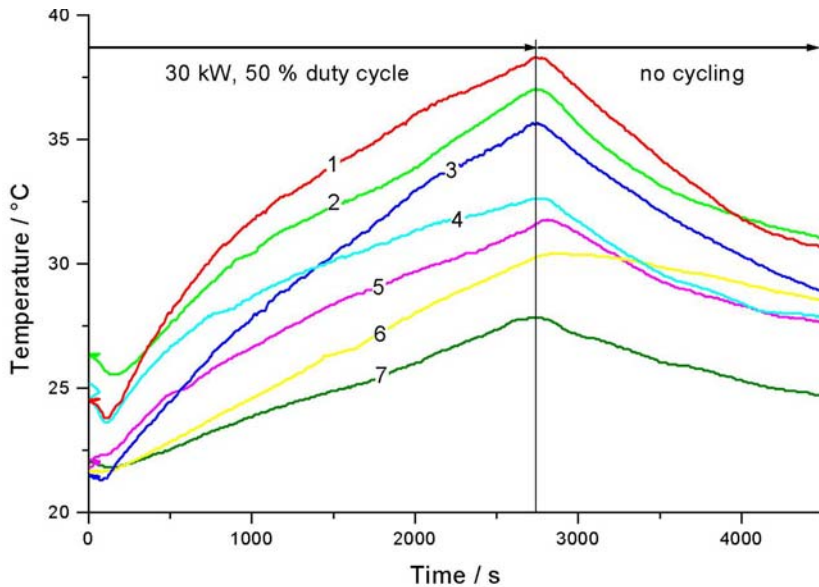


Figure 31: Entladekurve der SC-Module mit 50 kW Konstantleistung

Zur Bestimmung des Kühlbedarfs der Module wurden die SC mit 30 kW zyklische geladen und entladen. Dies entspricht einer Entladezeit von ca. 30 Sek. Der Zyklenbetrieb wurde mit 50% duty-cycle gefahren. Das Ergebnis ist in Fig. 32 abgebildet. Der maximale Temperaturanstieg innerhalb eines Moduls lag nach 2700 Sekunden bei 15 °C. Während den anschließenden 1800 Sek. Betriebsunterbruch sank die Temperatur wieder um ca. 10 °C.



Zyklisierung mit 30 kW (50% duty cycle). Kurve 1,3,4 & 6 vom hinteren, und Kurve 2, 5 & 7 vom vorderen Modul.

Figure 32: Temperaturverhalten der SC-Module bei 30 kW Zyklenbetrieb

5.3 Leistungselektronik

Die Verwendung zweier Speisemöglichkeiten an elektrischer Energie auf eine dritte Komponente erfordert den Einsatz von DCDC Konvertern für die saubere Regelung des Leistungsflusses in den von uns gewünschten Freiheitsgraden. Diese DCDC-Konverter sind die Leistung tragenden Schnittstellen zwischen dem Fahrzeugantriebsmotor und dem Brennstoffzellensystem sowie dem SC-Modulen. Nach Vorgabe des Fahrwunsches durch den Fahrer will der Elektromotor das Fahrzeug mit einer gewünschten Leistung antreiben. Diese Leistung kann nun aus der Brennstoffzelle oder aus den SC oder beiden Quellen kommen. Der DCDC-Wandler gibt dem Energiemanagementregler die Möglichkeit, die gewünschten Leistungen zu schalten.

Der DCDC Konverter kann prinzipiell eine der beiden in Fig. 33 dargestellten Strukturen aufweisen. Die erste abgebildete Struktur setzt nur einen DCDC Konverter ein, der zwischen der Brennstoffzelle und dem Zwischenkreis liegt, der den Antriebsmotor versorgt. Dieser Motor ist in einer parallelen Anordnung zum SC platziert. Die zweite Struktur (in Fig. 33 b), welche einige entscheidende Vorteile aufweist, verwendet 2 unterschiedliche DCDC-Steller. Der erste verbindet die BZ mit dem Zwischenkreis, der zweite DCDC- Steller verbindet den SC mit dem Zwischenkreis.

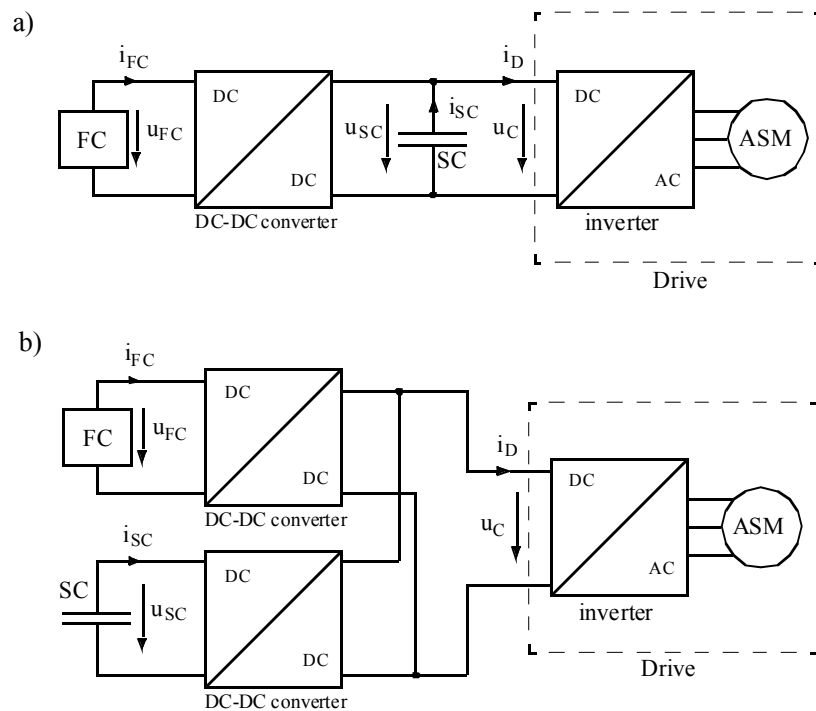


Figure 33: Zwei mögliche Strukturen für den DC-DC Konverter

Die Vorteile der zweiten Anordnung sind:

- Die Zwischenkreisspannung u_C kann frei gewählt und somit auf einem optimalen (in diesem Fall auf einem konstanten) Niveau. Damit kann ein höheres Drehmoment der Elektromaschine (Asynchronmaschine) bei allen Betriebsbedingungen (v.a. bei tieferen SC-Spannungen und höheren Motordrehzahlen) gewährleistet werden.
- Die Abmessungen und Kosten für beide Lösungen sind beinahe gleich hoch. Der treibende Faktor für beide Größen stellt der grosse Spreizungsbereich der Betriebsspannung von SC und BZ dar.

5.3.1 Konzeptauswahl und Realisierung

Die einfachste Schaltung, um diese Struktur (Fig. 33 b) zu realisieren ist ein einfacher Auf- und Ab-DCDC-Konverter, da sowohl die BZ, der SC und die Zwischenkreisspannung in etwa auf demselben Niveau liegen und zudem keine galvanische Trennung zwischen den Komponenten gefordert ist. Der Einsatz von überlappenden Konvertersystemen ist eine effiziente Methode, um die Leistungsdichte von Leistungselektronik zu erhöhen. Weiter bieten überlagerte Kreise den Vorteil, dass Spannungsschwankungen ausgeglichen werden. Zudem können die Anschlüsse zu den BZ und zum SC parallelisiert werden.

Für die Anwendung wurde eine Lösung mit dreifach überlagerten Kreisen auf der Seite der BZ und des SC gewählt (vgl. Fig. 34). Ein Bremswiderstand wurde im Zwischenkreis eingefügt, um in einem Fehlerfall die Zwischenkreisspannung herunterfahren zu können. Die verwendeten Halbleiter sind IGBT-Elemente mit anti-parallelen Dioden, die für 600V Betrieb geeignet sind.

Das Betriebskonzept des DCDC Konverters ist einfach und effizient. Das übergeordnete Energiemanagement sendet die gewünschte Leistung des BZ-Systems zum DCDC-Konverter, der diesen Wert dann von der BZ abgreift. Somit transferiert der DCDC-Wandler die gewünschte Leistung von der BZ zum Zwischenkreis. Mit dem DCDC-Konverter des Supercaps-Kreises wird die Zwischenkreisspannung auf ein konstantes Niveau geregelt.

Somit wird die Differenz der von der BZ gelieferten Leistung und der Leistung, die der Elektromotor vom Zwischenkreis bezieht vom Supercap geliefert oder in diesem gespeichert. Mit diesem Modus kann die Leistungsbilanz über alle Komponenten jederzeit ausgeglichen gestaltet werden und gleichzeitig bleibt es möglich, die Zwischenkreisspannung auf dem gewünschten Wert zu halten. In Fig. 35 ist das erste Versuchsmuster dargestellt, das für die Versuche auf dem Pilotsystem eingesetzt worden ist. In Fig. 36 wird das im Fahrzeug eingesetzte Modul mit den Leistungsdaten dargestellt.

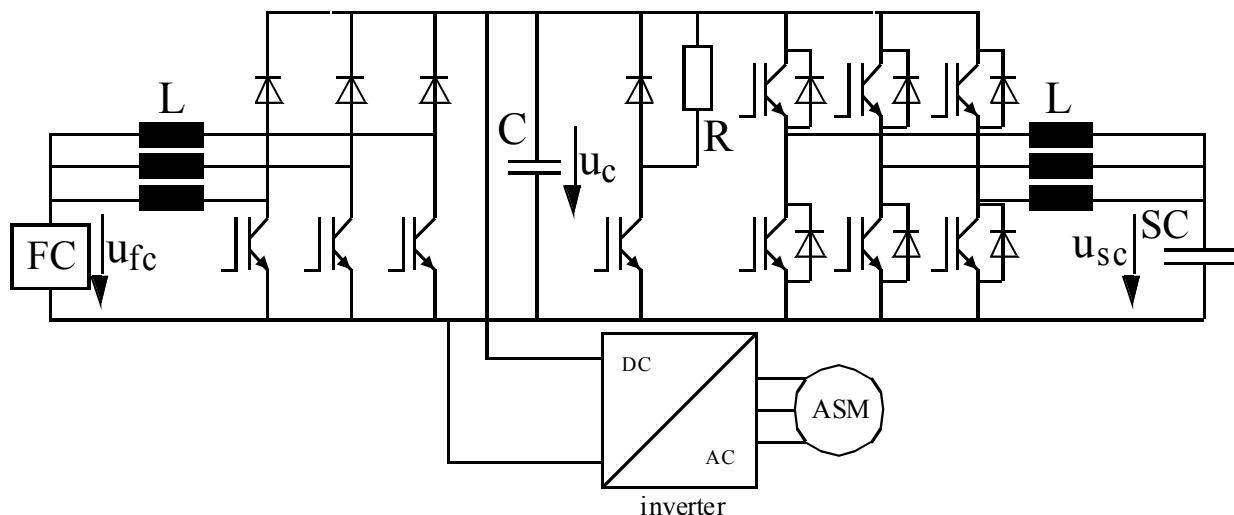


Figure 34: Topologie des gewählten DC-DC Konverters

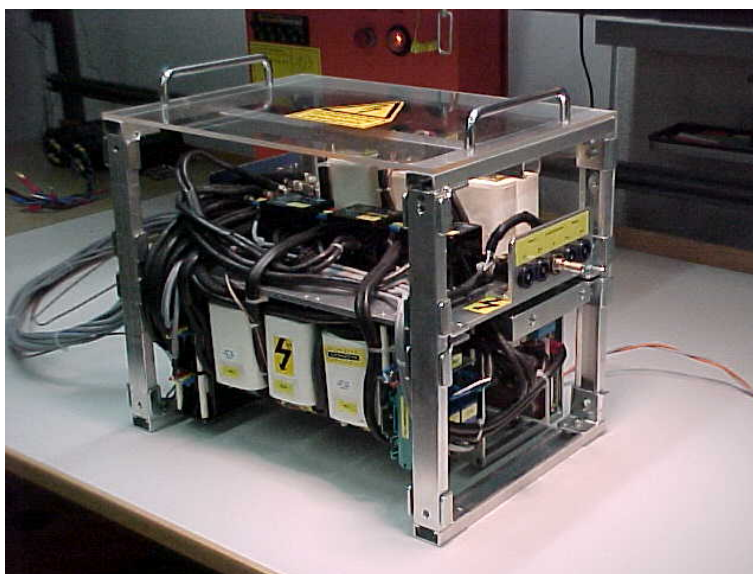


Figure 35: Ansicht des ersten Funktionsmoders des DCDC-Konverters

Zwischenkreisspannung	400V
Max. SC Strom	± 250 A
Max. SC Leistung	± 60 kW
Max. BZ Strom	250 A
Max. BZ Leistung	40 kW
Schaltfrequenz	15 kHz
Masse	42 kg
Wirkungsgrad (Strom > 35A)	> 95 %
Wirkungsgrad (Strom > 85A)	> 97 %

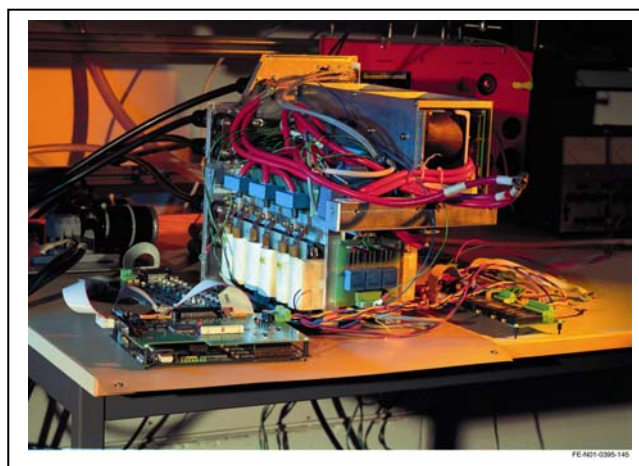


Figure 36: Hardware Realisierung (rechts) und den technischen Daten dazu (links)

5.3.2 Messwerte des DCDC-Wandlers

Der hervorragende Wirkungsgrad kann aus Fig. 37 abgelesen werden. Dabei gelten diese Werte für die Ströme zwischen BZ und Zwischenkreis, wie auch zwischen SC und Zwischenkreis. Wie ersichtlich spielt das Spannungsniveau eine deutliche Rolle.

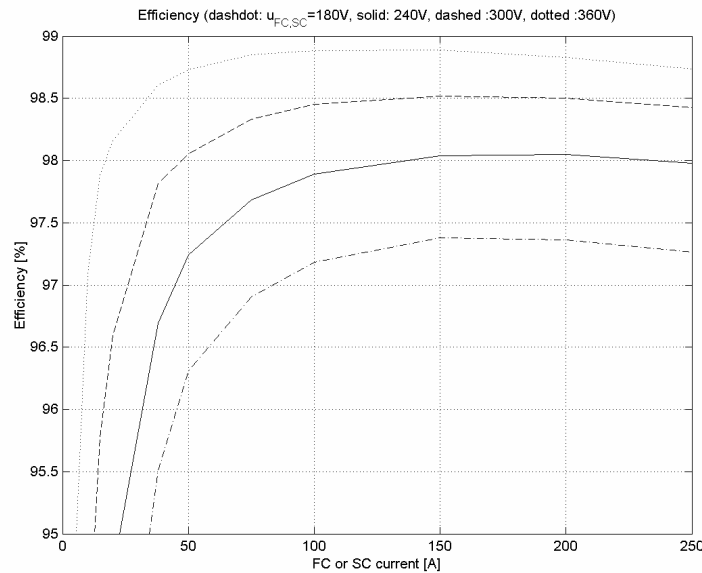


Figure 37: Wirkungsgrad des DCDC-Konverters bei verschiedenen Eingangsspannungen.

Die Robustheit der Regelung kann an schnellen Stromänderungen demonstriert werden. In Fig. 38 wird vom Elektromotor während der ganzen Messung eine konstante Leistung bezogen. Eine schnelle Veränderung der eingespeisten Leistung der BZ muss ausgeglichen werden. Die Zusatzleistung fließt in den SC (negativer Stromfluss). Die Zwischenkreis-Spannung reagiert nur minimal, da die Regelung sehr rasch reagiert.

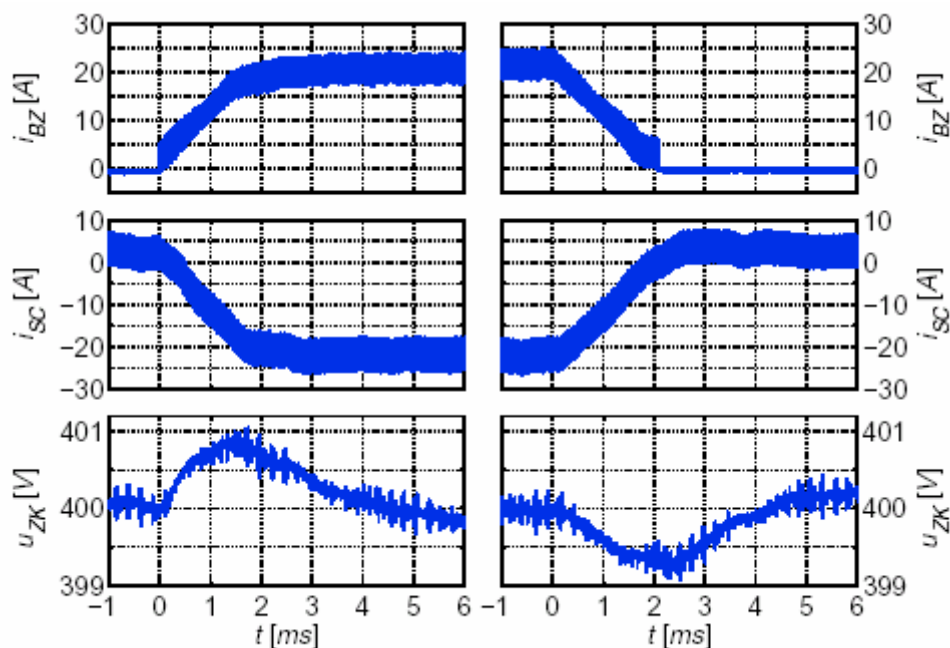


Figure 38: Dynamik der Anpassung einer Stromänderung im DCDC-Konverter

Da die Leistungselektronik in einem weitgehend abgeschlossenen Gehäuse platziert ist und nur die Spulen über eine leitende Platte mittels Wasserkühlung gekühlt werden, ist die thermische Belastbarkeit entscheidend. Untersuchungen bei Nennleistung haben gezeigt, dass diese Konstruktion den Anforderungen genügt (Fig. 39).

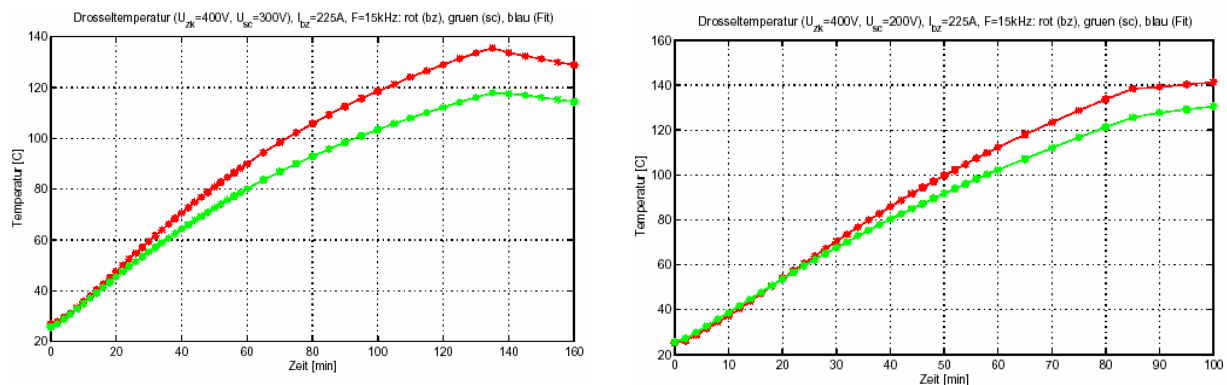


Figure 39: Temperaturverlauf der Drosseln im DCDC-Wandler bei Nennleistung und nomineller Spannung links und minimaler Spannung rechts.

5.4 Steuerung des Antriebstranges

Die Aufgabe des Antriebsmanagements umfasst die Steuerung und Regelung der Subsysteme BZ inklusive deren Hilfsaggregate und die SC-Module sowie das Energiefluss-Management des Antriebes. Die Verbindung zum Gesamtfahrzeug, das über die bestehende Infrastruktur im Fahrzeug angesprochen wird, erfolgt durch eine CAN-Bus Verbindung.

Die Aufgabe umfasst das Erstellen von Modellen, mit denen der Antrieb simuliert werden konnte. Eine Hauptaufgabe bestand in der Entwicklung der Regler und Steuerungsabläufe. Gleichzeitig wurden Strategien erarbeitet, wie die Betriebspunkte der verschiedenen Teilsysteme betrieben werden müssen, so dass ein optimaler Wirkungsgrad erzielt werden kann.

Die Evaluation, Beschaffung und Implementierung der Hardware war eine weitere Teilaufgabe.

5.4.1 Regelung des BZ-Systems

Auf der Luftseite sind die Luftmasse, deren Druck, Feuchte und die Limitierung der Eintrittstemperatur zu regeln. Auf der Wasserstoffseite ist dies der Druck des Wasserstoffs vor dem Stapel. Den eigentlichen Druckregelungen wird die Erzeugung der Pulse, sowohl auf der Luft- wie auch auf der Wasserstoffseite überlagert. Für die Kühlung wird die Steuerung des Durchflusses und der Kühlerleistung benötigt. Zusätzlich zur Einstellung der eigentlichen Betriebsparameter wird der Zustand des Systems überwacht und signalisiert, so dass es sich nicht vom zulässigen Betriebsbereich entfernt.

Luftseite: Die Luftmasse wird über einen Luftmengenmesser erfasst und mittels Temperaturabgleich in die Masse umgerechnet. Durch die Drehzahlregelung des elektrischen Antriebes des Verdichters kann der gewünschte Massenstrom eingestellt werden. Der gewünschte Druck wird über ein Drosselventil, das nach der BZ positioniert ist geregelt. Obwohl die beiden Größen als unabhängige Regelkreise ausgelegt sind, besteht eine gegenseitige Beeinflussung (z.B. löst ein Anstieg der geförderten Luftmasse auch ein Druckanstieg aus, wenn die Ventilstellung nicht angepasst wird.). Messungen haben aber bestätigt, dass die Brennstoffzelle ein genügendes Dämpfungselement ist. Zudem bestätigt der Betrieb, dass diese beiden Regler zufriedenstellend arbeiten.. Die Feuchte der Luft wird durch die Eindüsung von Wasser in den Verdichter beeinflusst. Gleichzeitig kann so der Temperaturanstieg der kompri-

mierten Luft limitiert werden. Die Einspritzmenge wird kennfeldgesteuert bestimmt, in Abhängigkeit der angesaugten Luftmasse, des Verdichtungsverhältnisses und der erzielten Eintrittstemperatur.

Wasserstoffseite: Für einen optimalen Betrieb der BZ-Stapel müsste auch auf der Wasserstoffseite der Massendurchsatz, der Druck, die Temperatur und die Feuchte geregelt werden. Aus Platz- und Gewichtsgründen wurde auf eine aktive Feuchte- und Temperaturregelung verzichtet. Trotzdem findet über die Rezirkulation des Wasserstoffs eine gewisse Befeuchtung des trockenen Treibstoffs aus dem Tank statt. Die Beschränkung der Temperatur und Feuchteregelung auf die Luftseite hat auch damit zu tun, dass der Massenfluss auf der Wasserstoffseite deutlich kleiner ist und die Gefahr einer Übertemperatur nicht gegeben ist, da der Treibstoff vom Hochdrucktank her entspannt wird.

Durch die Rezirkulation des Wasserstoffs entfällt ein Freiheitsgrad zur freien Wahl des Massendurchsatzes und des Druckes. Somit kann nur noch der Druck auf der Wasserstoffseite gewählt werden. Eine grosse Druckdifferenz zwischen der Luftseite und Wasserstoffseite der Membran, könnte diese beschädigen oder zerstören. Somit müssen bei der Druckregelung Vorsichtsmassnahmen getroffen werden, dass grosse Druckdifferenzen vermieden werden können (durch PI-Regler implementiert). Der Massenstrom wird sich somit selber einstellen durch die Anpassung des Druckregelventils und des Wasserstoffkonsums im Stapel. In ausgeregeltem Zustand entspricht der zufließende Treibstoff dem konsumierten. In transienten Phasen kann die Wasserstoffversorgung hinterherhinken und eine Knappheit an Wasserstoff kann zu einem Einbruch der Reaktion im Stapel führen. Diese Situation kann dadurch verhindert werden, dass sich im Stapel immer mehr Wasserstoff befindet, als momentan benötigt wird ($\lambda > 1$). Durch die Rezirkulation tritt kein Verlust nach aussen auf, und die Dynamik des Systems kann deutlich gesteigert werden gegenüber der Situation mit stöchiometrischer Wasserstoffversorgung.

Die Auslegung des Kühlkreislaufes aus regeltechnischer Sicht ist ziemlich einfach. Der Wasserkreislauf, der die Stapel kühlt wird über eine drehzahlregelbare Pumpe versorgt. Die Wärme wird über einen Luft-Wasser-Wärmetauscher an die Umgebung abgegeben. Der Luftstrom wird über zwei einzeln ansteuerbare Lüfter gesteuert. Da die sechs Stapel parallel gekühlt werden, muss bei der Absenkung der Pumpendrehzahl zwischen der Vermeidung von der ungenügenden Kühlung einzelner Stapel und dem Energieverbrauch der Pumpe optimiert werden. Die Pumpe wird mit einem PI-Regler geregelt. Die Lüfter werden im Zwei-Punkt-Mode betrieben.

5.4.2 Energie-Management

Der Energiefluss zwischen den BZ, den SC und dem Elektromotor muss im vornherein festgelegt werden, mit dem Ziel eines minimalen Verbrauchs. Die definitive Zuweisung der Leistungsflüsse unterliegt aber verschiedensten Kriterien. Die Haupteinflussgrößen sind:

- Lieferung des gewünschten Leistungsbedarfs
- Möglichst viel der kinetischen Fahrzeugenergie rekuperieren
- Minimaler Treibstoffverbrauch des Fahrzeuges.

Unter gewissen Umständen sind die Forderungen widersprüchlich und nicht zu erfüllen. So sind die SC möglichst voll zu halten, um die Leistung der Brennstoffzellen bei einem Beschleunigungsvorgang zu unterstützen. In diesem vollgeladenen Zustand können die SC aber die Leistung bei einer allfälligen Bremsung nicht rekuperieren. Um diesem Problem Rechnung zu tragen, werden die verschiedenen Forderungen in Abhängigkeit des Fahrzustandes des Fahrzeugs gewichtet, wobei die Erfüllung des Fahrwunsches jederzeit höchste Priorität hat.

Verschiedene Sicherheitsforderungen werden auf der höchsten Prioritätsstufe berücksichtigt:

- Die SC dürfen nicht überladen werden (Spannung < zulässiger Maximalspannung)
- Der Lade- und Entladestrom der SC darf den Maximalstrom nicht überschreiten, um die Leistungselektronik nicht zu überlasten.
- Die SC werden nicht weiter als halbe Nennspannung entladen (wegen schlechterem Wirkungsgrad und somit Überhitzungsgefahr.)
- Die Strombelastung der BZ darf den lieferbaren Strom der BZ nicht überschreiten (wichtig während des Warmlaufs und bei sehr schnellen Leistungsanpassungen).

Als Konsequenz wird jedes Energiemanagement ein Kompromiss zwischen Rekuperationspotenzial und Beschleunigungsfähigkeit sein. Aufbauend auf dieser Erkenntnis wird folgende Betriebsstrategie implementiert:

- Bei tiefen Geschwindigkeiten (typischerweise <60 km/h) ist der SC möglichst voll geladen zu halten.
- Mit höheren Geschwindigkeiten wird das Ladeniveau des SC so zurückgefahren, dass ein Grossteil der Bremsenergie zurückgewonnen werden kann. Die genauen Gradienten sind wiederum eine Funktion der Leistung, die vom Elektromotor verlangt werden.

Weitere Überlegungen zu verschiedenen Energie-Management Strategien sind in zu finden.

5.4.3 Steuerungshardware

Als Simulationswerkzeug und als Design-Werkzeug für die Regel- und Steuerungsalgorithmen wurde Matlab/SimulinkTM verwendet. Mit Hilfe der Matlab-Toolbox StateflowTM wurden Steuerungsabläufe und ganze Zustandsautomaten erstellt. Die Steuer- und Regelalgorithmen wurden über automatisierte Code-Generierung in ein dSpaceTM-System überführt. Im Fahrzeug wurde der Code auf einem MicroAutoBox (MABX) 1401/1504 System betrieben, das speziell für mobile Anwendungen entwickelt worden ist. Das MABX-System ist mit einem MotorolaTM PowerPC 603e mit 200MHz Taktfrequenz und einem slave-processor für die Aufgaben der digitalen I/O ausgerüstet. Da der MABX nur eine limitierte Anzahl von I/O Funktionen aufweist, wurde ein CAN-Bus für die Kommunikation zwischen der Instrumentierung und dem MABX eingesetzt. Die Sensor- und Aktuator-signale wurden lokal von einem sehr flexiblen WAGO 750 CANopen System analog und digital erfasst und in CAN-Signale umgewandelt. Module für beinahe jede Signalform stehen bei WAGO zur Verfügung und können nach Bedarf an einen Umwandlungsknoten angehängt werden.

5.5 Fahrzeuganpassungen

5.5.1 Fahrzeugkonzept

Das Fahrzeug wurde von einem Serienfahrzeug VW BORA abgeleitet. Der BORA HY.POWER[®] ist ein Elektroauto mit einer Elektromaschine, die die Vorderräder antreibt. Das BZ-System ist im Kofferraumbereich positioniert und die SC-Module befinden sich unterhalb der Rücksitzbank und im Vorderwagen. Dort ist ebenfalls der DCDC-Wandler sowie die Elektromaschine untergebracht (vgl. Fig. 40). Die Subsysteme wurden möglichst modular aufgebaut, so dass sie einfach ein- und ausgebaut werden können und im Vorfeld als Teilsystem auf dem Prüfstand in der Funktion überprüft werden können. Es wurde nach Möglichkeit geschlossene Kästen realisiert. Der Nachteil eines Zusatzgewichtes wurde in Kauf genommen.

Das Ziel des Fahrzeugkonzeptes ist es eine moderate aber akzeptable Beschleunigung zu erzielen und eine Nenngeschwindigkeit von 136 km/h zu erreichen.

Das Fahrzeuggewicht beträgt 1922 kg und kann wie folgt aufgeschlüsselt werden: Auf: Fahrzeuggrundgewicht 957 kg, Komponenten des elektrischen Antriebes (Motor, Umrichter, Getriebe usw.) 301 kg, Brennstoffzellensystem 496 kg und SC-Module 168 kg.

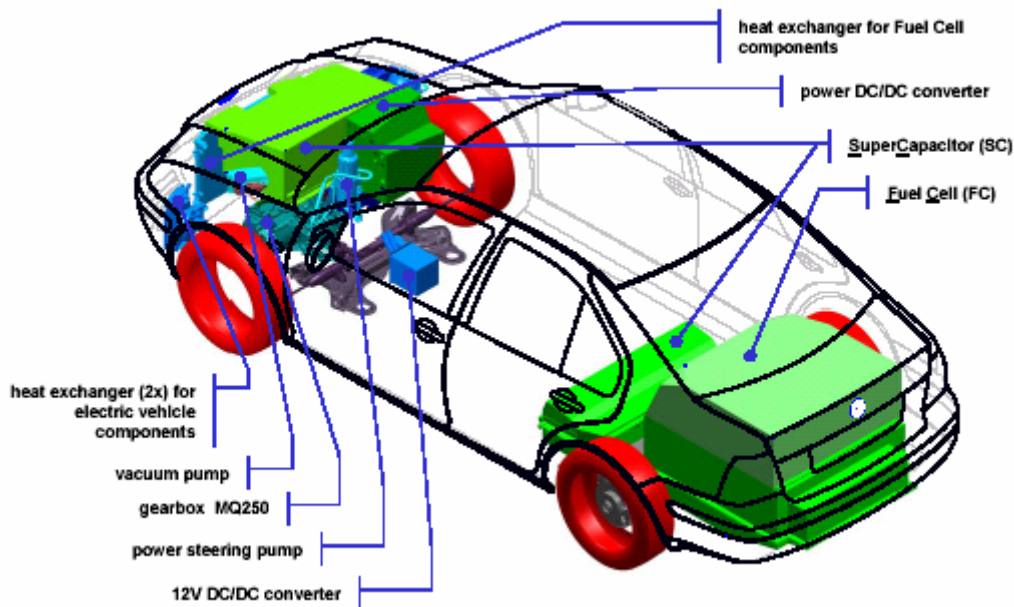


Figure 40: Package of the adapted systems for the fuel cell power train in the VW BORA HY.POWER®.

Für die Integration des BZ-Systems wurde der Boden des Kofferraums entfernt und einen Rahmen wurde integriert, so dass das BZ-System von unten montiert werden kann und sich die BZ in einem beinahe abgeschlossenen Raum befindet. In den Wänden befinden sich mehrere Service-Öffnungen. Das integrierte BZ-System lässt sich über Stecker mit dem Kabelbaum und an die Leistungsverkabelung anschließen. Zudem muss der Kühlkreislauf mit zwei Schläuchen verbunden werden. Das Fahrzeug ist in Fig. 41 abgebildet.



Figure 41: Der VW BORA HY.POWER® auf der Strasse.

Um das Fahrzeug für den rein elektrischen Betrieb vorzubereiten mussten folgende Systeme angepasst werden:

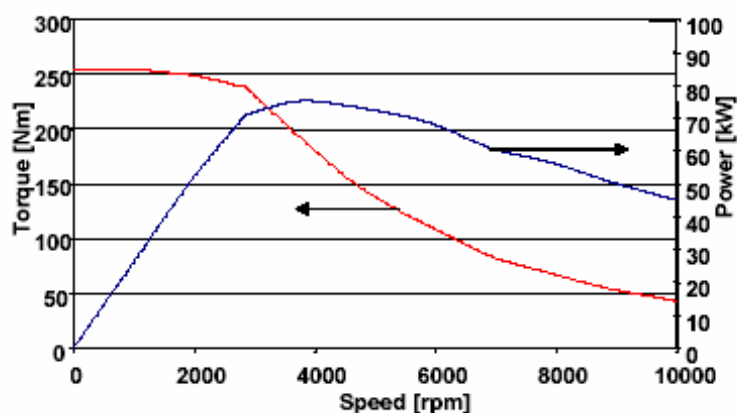
- Elektrische Maschine mit DCAC-Inverter und Reduktionsgetriebe
- 12-V Boradnetzspeisegerät (DCDC-Wandler von 400V)

- Elektro-hydraulische Lenkhilfe
- Elektrische Vakuumpumpe für die Bremskraftverstärkung
- Kühlkreislauf für die E-Maschine
- Elektrische Heizung inkl. Regelung
- Wasserstoffdetektionssystem
- Bordnetz für die elektrischen Komponenten
- Verlegung der Leistungskabel
- Anpassung des Fahrzeugmanagementsteuergeräts

5.5.2 Elektroantrieb

Der BORA HY.POWER[®] wird mittels einem kleinen kompakten Elektromotor angetrieben. Diese leise Maschine ist über ein einstufiges Untersetzungsgetriebe mit integriertem Differenzial an die Vorderräder gekoppelt. Die Asynchronmaschine ist über einen ACDC-Inverter an den Zwischenkreis gebunden. Die Maschine und der Inverter sind wassergekühlt. Die Hauptparameter sind in Fig. 42 dargestellt.

Die Realisierung im Heck wurde so gewählt, dass durch die Serviceöffnungen zu den Hauptkomponenten möglichst einfach Zugang war und durch die Absenkung nach unten das BZ-System einfach zu handeln war. Einen Blick vom Kofferraum her ist dargestellt in Fig. 43, vom Fahrzeuginneren hinter der Rücksitzbank in Fig. 44. Den Motorraum mit dem vorderen SC-Modul ist in Fig. 45 abgebildet. Unterhalb der SC-Box befindet sich der Elektromotor und der dazugehörige ACDC-Inverter.



- | | |
|--------------------------|-------------|
| - Maximalleistung | 75 kW* |
| - Nennleistung | 45 kW* |
| - max. Drehmoment | 255 Nm* |
| - max. Drehzahl | 10000 rpm |
| - Nenndrehzahl | 3000 rpm |
| - Masse Motor/Inverter | 91 kg/15 kg |
| - Volumen Motor/Inverter | 26 l/ 16 l |
| - Getriebeuntersetzung | 8.91 |

* Werte bei Eingangsspannung von 280 V

Figure 42: Drehmoment, Leistung sowie Hauptparameter der E-Maschine im HY.POWER[®]



Figure 43: Ansicht des BZ-Systems aus dem Kofferraum mit geöffneten Serviceklappen. Links sind die Spannungsüberwachungseinheiten zu erkennen, dahinter die BZ-Stapel. In der Mitte ist die Speiseplatte mit den Speiseräumen von Luft, Wasserstoff und Kühlwasser ersichtlich.

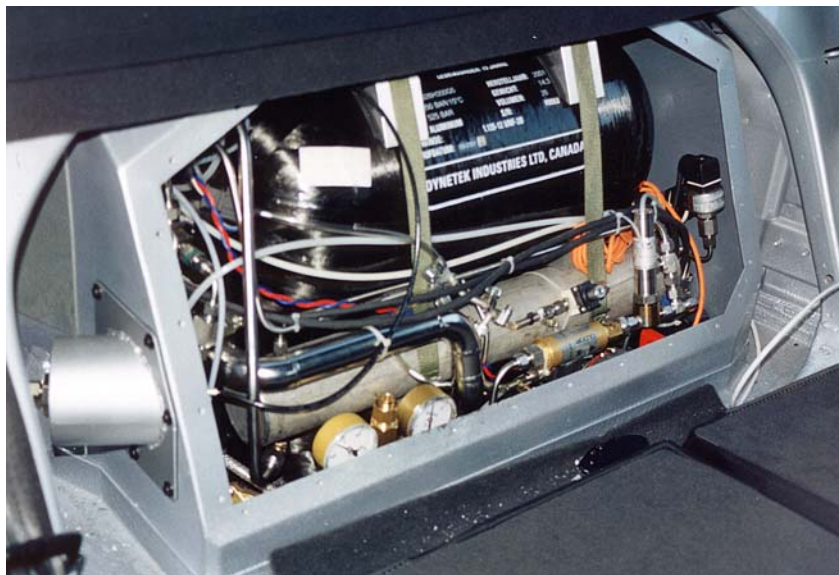


Figure 44: Ansicht des BZ-Systems vom Fahrgastraum aus. Gut ersichtlich ist der Hochdrucktank für den Wasserstoffspeicher.



Figure 45: Ansicht des Motorraums mit dem SC-Modul. Zwischen diesem Modul und der Frontscheibe ist der DCDC-Wandler erkennbar.

5.6 Versuchsergebnisse mit dem Antriebssystem und dem HY.POWER®

Der Antriebsstrang wurde vor dem Einbau ins Fahrzeug auf einem dynamischen Prüfstand an der ETH Zürich getestet. Dabei wurde das Fahrzeug mittels einer Elektromaschine emuliert (Fig. 46). Der Antrieb wurde nach dem Einbau ins Fahrzeug auf einem Rollenprüfstand der EMPA getestet, bevor das Fahrzeug auf der Strasse betrieben wurde.

5.6.1 Ergebnisse des dynamischen Prüfstandes

Auf dem dynamischen Prüfstand wurde zuerst der Elektromotor mit dem DCDC_Wandler in Betrieb genommen. Als Energiespeicher diente eine Bleibatterie mit einer Nominalspannung von ca. 250V. Damit konnte die Dynamik des Zusammenspiels zwischen dem Prüfstand, der Elektromaschine und dem DCDC-Wandler erprobt werden. Weiter konnte die Fahrzeugsteuerung das erste Mal mit dem Elektromotor zusammen getestet werden. In einer zweiten Phase wurden die SC-Module dazwischen geschaltet, so dass die Energieverteilung des DCDC-Wandlers überprüft und die Regelkreise den Anforderungen entsprechend optimiert werden konnten. Als letzte Komponente wurde das BZ-System als Subsystem in Betrieb genommen. Weiter wurde das System so angepasst, dass die Fahrprofile einer Passfahrt simuliert werden konnten.



Figure 46: Ansicht des dynamischen Prüfstandes mit allen relevanten Komponenten des Antriebsstranges

Start- und Stopsequenz: In Fig. 47 ist der Ablauf eines Starts und der Stop des Antriebssystems dargestellt, wobei die einzelnen Phasen mit schwarzen Strichen unterteilt sind. Die zeitlichen Abläufe sind nicht zeitoptimiert sondern ermöglichen einen sicheren Start des Systems unter den erforderlichen Randbedingungen. Für eine Weiterentwicklung besteht hier noch ein grosses Potenzial zur Zeiteinsparung.

Bis zum ersten Strich befindet sich das System in Ruhe. Anschliessend wird in Phase 2 die Brennstoffzelle mit Wasserstoff gespült. Damit können die katalytischen Reaktionen auf der Wasserstoffseite mit der im Stillstand in diesen Systemteil eingedrungenen Luft vermieden werden. In der dritten Phase wird mit dem auf dem 12V-Netz basierten Startlüfter Luft in die Stapel gespült. Gleichzeitig wird der Druck auf der Wasserstoffseite auf 1.2 bar geregelt. Sobald sich das Spannungsniveau der Brennstoffzellen auf einem minimalen Niveau stabilisiert haben, kann der Hauptverdichter angeworfen werden – angetrieben durch die Leistung der BZ-Stapel. Dies ist die Phase 4.

In der Phase 5 wird der Startlüfter, der bis dahin parallel zum Verdichter lief abgeschaltet und der Verdichter wird auf die gleiche Luftmasse nachgefahren. In der Phase 6 wird die Luft auf denselben Wert wie der Wasserstoff komprimiert. In den Phasen 7-10 wird der Druck von beiden Medien stufenweise erhöht. Im Anschluss werden der Hochdruckbehälter und der Niederdruckbehälter für den gepulsten Betrieb vorbereitet und anschliessend in den gepulsten Betrieb übergegangen. Es ist erkennbar, dass der Wasserstoffdruck vor den Stapeln nur in einem Band von ca. 0.2 bar pendelt. Dies genügt, bei grossem Durchsatz leider nicht, um den gewünschten Wegtransport der Wassertröpfchen im Stapel genügend gut zu ermöglichen.

In der Zeitspanne von ca. 120-150 Sekunden werden die verschiedenen Schütze geschlossen und somit das System spannungsmässig synchronisiert. Zwischen Sekunde 150-200 wird der SC mit 15 A belastet und die Spannungen in den SC-Modulen sinkt.

Nach Sekunde 200 wird das Gesamtsystem wieder stufenweise bis zu einem Druck von 1.3 bar abgesenkt, bevor der Verdichter abgeschaltet wird.

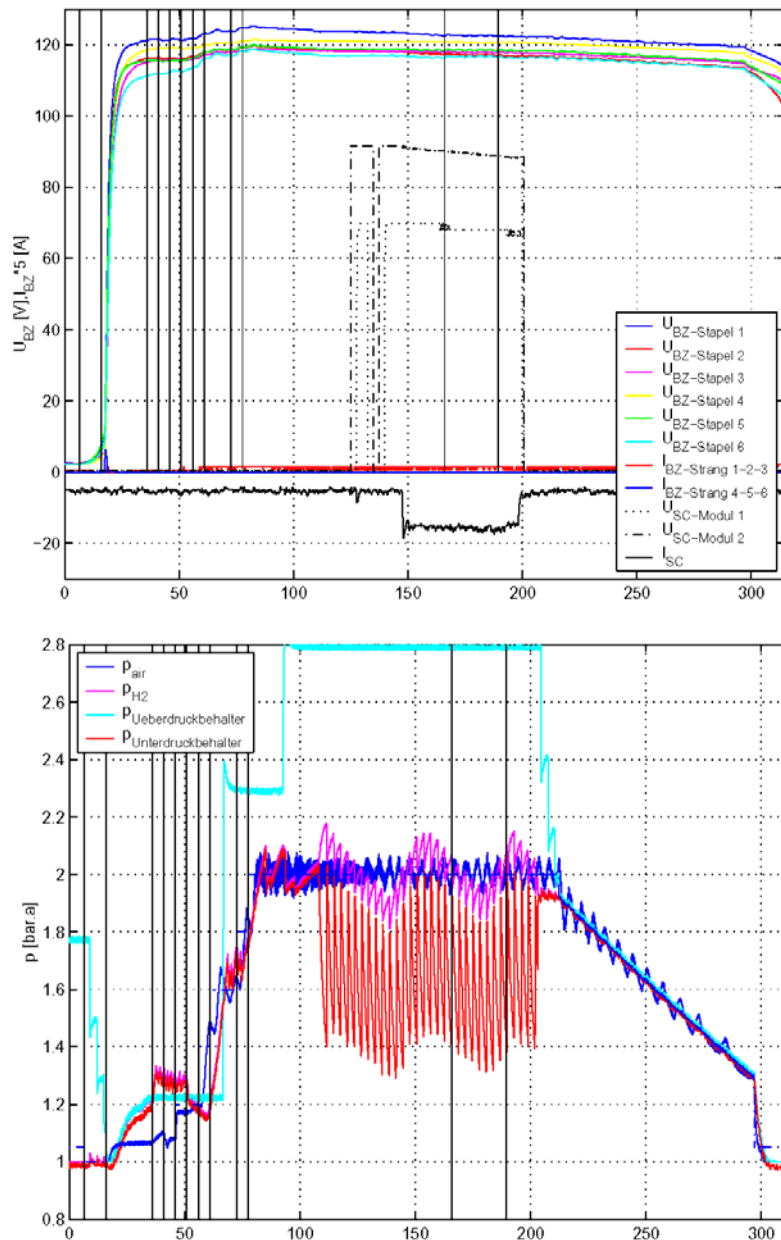


Figure 47: Spannungen und Ströme des Antriebes beim Start und Stop (a) und Drücke des Brennstoffzellensystems (b).

Leistungsverhalten des BZ-Systems: Obwohl die sechs Stapel je die 8 kW-Leistung bei einer Zellspannung von je 0.6 V erzielen, konnte die Leistung nicht vollständig auf den Verbund der 6 Stapel transferiert werden. Die Ursache liegt vor allem auf der Wasserstoffseite. Die Schwierigkeit der gleichmässigen Verteilung des Gasflusses, der auf der Wasserstoffseite deutlich kleiner ist als auf der Luftseite führte zu einem instabilen Betrieb. Wie in Fig. 48 dargestellt wird die Netto-Leistungsabgabe oberhalb von 20 kW instabil. Die Wasserproduktion auf der Anodenseite war grösser als erwartet, so dass sich die Strömungsbedingungen in den kleinen Kanälen verschlechterte. Obwohl die Druckpulse im Einzelstapel eine sehr effiziente Gegenmassnahme darstellte, konnte dieser Effekt, wohl auch durch die komplizierte Verrohrung und ungleichmässige Weglängen der Druckwellen, nicht im gleichen Masse reproduziert werden. Der Aufbau des Produktewassers auf der Wasserstoffseite führt dazu, dass der Wasserstoff gehindert wird, an die reaktiven Zonen der Membran zu gelangen, was zum Leistungseinbruch führt. Dieser Effekt kann auch in den Strom-Spannungskurven gut erkannt werden (Fig. 49). Als Abhilfe dient die Erhöhung des Wasserstoffflusses, wobei dieser zusätzliche Fluss an die Umgebung abgegeben werden

musste. Mit diesem zusätzlichen Fluss gelingt es, die Wassertropfchen zu entfernen und die Spannungsschwankungen deutlich einzuschränken.

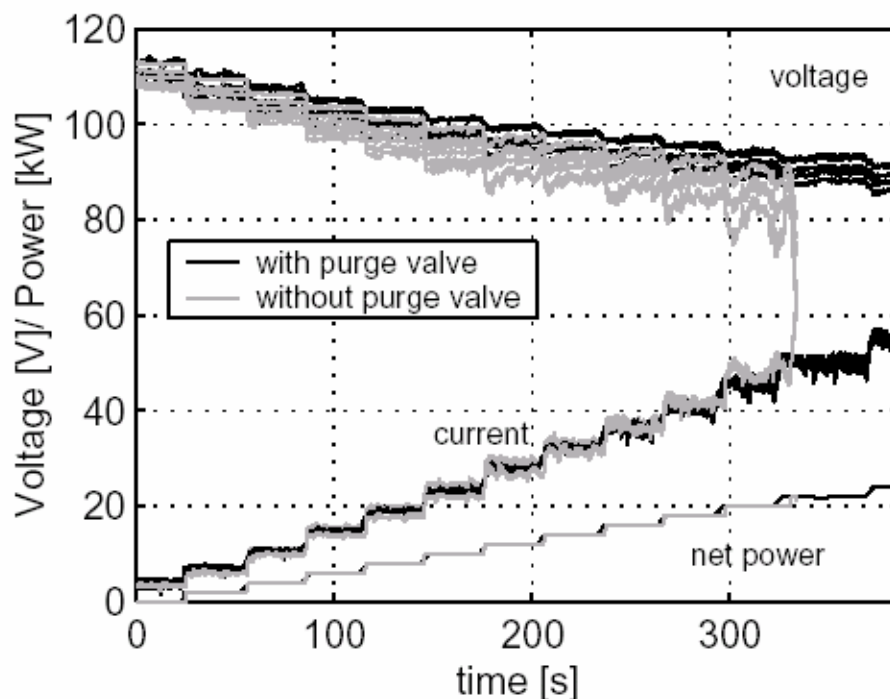


Figure 48: Leistungsverhalten des Stapelverbundes mit (dunkel) und ohne zusätzlichem Wasserstofffluss

Diese Lösung kann nur eine vorübergehende Lösung darstellen, da so zu viel Treibstoff abgeblasen wird. Dieser zusätzliche Wasserstoff kann mit einer Pumpe – oder mit anderen Mitteln – in den Rezirkulationspfad eingebunden werden. Für diesen Versuchsträger wurde auf diese Weiterentwicklung verzichtet, da es eine Neuauslegung der gesamten Wasserstoffversorgung erfordert hätte (inklusive der Verteilerplatte), und somit den möglichen Rahmen überschritten hätte.

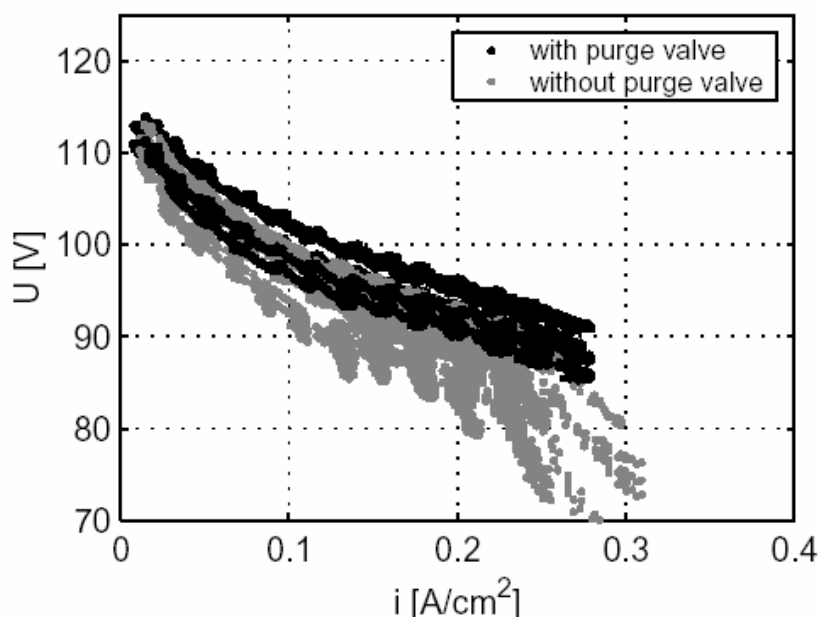


Figure 49: Strom-Spannungskurven des BZ-Systems mit und ohne zusätzlichem Wasserstofffluss.

BZ-System Wirkungsgrad: Der Systemwirkungsgrad des Brennstoffzellensystems wird so ermittelt, dass der Wasserstoff, der die Ströme an den BZ-Stapeln erzeugt in umgesetzten Wasserstoff umgerechnet wird. Auf der Ausgangsseite wird derjenige Strom und die Spannung gemessen, die dem DC-Bus von der Brennstoffzellenseite zugeführt wird.

Der Wasserstoff der durch die Zellen hindurch rezykliert oder allenfalls abgeblsaen wird, wird in dieser Betrachtung nicht mitberücksichtigt. Der Massenstrom an Wasserstoff wird wie folgt ermittelt:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{i_{FC} \cdot MW_{H_2} \cdot N_{cells} \cdot A_{FC}}{2 \cdot F}$$

wobei \dot{m}_{H_2} = Massenstrom H₂ [kg/s],
 i_{FC} = Stromdichte in der Brennstoffzelle [A/cm²],
 MW_{H_2} = Molekulargewicht von H₂ [2.016 kg/kmol],
 N_{cells} = Zellenzahl der Stapel [750],
 A_{FC} = Aktivfläche pro Zelle [204 cm²]
 F = Faraday-Konstante [96.484*10³ C/mol].

Damit kann der Wirkungsgrad wier folgt definiert werden:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC} - P_{Aux}}{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2}}$$

wobei \dot{m}_{H_2} = Massenstrom H₂ für die elektrochemische Reaktion [kg/s],
 LHV_{H_2} = Unterer Heizwert von H₂, [J/kg],
 P_{FC} = Elektrische Leistung der BZ [W],
 P_{Aux} = Leistung der Hilfsaggregate [W].

Dabei bezieht sich der Wirkungsgrad des BZ-Systems auf den unteren Heizwert des Wasserstoffs und den elektrischen Strom, der dem Antriebssystem zur Verfügung steht und somit die Hilfsaggregate (Luftverdichter, Kühlpumpe, Ventile usw.) mitberücksichtigt.

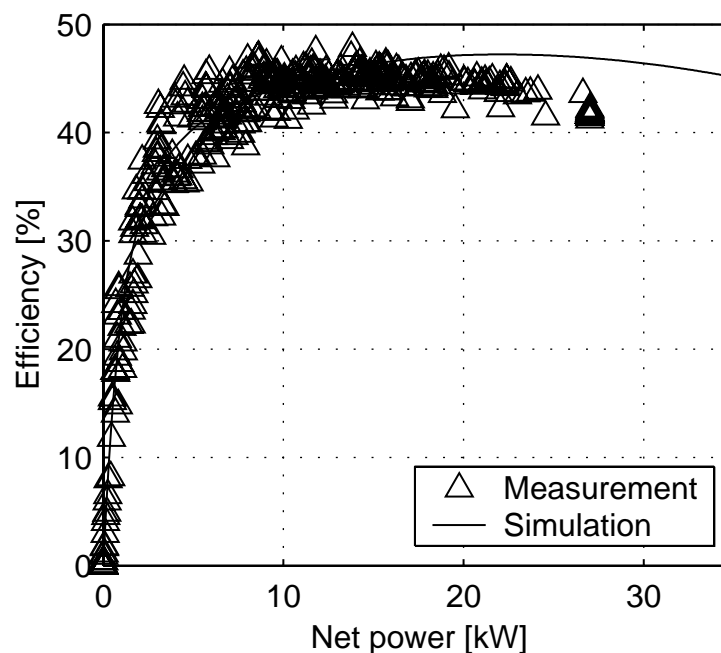


Figure 50: Wirkungsgrad des BZ-Systems (ausgehend vom unteren Heizwert des H₂) vs. Elektrischer Netto-Leistungsabgabe.

Wie in Fig. 50 erkennbar ist, liegt der Wirkungsgrad in den relevanten Betriebsbereichen meist oberhalb von 40%. Die BZ-Systemleistung wurde meist auf 27 kW beschränkt, um nicht in die oben beschriebenen instabilen Gebiete zu gelangen.

Simulation der Passfahrt: Als Funktionstest des Fahrzeuges wurde die Überquerung eines Alpenpasses mit über 2000 m.ü.M. gewählt. Dieses Erfolgskriterium für den Antrieb wurde deshalb gewählt, da die Anforderungen für eine solche Fahrt hoch im Vergleich zur täglichen Fahrt in der Stadt ist. Im Vorfeld wurde mit einem Elektrofahrzeug mit ähnlichem Gewicht die Simplonstrecke abgefahren, um ein vergleichbares Streckenprofil und eine Leistungsanforderung zur Simulationszwecken zu erhalten. Wie in Fig. 51 ersichtlich, kann an diesem Pass durchaus mit höheren Geschwindigkeiten gefahren werden, obschon die Durchschnittsgeschwindigkeit moderat bleibt. Die durchschnittliche Steigung beträgt 5.7%. Die Beschleunigungen und Abbremsungen erzeugen an allen Antriebskomponenten höchste Belastungen, so dass das Bestehen einer solchen Fahrt als Indiz gewertet werden kann, dass der Antrieb für weitere Fahreinsätze geeignet ist.

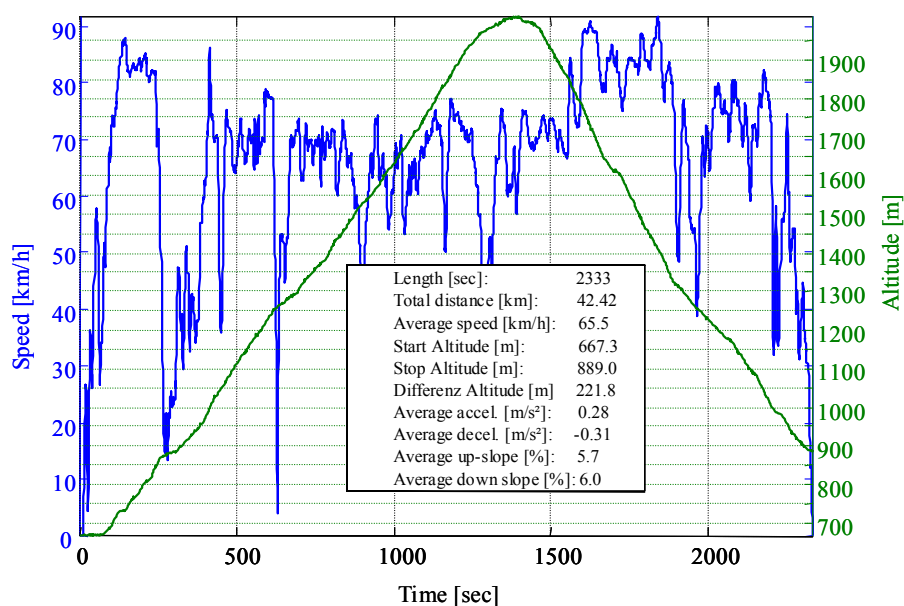


Figure 51: Geschwindigkeits- und Höhenprofil der Teststrecke Brig-Simplon-Gondo

Der Vergleich von benötigten Leistungen und Energieaufwänden auf der Pass-Teststrecke zu den standardisierten Testzyklen, mit denen Verbrauchs- und Emissionstests gefahren werden zeigt Fig. 52. Es wird klar, wie stark sich die Belastung auf der Simplon-Teststrecke von den anderen Zyklen unterscheidet. Zum Beispiel ist der durchschnittliche Leistungsbedarf auf der ansteigenden Rampe des Simplons mehr als fünf mal grösser als im NEFZ-Testzyklus. Die benötigte spezifische Energie (Wh/km) ist für die Bergrampe 2.8 mal so hoch wie im NEFZ.

Anhand der gewonnen Profile wurden simulierte Fahrttests bereits im Labor auf dem dynamischen Prüfstand durchgeführt. Fig. 53 zeigt die abgeleitete Drehzahl des Elektromotors für die ersten 6 km der nördlichen Simplonrampe. Das Profil ist auch in Fig. 51 wiederzuerkennen. Die dazugehörige Drehmoment, das vom Fahrer gewünscht wird ist als Sollwert in Fig. 54 dargestellt. Analog ist die Leistung in Fig. 55 aufgetragen. Die Charakteristik der Bergstrecke wird auch daran klar, dass es nur wenige Phase gibt, wo das Moment des Antriebes in ein Bremsmoment übergeht.

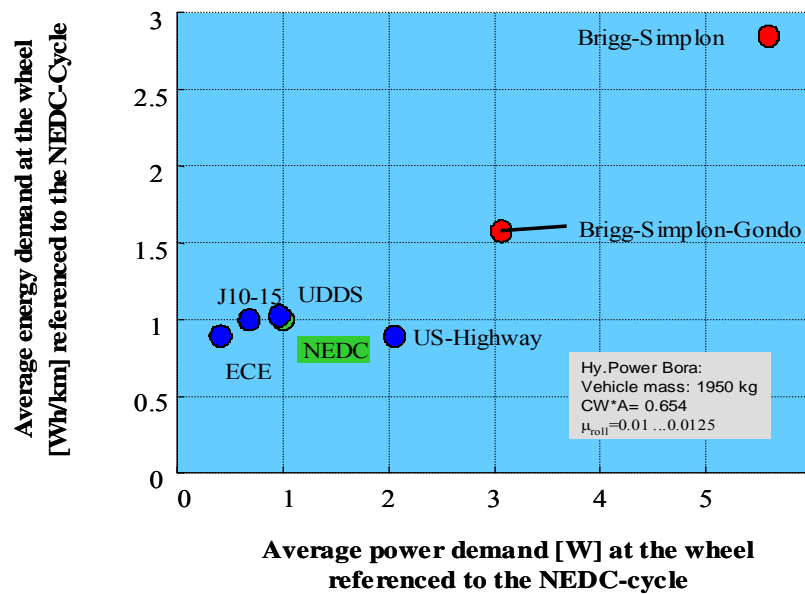


Figure 52: Vergleich der Antriebsbelastung (Leistungsbedarf und Energieintensität) der Bergstrecke Brigg-Simplon-Gondo gegenüber Standard-Test-Zyklen.

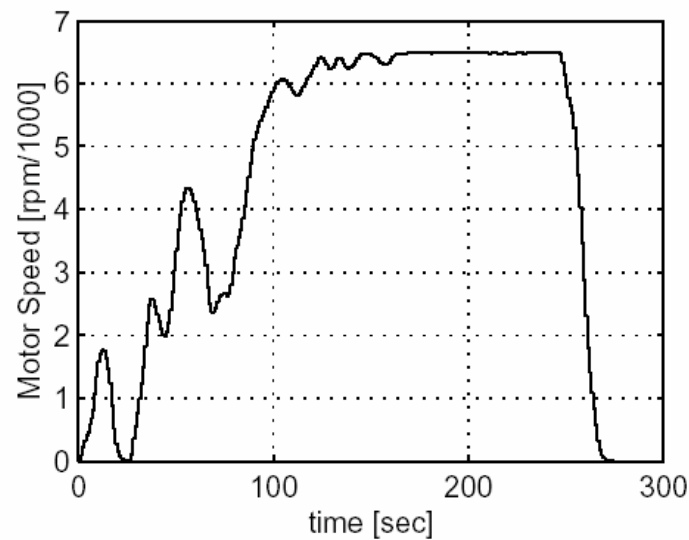


Figure 53: Drehzahlprofil des Elektromotors auf den ersten 6 km der Simplonrampe

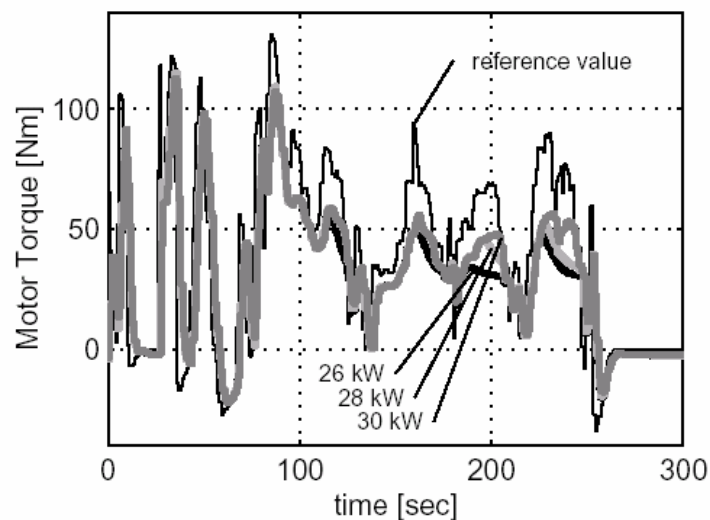


Figure 54: Drehmomentprofile-Anforderung auf den ersten 6 km der Simplonrampe und die gelieferten Momente in Abhängigkeit der BZ-Systemleistung

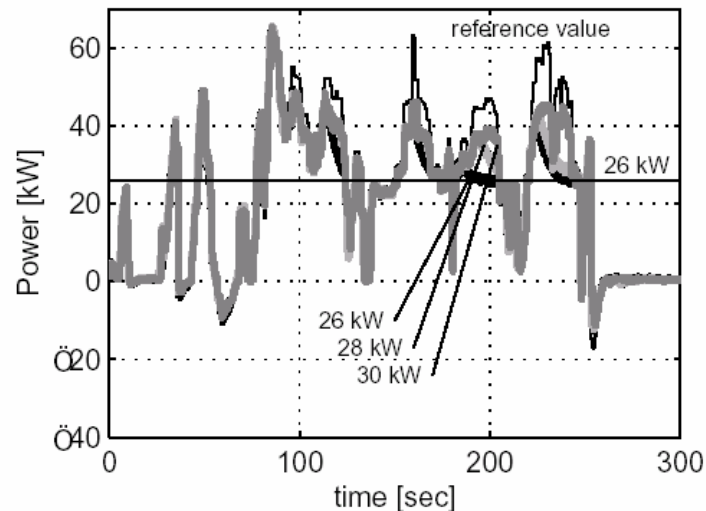


Figure 55: Leistungsprofil-Anforderung auf den ersten 6 km der Simplonrampe und die gelieferten Leistungen des Antriebssystems in Abhängigkeit der BZ-Systemleistung

Die Strecke wurde nun mit verschiedenen Fahrstrategien und maximalen Leistungsniveaus der Brennstoffzellen betrieben. Fig. 56 zeigt die Leistung die die Brennstoffzellenstapel direkt produzieren. Im Vergleich der hier gezeigten Bruttoleistungen und den abgegriffenen Nettoleistungen kann ein Leistungsbedarf für die Hilfsantriebe bei Maximalleistung von 14-17% abgelesen werden. Bei der Beurteilung der Spannungsverläufe sieht man bei der Kurve mit maximal 30 kW-BZ-Output erste Anzeichen, dass die Zellenspannung wieder instabil wird.

Die Leistung des SC kann am Spannungsverlauf, der in Relation zum Füllstand des SC steht, abgelesen werden (Fig. 57). Man erkennt, dass die Leistungsspitzen, die über die Möglichkeiten der BZ gehen (vgl. Fig. 55) durch Leistung aus dem SC kompensiert wird. Deutlich erkennbar ist auch, dass das Niveau des Leistungsbeitrages der BZ Einfluss auf die Zeit hat, während der der SC das Leistungsdefizit ausgleichen kann. In Fig. 57 ist deutlich, dass bei einer Limitierung bei 26 kW der BZ-Leistung der SC 4 mal an den Rand des Betriebsbereichs kommt (er wird leer). Dadurch muss auch die Leistung, die dem Antriebsmotor zur Verfügung gestellt werden kann, limitiert werden und es tritt eine Reduktion in der Betriebsdynamik ein (vgl. Fig. 54 und 55). In Fig. 57 ist auch die Betriebsstrategie erkennbar, bei der das maximale Niveau des SC mit zunehmender Geschwindigkeit gesenkt wird, um eine Rückspeicherung der Bremsenergie zu ermöglichen. In den ersten 100 Sekunden wird das Spannungsniveau mit der Fahrzeuggeschwindigkeit nach unten angepasst.

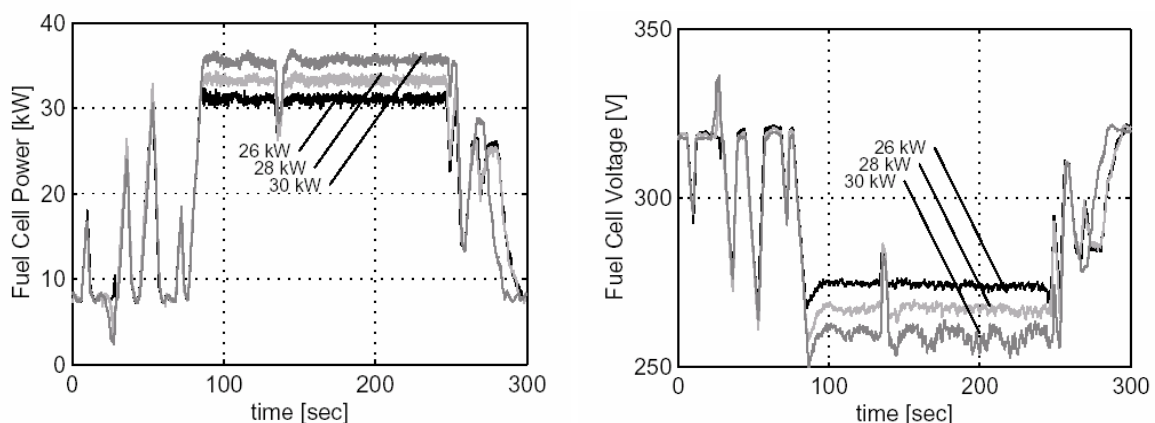


Figure 56: Bruttoleistung des BZ-Systems (links) und Spannungsverläufe (rechts) auf den ersten 6 km der Simplonrampe in Abhängigkeit der maximal zulässigen Netto-BZ-Systemleistung

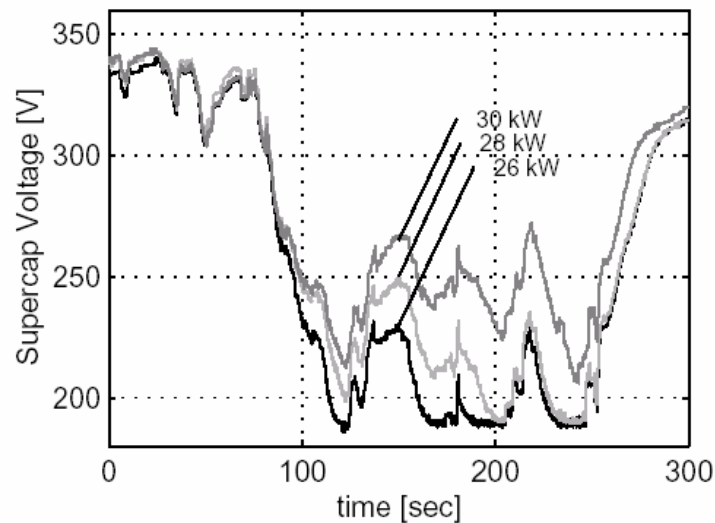


Figure 57: Spannungsverläufe des SC auf den ersten 6 km der Simplonrampe in Abhängigkeit der maximal zulässigen Netto-BZ-Systemleistung

5.6.2 Messungen auf dem Rollenprüfstand

Rollenprüfstandsmessungen fanden auf dem Rollenprüfstand an der EMPA in Dübendorf und bei der FEV Motorentechnik GmbH in Aachen statt. Auf dem Rollenprüfstand konnten v.a. Verbrauchsmessungen in standardisierten Zyklen, Messungen an konstanten Bedingungen im Fahrzeug und Lärmmessungen durchgeführt werden. Abgasmessungen waren nicht erforderlich, da keine Abgase ausser Wasserdampf entstand. Allfällige Wasserstoffkonzentrationen wären durch das H₂-Detektionssystem erkannt worden. Es wurde 4 Sensoren an unterschiedlichen Orten im Fahrzeug eingesetzt. Das Verhalten des Gesamtsystems im Fahrzeug ist geprägt durch die Charakteristik des Brennstoffzellensystems.

Dynamik des Fahrzeugs: Auf dem Rollenprüfstand konnte zumersten Mal der Antrieb im eingebauten Zustand überprüft werden. Eine Prüfung war die scharfe Anfahrt des Fahrzeugs vom Stillstand. Dabei geht es darum zu sehen, wie der Vorteil der Elektromaschine, das Moment schon bei Stillstand abgeben zu können mit der Dynamik des Fahrzeugs und des Antriebes reagiert. Zu deieesem Zweck wurde die Anpassung der BZ-Leistung bewusst auf 1 kW/sec. Beschränkt um den Effekt des Ablösens des SC sehen zu können. In Fig. 58 ist dieser Test dargestellt. Ersichtlich ist auch, wie die Limitierung des Fahrwunsches reduziert wird, wenn die Leistungsfähigkeit des SC-Speichers erschöpft ist. Deutlich ist auch die sanfte Reduzierung der Leistungen bei der Annäherung an die Grenzen um schlagartige Verhaltensänderungen zu vermeiden.

Bei der Erreichung der gewünschten Leistung der BZ wird einen Unterspannung einen kurzzeitigen Überstrom festgestellt (vgl. Fig. 59). Durch die kurzzeitige Unterversorgung mit Wasserstoff infolge der Trägheit der Regelorgane im Versorgungssystem reduziert sich die Spannung an der BZ. Da das System leistungsgesteuert ist, erhöht sich der geforderte Strom. Dieses Verhalten ist prinzipiell positiv rückgekoppelt und kann allenfalls die BZ an die maximale Stromlimite treiben.

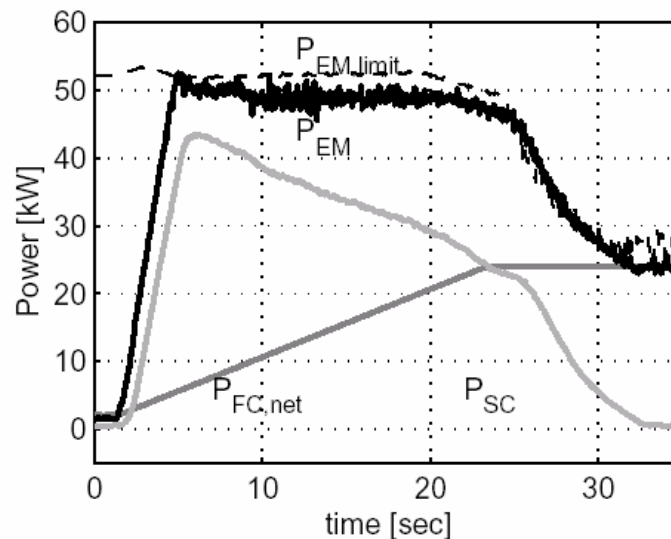


Figure 58: Leistungsverlauf von BZ, SC und Anforderung des Fahrerwunsches. Eingezeichnet ist auch die Limitierung, die theoretisch unter Einhaltung der aktuellen Betriebsgrenzen erreichbar wäre.

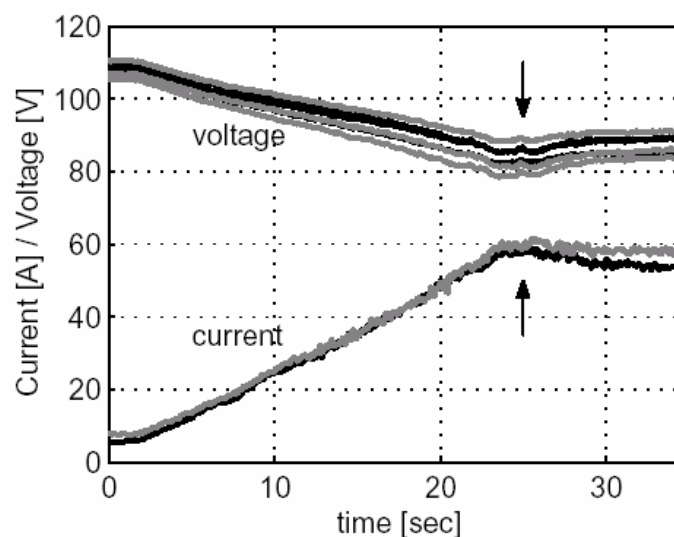


Figure 59: Verlauf von BZ-Spannung und BZ-Strom. Pfeile zeigen Stromspitze und Unterspannung infolge kurzfristigen Wasserstoffmangel

Verbrauchsmessung im NEFZ: Auf der Rolle wurden NEFZ-Zyklen gefahren, um den Verbrauch des Fahrzeuges zu ermitteln. Dabei wurden Prüfstands-Einstellungen verwendet, die auf Messungen mit einem Elektrofahrzeug beruhen.

Die Verbrauchsmessungen werden anhand des Differenzdruckes im Wasserstofftank durchgeführt. Die Aufzeichnung einer Messung ist in Fig. 60 dargestellt.

Wird die Wasserstoffmasse betrachtet die in Strom umgesetzt wurde ergibt sich folgendes:

Verbrauch H2 im NEFZ	0.176 – 0.192 kg H2/Test (ohne purging)
Verbrauch H2 im NEFZ	0.277 – 0.309 kg H2/Test (mit purging)

Ausgehend von dem Potenzial, wo das purging durch eine Pumpe vermieden werden kann, besteht die Möglichkeit einen Verbrauch zu erzielen, der wie folgt zu liegen kommt:

Verbrauch im NEFZ	1.6 kg – 1.74 kg H2/100 km (6.1 – 6.6 l _{Benzin} /100km)
-------------------	---

Heute beträgt der Anteil des purgings noch ca. 35-40% des umgesetzten Treibstoffes.

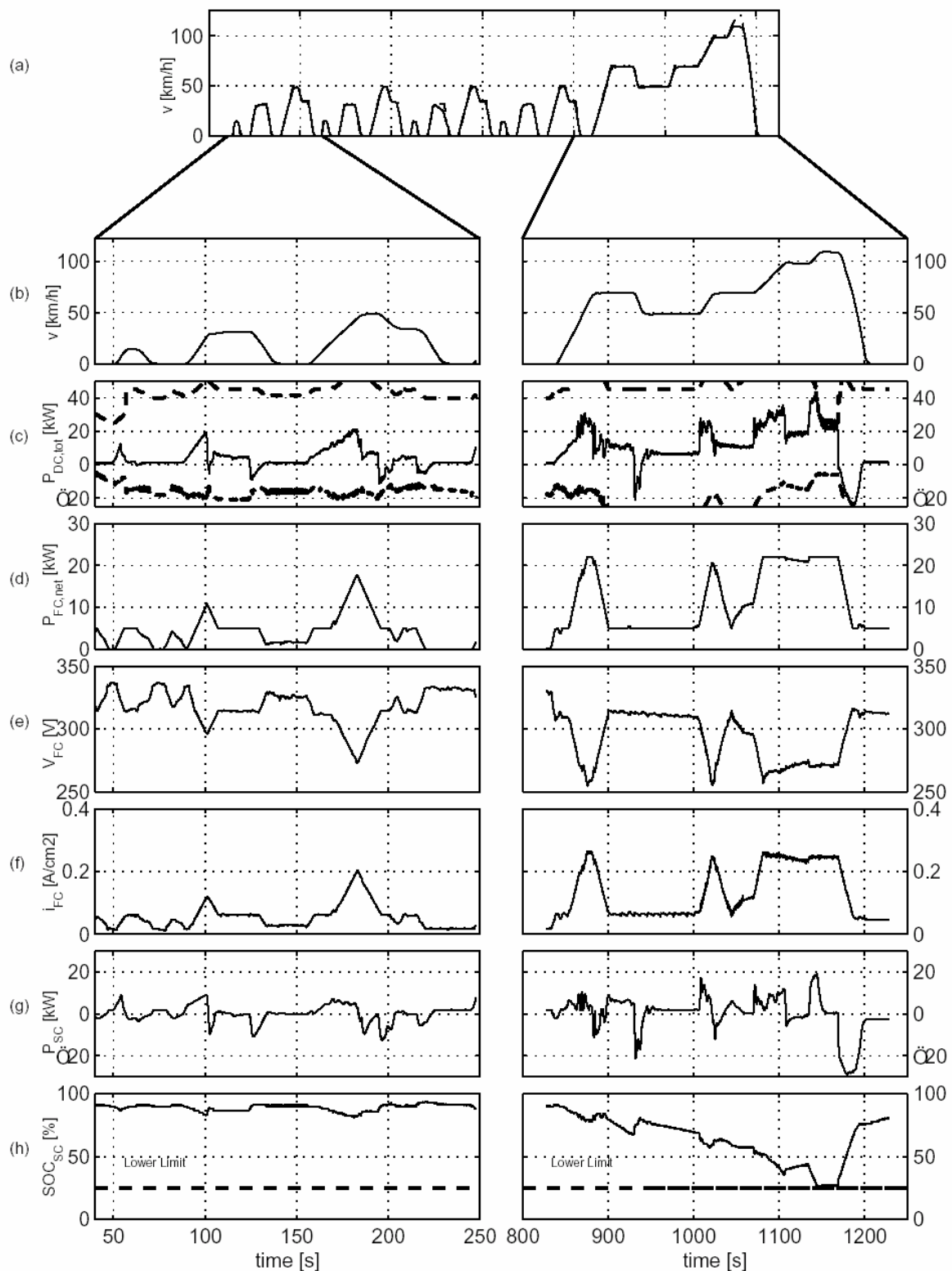


Figure 60: Aufzeichnungen eines NEFZ-Zyklus. A) Sollgeschwindigkeit, b) gefahrene Geschwindigkeit, c) Leistungsbedarf auf dem DC-Bus, d) Netto BZ-Leistung, e) BZ-Spannung, f) BZ-Stromdichte, g) SC-Leistung, h) Energieniveau des SC.

Simulationen mit dem gefahrenen Fahrzeugdaten haben ergeben, dass die gewählten Einstellungen am Prüfstand und Messungen mit ca. 0.9% Steigungsdifferenz korrelieren.

Berücksichtigt man diese zusätzliche Steigung in der Verbrauchsberechnung, so erhält man einen Verbrauch für das Fahrzeug in der Ebene von 1.42 kg H₂/100km (5.3 l_{Benzin}/100km).

Durch die Rekuperation der Bremsenergie kann der Verbrauch gegenüber dem Verzicht der Rekuperation um 14.9% reduziert werden.

5.6.3 Versuchsfahrten auf der Strasse

Wie oben erwähnt war die Passfahrt über den Simplonpass der Funktionsnachweis des Konzeptes, des Brennstoffzellensystems, des Energiespeichers und der Antriebskomponenten (Fig. 61). Neben den hohen Anforderungen bezüglich Energiedichte und Leistungsvermögen stellte auch die winterlichen Umgebungsbedingungen im Januar 2002 eine Herausforderung dar. Zum einen waren die Temperaturen von bis zu -10 °C eine Herausforderung. Während dem Betrieb konnten keine nachteiligen Auswirkungen auf den Antrieb festgestellt werden. Bei abgestelltem Fahrzeug bestand aber eine latente Gefahr, dass das de-ionisierte Kühl- oder Befeuchtungswasser einzufrieren begann. Eine weitere Unbekannte war der Einfluss des Salzgehaltes in der Luft. Durch den Luftfilter und den Wärmetauscher bestand eine genügend starke Ausscheidungsmöglichkeit, so dass die Menge, die mit der Luft bis zum BZ-Stapel vordrang zu keiner Leistungseinbusse führte.

Die Luftdruckverhältnisse auf dem 2005 m hohen Simplonpass führten zu einer Extrembelastung des Verdichters. Da der Druck vor der BZ stets auf 2 bar geregelt wird, musste der Verdichter die veränderten Umgebungsbedingungen mit Verdichtungsverhältnissen bis zu 2.8 kompensieren. Der elektrische Antrieb wurde bis zu seiner Grenzbelastung beansprucht.



Figure 61: Der BORA HY.POWER® am 16.1.2002 auf dem Simplonpass

Im weiteren wurden verschiedene Testfahrten auf spezifischen abgesperrten Strecken für Beschleunigungsmessungen (0-80 km/h in 15 Sekunden), für die Ermittlung der Höchstgeschwindigkeit (115 km/h) und zur Demonstration der Fahrbarkeit durchgeführt. Aber auch Versuchsfahrten auf öffentlichen Strassen wurden sowohl in der Schweiz wie auch in Deutschland durchgeführt. Insgesamt wurden über 1000 Versuchskilometer zurückgelegt. Über der ganzen Betriebszeit von annähernd 1 Jahr wurde ein grösserer Service durchgeführt, bei dem einzelne Zellen der BZ ausgetauscht werden mussten und die Hochdruckpumpe für das Befeuchtungswasser ausgetauscht werden musste (Korrosionsprobleme). In Fig. 62 sind die Strom-Spannungskurven der BZ-Stapel während einer längeren Versuchsfahrt aufgezeichnet. Deutlich sind die beiden Stränge zu sehen und die Breite, innerhalb derer die verschiedenen Stapel im dynamischen Betrieb streuen können.

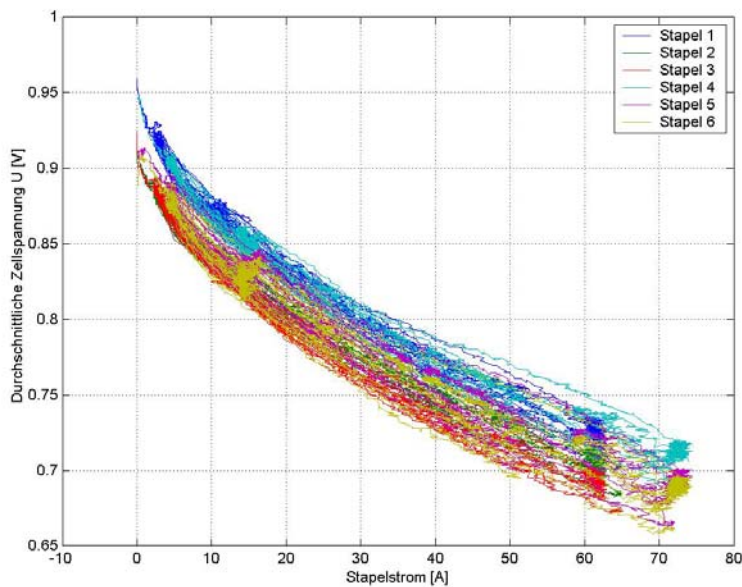


Figure 62: Strom-Spannungskurven im dynamischen Betrieb im Fahrzeug

6 Öffentlichkeitsarbeit

Eine Zielsetzung dieses Projektes war es auch, die Möglichkeiten der Kombination von Brennstoffzelle und Supercaps der Öffentlichkeit zu demonstrieren. Gerade diese Technologieplattform bietet sich an, um diese Möglichkeiten einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

6.1 Passüberquerung

Der Auftakt für den öffentlichen Auftritt war die Passfahrt, die sowohl vom Fernsehen wie auch durch die schreibende Presse begleitet wurde (Fig. 63). Diese Veranstaltung wurde durch eine gemeinsame Pressemitteilung von Volkswagen und dem PSI unterstützt.



Figure 63: Film- und Fotoaufnahmen für elektronische und Print-Medien

6.2 Automobilsalon Genf 2002

Nach dem erfolgreichen Strassentest wurde das Fahrzeug am internationalen Genfer Automobilsalon 2002 ausgestellt. Dank der Unterstützung von Volkswagen und der AMAG

Schweiz war es möglich das Fahrzeug an einem eigenen Stand auszustellen. Die Botschaft bestand aus mehreren Teilen:

- a) Emissionsfreie Mobilität ist auch in einem Land mit hohen Bergen durchaus machbar.
- b) Schweizer Institutionen beteiligen sich aktiv an der Lösung gesellschaftlich relevanter Fragestellungen in Zusammenarbeit mit internationalen Partnern
- c) Auch an der Herstellung von Treibstoff aus nachhaltig erneuerbaren wird entwickelt. Es gilt die ganze Kette von der Treibstoffproduktion bis zum Antriebswirkungsgrad im Auge zu behalten. Es gibt Möglichkeiten einen substantiellen Anteil der Energie für die individuelle Mobilität durch nachhaltig erzeugte Energieformen sicher zu stellen.
- d) Wir sind an ganzheitlichen Lösungen interessiert und arbeiten an deren Entwicklung.

Die über 700'000 Besucher des Salons zeigten reges Interesse am Fahrzeug und an der gezeigten Technik (Fig. 64). Es ergaben sich auch viele neue Kontakte zu Firmen, mit denen in der Zwischenzeit über neue Projekte diskutiert wird oder solche schon begonnen wurden.

An der Eröffnungsfeier stattete auch Bundespräsident Villiger dem Stand einen Besuch ab. Dies wurde zum Medienereignis, das sowohl in der „Tagesschau“ wie auch im „10vor10“ des Schweizer Fernsehens gezeigt wurde.



Figure 64: Interessante Diskussionen und grosses Publikumsinteresse am Genfer Automobilsalon 2002

6.3 Pressekontakte

Anschliessend an den Genfer Automobilsalon verzeichneten wir von verschiedenen Medienvertretern Interesse über das Projekt zu schreiben. Es wurde in vielen Tages- und anderen Zeitungen sowie Fachmagazinen dargestellt.

6.4 Umwelt-politische Öffentlichkeitsarbeit

Die Botschaft vom emissionsfreien Verkehr, sofern die Treibstoffherstellung auf nachhaltig erzeugten Energieträger wie Biomasse oder nachhaltig erzeugtem Strom basiert, wurde auch am Earth-Summit in Johannesburg, Südafrika im September mit dem Fahrzeug vermittelt (Fig. 65).



Figure 65: Ausstellung des HY.POWER® am Earth-Summit in Johannesburg 2002

7 Erkenntnisse

Aus diesem Projekt können verschiedene Erkenntnisse aus den einzelnen Aktivitäten mitgenommen werden. Dabei wird versucht diese Erkenntnisse nach Teilsystemen zu gliedern.

7.1 Brennstoffzelle

Hochtemperaturmembran: Die Kühlung im Fahrzeug erfordert grosse Anstrengungen, um auch bei warmen Aussentemperaturen die, gegenüber Verbrennungsmotoren grössere Wärmemenge, über das Kühlwasser abzuführen. Dies wird dadurch verschärft, dass die maximale Temperatur der BZ tiefer liegt. Nach Möglichkeit sollten somit die Membranen für höhere Temperaturen ausgelegt werden. Optimal wäre auch eine Membrane, die es erlaubt, auf eine Befeuchtung zu verzichten.

Fluiddynamik: Innerhalb des Stapels sind die fluiddynamischen Aspekte verhältnismässig gut zu beherrschen. Wir haben gelernt, dass gerade beim Einsatz von mehreren Stapeln und bei gepulstem Betrieb, die fluiddynamische Abstimmung der Verrohrung besser berücksichtigt werden sollte und allenfalls durch Simulationen unterstützt werden muss.

Bipolarplatten: Der Stapel ist von der Funktion her gesehen mit einer Kette zu vergleichen, wo es auch das schwächste Glied die Gesamtleistung bestimmt. Aus dieser Erkenntnis ist eine möglichst kleine Streuung der Komponenten anzustreben, um eine gleichbleibende Funktion zu erzielen. Mit gepressten Bipolarplatten können die Fertigungstoleranzen gegenüber gefrästen Platten deutlich eingeschränkt werden. So liegt die Stapelleistung bei gepressten Platten höher, obwohl die Einzelplatte gegenüber der mechanisch gefertigten im Nachteil ist, weil dafür besser geeignetes Graphit eingesetzt werden kann.

Betriebsverhalten: Wir haben erfahren, dass das Prinzip der elektrochemischen Umsetzung in den Einzelzellen an sich ein sehr gutmütiger Prozess ist. Zum einen haben die Einzelzellen eine Speicherfähigkeit an Flüssigkeit, so dass auch kurze Unterbrüche der Befeuchtung nicht tragische Auswirkungen haben. Auch springen die Stapel nach längeren Betriebspausen (bis 2 Monate) ohne Probleme wieder an. Auch einen kurzzeitigen Betrieb mit teilweise negativen Zellspannungen ist meist wieder reversibel. Nur im Falle der längeren Überschreitung der Auslegeparameter treten bleibende Schäden auf.

Strombegrenzung: Bei einem Betriebskonzept, wo die BZ leistungsgeführt betrieben wird, muss unbedingt eine Strombegrenzung integriert werden, da sonst die positive Rückkoppelung zwischen Spannung und Strom bei einer begrenzten Medienversorgung zu einer Maximalstrombelastung führen kann.

7.2 Supercaps

Relevante Betriebsbedingungen: Die Supercaps sind Speicherelemente, die in Abhängigkeit der Anwendung bei sehr unterschiedlichen Betriebsbedingungen betrieben werden. Für den Fahrzeugeinsatz mit dem Ziel der Lastregelung sind die heute gebräuchlichen Standardbedingungen ungeeignet, um die Tauglichkeit der Komponenten festzustellen. Für den Fahrzeugeinsatz müssen neue Kriterien erarbeitet werden und auf die SC angewendet werden.

Leistungsangaben: Bei Angaben der spezifischen Energie- und Leistungsdaten, und generell bei allen Leistungsmerkmalen sind zu Randbedingungen für deren Ermittlung zu berücksichtigen. Z.B. ist es üblich, die spezifischen Leistungen und Energien nicht in demselben Betriebspunkt zu ermitteln.

Kontaktierung: Bei allen Komponenten, die mit hohen Strömen belastet sind, ist die einwandfreie Kontaktierung eine entscheidende Grösse. Speziell trifft dies bei den SC zu, da hier eine Vielzahl von Kontakten zu verbinden sind. Dabei ist es wichtig, dass die Wahl auch eine gewisse Betriebsdauer berücksichtigt (nicht jeder Kontakt bleibt gleich gut –Korrosion.).

7.3 Systemaspekte

Pilotsysteme: Pilotsystemaufbauten sind ein gutes Mittel Entwicklungsrisiken zu reduzieren und ein frühzeitiges Lernen über das Systemverhalten zu ermöglichen. Sie sind ein sehr gutes Mittel Simulation und Experiment abzugleichen. Trotzdem ersetzen sie den Versuch im Massstab 1:1 nicht. Sie erlauben es aber, sich auf die Skalierungsprobleme zu konzentrieren, da das Systemverhalten früher schon untersucht werden konnte. Die Probleme gehen aber nicht aus!

CAN-Bus: Die Verwendung eines intelligenten Datenbusses ermöglicht eine effizientere Zusammenführung von Teilsystemen und eine Flexibilität in der Verkabelung. Diese Architektur ermöglicht auch eine intensive online Datenerfassung, die die Fehlersuche stark unterstützen kann.

Servicefreundlichkeit: Wenn das Thema Service bei einem Versuchsträger nicht so stark im Zentrum steht, wie bei einem Serienwagen, so ist die Zugänglichkeit der Komponenten und die Möglichkeit, Teilsysteme mit wenig Aufwand zu demontieren von Vorteil. Auch Versuchsteile (oder diese erst recht) müssen mehrmals ausgetauscht oder angepasst werden.

Wasserstoffspeicher: Bei der gasförmigen Speicherung von Wasserstoff ist darauf zu achten, dass auch dieses Gas bei Speicherdrücken oberhalb von 100 bar sich nicht mehr als ideales Gas verhält und als reales Gas behandelt werden muss. Dies ist v.a. im Hinblick auf die gespeicherte Energiemenge wichtig.

Modulbauart: Die Modulartige Bauweise von Teilkomponenten bietet v.a. im Prototypenbau viele Vorteile. So sind die Schnittstellen klar festzulegen, die Teilsysteme können einzeln getestet werden. Zudem können sie nach Bedarf als Teilsysteme ein- und ausgebaut werden. Der Nachteil besteht darin, dass diese Lösung zusätzliches Gewicht verursacht, da die Teilsysteme nicht die tragenden Strukturen des Gesamtfahrzeugs nutzen. Für diesen Stand der Technik ist dieser Nachteil aber auch durch Simulationen wett zu machen.

Test des Gesamtsystems: Die Abstimmung eines solch komplexen Systems auf dem dynamischen Prüfstand erleichtert die Inbetriebnahme im Fahrzeug gewaltig. Der allergrösste Teil der Funktionen können auf dem dynamischen Prüfstand bei guter Zugänglichkeit der Komponenten und somit auch minimalem Aufwand beim Austausch von Teilen getestet und

geprüft werden. Der Aufwand im Fahrzeug besteht dann vor allem in der Klärung von Interface-Fragen und der Abstimmung der fahrzeugspezifischen Dynamik und allenfalls Akustik.

7.4 Projektmanagement

Ein motiviertes Projektteam mit klarer Zielsetzung kann sehr effizient und kreativ arbeiten. Die Struktur sollte so einfach wie möglich sein und die Mitarbeiter unterstützen. Die Personen sind letztendlich entscheidend und setzen sich bis zum äussersten ein, wenn sie wissen was es zu holen gilt.

Nationale Zusammenarbeit

Als schweizerische Projektpartner waren das Paul Scherrer Institut, die ETH Zürich montana components SA engagiert. Weiter waren die EPF Lausanne, die FH Bern, Standort Biel in die Projektarbeiten involviert. Zudem entstanden eine Reihe von intensiven Kontakten zu Firmen in der Schweiz, die teilweise sehr unbürokratisch und grosszügig Komponenten kostenlos zur Verfügung stellten oder spezifische Anpassungen sehr günstig ausführten. Speziell möchte ich in diesem Zusammenhang die AMAG Schweiz AG und Batterie-Oerlikon AG nennen.

9 Internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde in einem Netz von Projektpartnern und engagierten Unterlieferanten durchgeführt. Als nicht schweizerische Hauptpartner arbeiteten die Volkswagen AG, Wolfsburg, FEV Motorentechnik GmbH, Aachen. Weiter bestand mit der Firma SGL ein intensiver Erfahrungsaustausch. Zu weiteren Firmen entstand ein intensiver Kontakt, um unkonventionelle Komponenten zu modifizieren.

Das ganze Projektergebnis in dieser Zeit und Qualität wurde nur möglich durch das ausserordentlich engagierte und kompetente Zupacken aller beteiligter Mitarbeiter bei allen Projektpartnern. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit finden sich in Fig. 66 die glücklichen Gesichter des Kernteams nach erreichen des Simplonpasses.



Figure 66: Kernteam des HY.POWER® Projektes nach erfolgreichem Erklimmen des Simplonpasses am 16. Januar 2002.

10 Literaturverzeichnis

10.1 Publikationen

A. Amstutz, R. Schelbert, O. Garcia, F. Büchi, P. Dietrich: **“Fuel cells for transportation – Hardware-in-the-loop simulation of a fuel cell powered car”**, European Automotive Congress EAEC, Vehicle Systems Technology for the Next Century, Barcelona, July 1999.

H. Stemmler, O. Garcia: **“A simple 6-way DC-DC converter for power flow control in an electric vehicle with fuel cells and supercapacitors”**, proceedings of the evs-16 conference, Peking, 13.-16.10. 1999.

M. Bärtschi, S. Müller, B. Schnyder, R. Kötz, V. Hermann, R. Gallay, A. Schneuwly: **Development of a 10 kW Supercapacitor Module for fuel cell car application**, PSI scientific report 2000, vol. V, Villigen, March 2001

M. Bärtsch, J.-C. Sauter, R. Kötz: **Testing of supercapacitors at PSI**, PSI scientific report 2000, vol. V, Villigen, March 2001

F.N. Büchi, M. Ruge: **Development of a bipolar element for PE-fuel cells demonstration in a 6 kW stack**, PSI scientific report 2000, vol. V, Villigen, March 2001

P. Dietrich, F. N. Büchi, M. Ruge, A. Tsukada, G. G. Scherer, R. Kötz, P. Rodatz, O. Garcia: **“Supercapacitors for a peak-powering application in combination with a fuel cell system”**, Proceedings Boostcap Conference by montena, Fribourg 29.3.01.

P. Dietrich, F. N. Büchi, M. Ruge, A. Tsukada, G. G. Scherer, R. Kötz, S. Müller, M. Bärtschi, P. Rodatz, O. Garcia: **„Fuel Cells for Transportation – a Pilot Fuel Cell Propulsion System“**, proceedings EAEC European automotive congress, Bratislava, 18th-20th June 2001

P. Dietrich, G. G. Scherer: **Das Potenzial der Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle unter Berücksichtigung verschiedener Treibstoffketten**, proceedings Tagung Motor & Umwelt, 6.-7.9.2001, Graz

R. Kötz, S. Müller, M. Bärtschi, B. Schnyder, P. Dietrich, F. N. Büchi, A. Tsukada, G. G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia, P. Barrade, V. Hermann, R. Gallay: **“Supercapacitors for peak power demand in fuel-cell driven cars”**, Advanced Batteries and Super Capacitors , G. Nazri, R. Koetz, B. Scrosati, P. A. Moro, E. S. Takeuchi, Edts., ECS Proceedings Volume PV 2001-21, The Electrochemical Society, Inc., Pennington, NJ (2002)

A. Schneuwly, M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Kötz: **BOOSTCAP® Double-Layer Capacitors, for Peak Power Automotive Applications**, Broschüre montena, Rossens 2002

A. Tsukada, P. Rodatz: **“Efficiency improvement by pulsed hydrogen supply in polymer electrolyte fuel cell systems”**, PSI scientific report 2001, vol. V, Villigen, March 2002

M. Bärtschi, S. Müller, R. Kötz, R. Gallay, A. Schneuwly: **50 kW Supercapacitor Module for the BRESA project**, PSI scientific report 2001, vol. V, Villigen, March 2002

F.N. Büchi, et. Al : **Development of a 40 kW Fuel cell system based on an array of 6 polymer electrolyte fuel cell stacks**, PSI scientific report 2001, vol. V, Villigen, March 2002

A. Wokaun, et. Al.: **“Energiespiegel – Facts für die Energiepolitik von Morgen“**, Ausgabe Nr. 6, Paul Scherrer Institut, Villigen, März 2002.

P. Dietrich: „**A Fuel Cell-Supercap Hybrid Concept for a Passenger Car**”, proceedings of the conference voiture et Cité de demain, 24.4.2002, EPFL, Lausanne.

P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella : **Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor powered hybrid vehicle**, submitted to IFAC Control Journal 2002

O. Garcia: „**Leistungselektronischer Energieverteiler für ein Brennstoffzellen-Auto mit Superkondensatoren**“, Vortrag an der TU Karlsruhe, 8.7.2002

F. N. Büchi, A. Tsukada, P. Rodatz, O. Garcia, M. Ruge, R. Kötz, M. Bärtschi, P. Dietrich: **Fuel Cell Supercap Hybrid Electric Power Train**, proceedings fuel cell 2002, 1-5. 7.02, Luzern

P. Dietrich, F. Büchi, A. Tsukada, M. Bärtschi, R. Kötz, G.G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia, M. Ruge, M. Wollenberg, P. Lück, A. Wiartalla, C. Schönfelder, A. Schneuwly, P. Barrade: **Hy.Power – A Technology Platform Combining a Fuel Cell System and a Supercapacitor Short Time Energy Storage Device**, proceedings SATG Konferenz, 13.9.02 Will, ISBN 3-906483-03-7.

P. Dietrich, F. Büchi, A. Tsukada, M. Bärtschi, R. Kötz, G.G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia, M. Ruge, M. Wollenberg, P. Lück, A. Wiartalla, C. Schönfelder, A. Schneuwly, P. Barrade: **First Results of the Hy.Power – A Hybrid Fuel Cell Powertrain with a Supercap Energy Storage Device**, proceedings VDI-Konferenz, 24.-25.10.02 Dresden.

10.2 Zeitungsartikel

G Scherrer, P. Dietrich: „**Die Brennstoffzelle - Die Alternative für die Zukunft?**“, NZZ Beilage zum Autosalon 2000, März 2000, Zürich

G.G. Scherer. T. Schmitt: „**PSI-Membran für Brennstoffzellen**“, Artikel in auromobil-revue 21./2002.

10.3 Semester- und Diplomarbeiten

L. Pellizzari, P. Rodatz : **Brennstoffzellenantriebssystem**, SA, Jan. 97, Betreuer: A. Amstutz, L. Guzzella.

L. Jakober: **Brennstoffzellenantrieb – Optimierung der Antriebskomponenten**, SA, Jan. 98, Betreuer: A. Amstutz

U. Saur: **Regelung des Modell-Brennstoffzellenantriebs**, SA Jan. 98, Betreuer: A. Amstutz

R. Schelbert: **Aufbau eines regelorientierten Vorwärtsmodells für den Modellantrieb eines Brennstoffzellenfahrzeugs**, DA, Juli 98, Betreuer: A. Amstutz.

D. Brand: **Parameterstudie am Brennstoffzellenfahrzeug**, SA, Juli 98, Betreuer A. Amstutz.

Andreas Dau: **Untersuchung von Verbundstrukturen für den Einsatz als Bipolarplatten in Brennstoffzellen**, DA Jan. 98, Betreuer: Martin Ruge.

Richard Lenz: **Entwicklung der Endplatten eines Brennstoffzellenstapels**, SA, Jul. 98, Betreuer: Martin Ruge.

Matteo Buzzi, Silvio Blaser: **Optimierung eines Hybridfahrzeugs**, SA, ETH Zürich, Jan. 99, Betreuer: Fritz Gassmann.

Anthony Pearson: **Entwicklung eines Luftbefeuchtungssystems für Brennstoffzellenstapel**, DA, Jan. 99, Betreuer: Martin Ruge

Matthias Günthart und Stefan Camenzind: **Entwicklung einer elastisch verformbaren Endplatte für Brennstoffzellen**, SA Jan. 99, Betreuer: Martin Ruge.

Manfred Caviezel, Patrick Heiz: **Einbauuntersuchungen eines BZ-Antriebes in einem Versuchsfahrzeug**, SA, Jan. 99, Betreuer: P. Dietrich.

R. Hug, W. Rohr: **Hardware-Aufbau eines speziellen DC-DC-Wandlers zur Ankopplung einer Brennstoffzelle an einen Supercap und an eine Last**, SA, Juli 99, Betreuer O. Garcia

L. Pellizari: **Brennstoffzellenantrieb**, DA, Juli 99, Betreuer A. Amstutz, P. Dietrich, L. Guzzella.

Roman Häfeli: **Vergleich verschiedener Energiespeicher in Zusammenarbeit mit einer Brennstoffzelle**, SA, Jan 2000, Betreuer: P. Dietrich, P. Rodatz

A. Boschi, M. Lorrain: **Simulation und Regelung einer DC/DC-Wandler Topologie zur Ankopplung einer Brennstoffzelle und eines Supercaps an einen Motorwechselrichter**, SA, Februar 2000, Betreuer O. Garcia

Jürg Isler: **Optimierung der Aufladung und Befeuchtung für eine Brennstoffzelle**, SA, April 2000, Betreuer: P. Rodatz, P. Dietrich

Sascha Grunder, Michael Rudis: **Optimierung der Steuerparameter eines Brennstoffzellenfahrzeuges**, SA, ETH Zürich, Okt. 2000, Betreuer: Fritz Gassmann.

Urs Flüeler: **Modellierung und Regelung der Nebenaggregate eines Brennstoffzellensystems**, DA, ETHZ, Jan 2001, Betreuer: Paul Rodatz, Chris Onder

Ch. Schaniel: **Untersuchung eines speziellen Filters für einen DC/DC-Wandler für Brennstoffzellen und Supercaps**, SA, März 01, Betreuer O. Garcia

R. Cagienard, P. Schlienger, **Messungen von Schaltverlusten an einer hart geschalteten IGBT-Halbbrücke mit induktiver Last, Professur für Leistungselektronik und Messtechnik**, ETHZ, Jan 2002, Betreuer O. Garcia

L. Ladu, J. Rauchenstein, **Simulation und Verlustberechnung eines 3-Punkt DC/DC-Wandlers und eines 2-fach versetzt getakteten DC/DC-Wandlers, Professur für Leistungselektronik und Messtechnik**, ETHZ, Jan 2002, Betreuer O. Garcia

Annina Blaas, Simon Schierscher: **Regelungstechnische Aspekte der Kühlung eines Brennstoffzellen-Systems**, SA, März 2002, Betreuer P. Rodatz