

Leitinnovation Mikrobrennstoffzelle



Neuartiger **M**ikroreformer für **M**ethanol in Verbindung mit einer gewichts-, preis- und volumenoptimierten **M**ikrobrennstoffzelle

**Abschlussbericht des Forschungs- Verbundprojekts
und Vortragsband zur Abschlussveranstaltung**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



November 2010

Verbundprojekt im Rahmenkonzept:

„Forschung für die Produktion von morgen“

des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)

Neuartiger Mikroreformer für Methanol in Verbindung mit einer gewichts-, preis- und volumenoptimierten Mikrobrennstoffzelle (MIMEMIZ)

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Förderkennzeichen:

02PG2407	Koordinator	AixCellSys GmbH
02PG2401		Schuler Hydroforming GmbH & Co. KG
02PG2402		Oel-Waerme-Institut GmbH, An-Institut der RWTH Aachen
02PG2403		BASF Fuel Cell GmbH
02PG2404		IMT TU Braunschweig - Institut für Mikrotechnik
02PG2406		Haseke GmbH & Co. KG
02PG2400	Insolvent	EVT Gesellschaft für Energieverfahrenstechnik mbH
02PG2405	Insolvent	Kom-tron Systemtechnik GmbH

Laufzeit:

01.01.2007 bis 30.09.2010

Redaktion:

Thomas Huck, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing., AixCellSys GmbH

Philipp Engelhardt, Dipl.-Ing., Oel-Waerme-Institut GmbH

Autorenliste in alphabetischer Reihenfolge

Roland Wruck, Dr. -Ing.	AixCellSys GmbH
Thomas Huck, Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing.	
Carsten Henschel, Dr.	BASF Fuel Cell GmbH
Frank Homann, Dipl. Ing.	Haseke GmbH & Co. KG
Stephanus Büttgenbach Prof. Dr. rer. nat.	IMT TU Braunschweig - Institut für Mikro- technik
Daniel Wichmann, Dr. -Ing.	Oel-Waerme-Institut GmbH
Philipp Engelhardt, Dipl.-Ing.	
Matthias Baszczok, Dipl.-Ing.	Schuler Hydroforming GmbH & Co. KG

Die Dokumentation stellt die Ergebnisse aus einem Forschungs- Verbundprojekt dar.
Verantwortlich für den Inhalt sind die jeweiligen Autoren.

Die AixCellSys GmbH übernimmt keine Gewähr, insbesondere für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit der Angaben, sowie die Beachtung privater Rechte.

Druck und Verbreitung:

AixCellSys GmbH
Technologiepark, Bauabschnitt II
Kaiserstr. 100
52134 Herzogenrath

Inhaltsverzeichnis:

1. Projektverlauf und Zusammenfassung.....	1
1.1. <i>Ausgangssituation und Problemstellung</i>	1
1.2. <i>Aufgabenstellung und Zielsetzung im Projekt.....</i>	2
1.3. <i>Struktur und Ablauf des Projektes.....</i>	3
1.3.1. <i>Arbeitspaket 1000: Auslegung Mikrobrennstoffzellensystem.....</i>	3
1.3.2. <i>Arbeitspaket 2000: Mikro Stack.....</i>	4
1.3.3. <i>Arbeitspaket 3000: Mikro Reformer.....</i>	9
1.3.4. <i>Arbeitspaket 4000: BOP Balance of Plant Komponenten.....</i>	11
1.3.5. <i>Arbeitspaket 5000: Integration Mikrobrennstoffzelle.....</i>	13
1.3.6. <i>Arbeitspaket 6000: Systemtests.....</i>	15
1.3.7. <i>Arbeitspaket 7000. Produzierbarkeit.....</i>	16
1.4. <i>Ergebnisse und Anwendungspotentiale.....</i>	18
2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle	20
2.1. <i>Aufgabenstellung und Ziele.....</i>	20
2.2. <i>Wissenschaftlicher und technischer Stand des Vorhabens.....</i>	20
2.3. <i>Erzielte Ergebnisse.....</i>	21
2.3.1. <i>MEA Entwicklung.....</i>	21
2.3.2. <i>Bipolarplattendesign und Stackentwicklung.....</i>	25
2.3.3. <i>Dauerversuche.....</i>	30
2.4. <i>Zusammenfassung.....</i>	40
3. Entwicklung und Test eines Mikroreformers	41
3.1. <i>Aufgabenstellung und Ziele.....</i>	41
3.2. <i>Wissenschaftlicher und technischer Stand des Vorhabens.....</i>	41
3.3. <i>Erzieltes Ergebnis.....</i>	42
3.3.1. <i>Entwicklung der Reformerbleche.....</i>	42
3.3.2. <i>Dauerversuche.....</i>	48
3.4. <i>Zusammenfassung.....</i>	52
4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems	53
4.1. <i>Aufgabenstellung und Ziele.....</i>	53
4.2. <i>Stand der Technik.....</i>	53
4.3. <i>Erzielte Ergebnisse.....</i>	55
4.3.1. <i>Auslegung des Gesamtsystems.....</i>	55
4.3.2. <i>Steuerungsentwicklung.....</i>	62
4.3.3. <i>Balance of Plant Komponenten.....</i>	65

4.3.4.	Fertigungskonzept und Aufbau eines Gesamtsystems.....	76
4.4.	<i>Zusammenfassung</i>	79
5.	Projektbezogene Veröffentlichungen, Vorträge und Referate	81
6.	Literatur	83

1. Projektverlauf und Zusammenfassung

1.1. Ausgangssituation und Problemstellung

Im Verbundprojekt MIMEMIZ wurde ein hoch integriertes Mikrobrennstoffzellensystem entwickelt. Ziel war es, die hohe Leistungsdichte der Wasserstoff PEM Brennstoffzelle mit den Vorteilen der Versorgungsinfrastruktur des flüssigen Energieträgers Methanol zu verknüpfen. Durch den Einsatz von extrem kleinen Strukturen wurde ein frei skalierbarer Lösungsansatz entwickelt der durch seine modulare Anordnung eine einfache Adaption sowohl zu höheren als auch geringeren Leistungsanforderungen ermöglicht.

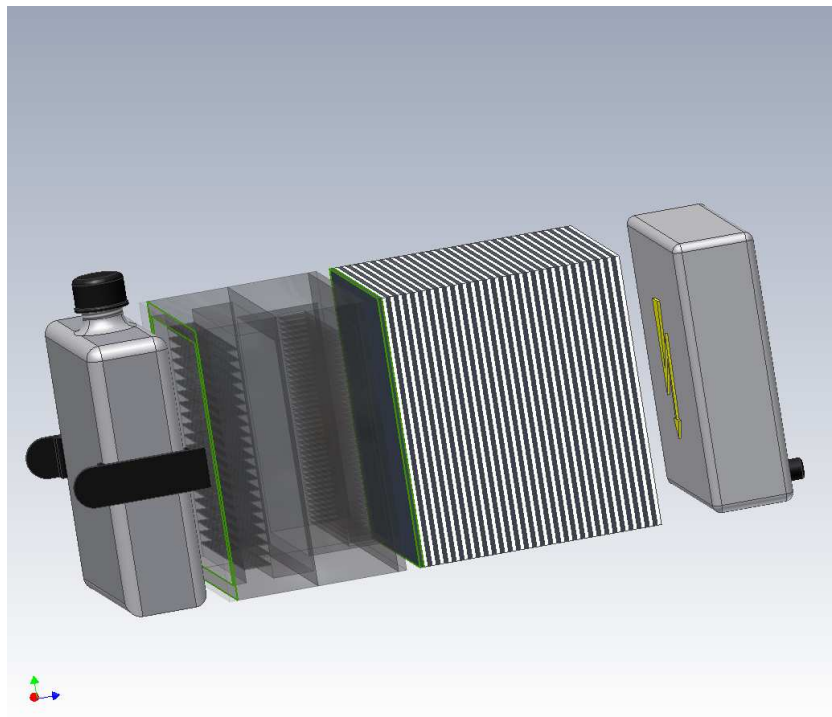


Abbildung 1-1 Funktionsmuster Mikrobrennstoffzellensystem

Der Name Mikro bezieht sich bei Brennstoffzellenprodukten auf die Leistung und nicht auf die Baugröße. Aus diesem Grund sind die auf dem Markt erhältlichen Systeme daher entweder sehr groß und unhandlich oder extrem teuer. Hier lag der Ansatzpunkt der Neuentwicklung. Um einen Innovationssprung in Richtung Größe und Kosten durchfüh-

ren zu können, musste auf eine Miniaturisierung und neue Fertigungsverfahren zurückgegriffen, beziehungsweise bestehende Fertigungsverfahren grundlegend überarbeitet werden. Dazu waren kostenoptimierte Verfahren zur Herstellung von Hochtemperatur-Membran-Elektroden-Einheiten und von Bipolarplatten, beispielsweise mittels der innovativen Technologie des Hochdruck-Hydroforming, zu entwickeln. Zur Wasserstoffherzeugung für die Brennstoffzelle war ein Mikromethanolreformer in den Stack zu integrieren.

Grundlage für die Miniaturisierung der Systemperipherie, den so genannten Balance of Plant Komponenten, stellen Ätztechniken aus den Herstellungsverfahren der Halbleitertechnik dar. Somit können Mikroreaktoren, Ventile und Pumpen in den gewünscht geringen Abmaßen gefertigt werden.

Für den sicheren Betrieb des Mikrobrennstoffzellengesamtsystems und zur Einsparung von Systemkomponenten war ein innovatives Steuerungskonzept und spezielle Regelungsstrategien beim An- und Abfahren zu entwickeln.

Im Gegensatz zu den bisher bekannten Entwicklungen wurde im Rahmen des Projektes Mimemiz eine vollständige Integration von BoP (Balance of Plant Komponenten), Reformer und Brennstoffzelle angestrebt.

1.2. Aufgabenstellung und Zielsetzung im Projekt

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines als Hybridsystem ausgelegten Mikrobrennstoffzellengesamtsystems, d.h. es handelt sich um eine Kombination aus Brennstoffzelle und Batterie. Dabei lädt die Brennstoffzelle die Batterie über die der Strom bereitgestellt wird.

Es wurden die folgenden Leistungsdaten angestrebt: ein Zielpreis von 400 € für das Gesamtsystem und eine Leistungsdichte für die Brennstoffzelle von 200 Watt pro kg. Die im System eingesetzte Brennstoffzelle soll dabei eine Leistung von 100 Watt, bei einem Gewicht von 0,5 kg, liefern. Die erforderliche Batterie soll maximal 0,5kg wiegen. Die volumetrischen Abmaße des Brennstoffzellensystems sollen 1 Liter nicht übersteigen und es wird eine hohe Energiedichte angestrebt (1000 Wh/l).

Im Rahmen des Projektes war der Aufbau und Betrieb eines Demonstrators vorgesehen mit dem eine Lebensdauer von 2000h angestrebt wurde. Als reelle Produktapplikation sollte die Verwendung des entwickelten Mikrobrennstoffzellengesamtsystems als Antrieb in einem Golf-Caddy aufgezeigt werden.

1.3. Struktur und Ablauf des Projektes

Für das Projekt MIMEMIZ war eine Projektlaufzeit von drei Jahren vorgesehen die sich in verschiedene Projekt- bzw. Optimierungsphasen aufteilte, aus denen sich sieben Arbeitspakete mit den entsprechenden Unterarbeitspaketen ergaben. Diese sind im Nachfolgend dargestellt.

1.3.1. Arbeitspaket 1000: Auslegung Mikrobrennstoffzellensystem

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Simulationen und Auslegung des Mikrobrennstoffzellengesamtsystems (OWI, EVT, IMT, BASF, Schuler, Kom-Tron, Haseke)

Arbeitsinhalte:

Im Arbeitspaket Auslegung Mikrobrennstoffzellensystem sollte die Optimierung der Mikrobrennstoffzelle hinsichtlich Größe, Leistungsklasse, Wärmehaushalt und sonstiger Funktionen erarbeitet werden, wozu auch die Endplatten und die Dichtungs- und Anschlussstechnik gehört. Weiter sollte die Anordnung des Gesamtsystems und damit die Integration der einzelnen Komponenten festgelegt werden.

Arbeitsschritte:

AP 1100: Spezifikation Lastenheft

In diesem Arbeitspaket war ein Lastprofil des bestehenden elektrischen Golfcaddys aufzunehmen. Auf Basis mehrerer Lastprofile sollte ein Lastenheft erarbeitet werden, dass die Systemspezifikation darstellt und z.B. für eine komplette 18-Loch Runde einen ausreichenden Energiebedarf mit entsprechenden Sicherheitszuschlägen bereitstellen kann.

AP 1200: Thermodynamische und elektrische Bilanzierung

Im Rahmen des Arbeitspaketes war eine thermodynamische Betrachtung des Mikrobrennstoffzellensystems durchzuführen. Dafür war mittels Matlab-Simulink eine stationäre Gesamtsystemsimulation aufzustellen und Potentiale zur Wärmerückgewinnung sowie Möglichkeiten der Wärmeabfuhr auszumachen. Mittels einer elektrischen Bilanzierung sollte eine optimale Verschaltung der Komponenten erreicht werden.

AP 1300: Erstellung Pflichtenheft

Nach Vorliegen des Lastenheftes war mit Hilfe der thermodynamischen und elektrischen Bilanzierung das Pflichtenheft zu erarbeiten. Hierfür waren die Anforderungen aus dem Lastenheft gegenüber den machbaren und der unter Kosten- und Größensichtspunkten realisierbaren Lösungsmöglichkeiten abzugleichen und gemeinsam mit den Projektpartnern die Systemanforderungen zusammenzufassen und festzulegen.

Notwendige Ausgangsdaten:

Als Ausgangsdaten waren die Lastprofile verschiedene Golfkurse heranzuziehen um den Energiebedarf für die Mikrobrennstoffzelle abschätzen zu können.

Ergebnis:

Als Ergebnis des Arbeitspaketes sollte ein gemeinsam verabschiedetes Pflichtenheft für die Einzelkomponenten und das Gesamtsystem vorliegen. Dieses sollte als Datenquelle für alle folgenden Arbeitspakete dienen.

1.3.2. Arbeitspaket 2000: Mikro Stack

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Konzept, Konstruktion und Aufbau eines Mikrobrennstoffzellenstacks
(Schuler, EVT, BASF, OWI, Kom-Tron)

Arbeitsinhalte:

Für die Entwicklung der Mikrobrennstoffzelle waren zunächst die Schnittstellen und Dimensionen zu klären. Besonderes Augenmerk musste bei den Bipolarplatten auf das Flowfelddesign, die Umformbarkeit des Blechmaterials, die zusätzlichen Funktionen der Kühlung sowie die zugehörige Fertigungstechnologie bei erhöhten Umformdrücken gelegt werden. Die Entwicklung der Dichtung erfolgte in Bezug auf die Kosten und die Funktion und die Materialbeständigkeit. Dabei waren die in der Anwendung herrschenden Temperaturen zu berücksichtigen. Folgende Arbeitsschritte waren dazu erforderlich:

- Auslegung der Spritzgießwerkzeuge
- Auswahl und Weiterentwicklung geeigneter Dichtungsmaterialien auf der Basis von Silikoneleastomeren.

Ein Bestandteil des AP 2000 war die Erforschung und Entwicklung einer neuen, platinreduzierten MEA, die für die Anwendung optimiert ist. Für die Entwicklung der neuen MEA sind von BASF 20 Monate Entwicklungszeit veranschlagt worden. Allerdings wurden schon für die ersten beiden Entwicklungszyklen eine ausreichende Anzahl von

MEAs mit hoher Platinbeladung bereitgestellt, so dass die Brennstoffzellenstack und –systementwicklung insbesondere in Richtung Korrosionsoptimierung der Bipolarplatten durch die Partner aufgenommen werden konnten. Insgesamt waren für die Entwicklung des Mikro Stacks drei Iterationsstufen eingeplant worden.

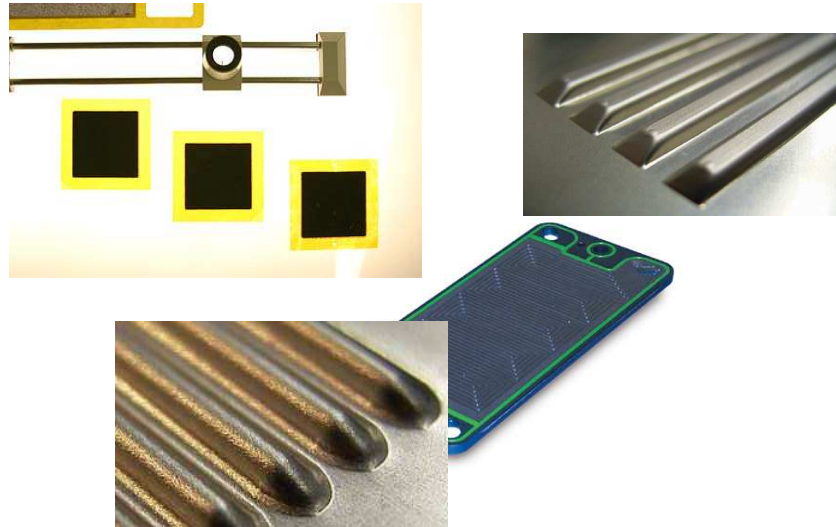


Abbildung 1-2 Komponenten Mikro Stack

Arbeitsschritte:

AP 2100: Stackauslegung

Es sollte eine Stackstruktur ausgelegt werden, welche mit dem Reformer, dem Brenner und allen sonstigen Komponenten zusammengefügt werden kann. Die Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten waren hier klar festzulegen und ein Kühlkonzept zu integrieren. Die mitwirkenden Partner sollten Schuler bei der Auslegung des Systems sowie der Festlegung der Schnittstellen für die Zusammenführung zu einem Gesamtsystem unterstützen.

AP 2200: MEA -Entwicklung

Im Rahmen des Arbeitspaketes Mikrobrennstoffzellenstack sollte BASF eine kostengünstige und leistungsstarke Hochtemperatur-MEA entwickeln, welche die Charakteristika des Stacks bestimmt und die Anforderungen an den Reformer und die Leistungselektronik definiert. BASF sollte sowohl eine neue MEA entwickeln sowie Forschungsergebnisse aus laufenden Arbeiten und geplanten Projekten einbringen als auch die Projektpartner bei der Konzeption des Hochtemperatur-PEM Stacks und –Systems unterstützen. Weiter sollte die Bereitstellung von zuverlässigen MEAs für den Mikro-Stack

sichergestellt werden. BASF sollte für die drei Generationen des Stacks die jeweils besten MEAs zur Verfügung stellen. In Abstimmung mit den Partnern EVT und Schuler wurden geeignete MEA-Designs konzipiert, die den Anforderungen des Lastenheftes und des vorläufigen Stack-Designs entsprachen. Mit diesem Design sollte die erste Generation des HT-PEM-Brennstoffzellensystems gebaut werden.

In Zusammenarbeit mit Schuler und EVT wurden für das innovative Stackdesign mit integriertem Reformer und neuartigen Bipolarplatten entsprechend optimierte MEA-Designs konzipiert.

Sowohl die Standard-Elektrode mit hoher Katalysatorbeladung als auch verschiedene, neu zu entwickelnde Elektroden mit reduzierter Platinbeladung wurden von BASF geliefert und in Tests evaluiert. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden in weiteren Iterationen die Elektroden optimiert und in der MEA getestet. Das Ziel sollte eine Reduktion der Pt-Beladung der MEA um etwa 40% bei gleich bleibender Leistung sein. Nachdem die neue, platinreduzierte Elektrode in Einzelversuchen erfolgreich getestet wurde, sollte eine Parameterstudie angeschlossen werden. Verschiedene Parameter, die erfahrungsgemäß kritisch oder schwer konstant zu halten sind, waren zu variieren und ihr Einfluss auf die Leistung zu bestimmen. Bei erfolgreichem Einsatz sollte die neue Elektrode anschließend aus der Forschung in die Produktion gegeben und die Versuche zur Herstellung auf der Maschine durchgeführt werden.

Die Anforderungen von Haseke und von den Stackpartnern an die Betriebsbedingungen, der Reformatgaszusammensetzung und den Zyklen sollten auf einem Prüfstand berücksichtigt und nachgebildet werden.

Die Funktionalität einer MEA mit reduzierter Platinbeladung auf der Anode von etwa 40% sollte in erfolgreichen Einzelzellentests nachgewiesen werden und dem Stack in der dritten Generation zuverlässig zur Verfügung stehen.

Entsprechend dem vereinbarten MEA-Design wurden Toolings hergestellt, mit denen im MEA-Handlabor die notwendige Anzahl von MEAs für Einzelzellentests, Short-Stacks und Stacks produziert werden können.

In diesem Arbeitspaket sollte der MEA-Assembling-Prozess auf die neuen Elektroden angepasst werden, um ein optimales Interface herzustellen. Das geschah zum Teil simultan zur Elektrodenentwicklung und in deren Anschluss.

In einem weiteren Arbeitsschritt sollte geprüft werden, wie die neuen Materialien in der Produktionsanlage eingesetzt werden können und ggf. Modifikationen durchgeführt werden.

BASF hatte beratende Funktion in der Entwicklung und Anpassung der Bipolarplatten. In Zusammenarbeit mit den Partnern sollten die Dimensionen der MEAs, Löcher für Gaszuführung, Einsatz von hard-stops und einzustellende Kompression der MEA festgelegt werden. Auch die Dicken- und Formtoleranzen der verschiedenen Komponenten

sollten aufeinander abgestimmt werden, ebenso wie das Konzept zur Behebung von Fehlern während des Stack-Assembling (z.B. Austauschbarkeit einzelner MEAs / Dichtungen / Zellen).

Auch bei den ersten Tests der Bipolarplatten stand BASF beratend zur Seite. Zusammen mit den Partnern sollten die Testbedingungen für BPP-Materialien definiert werden, die die korrosiven Bedingungen in der Hochtemperatur-Brennstoffzelle simulieren. BASF sollte die neuen MEAs und Designs produzieren und nach zuvor definierten Bedingungen in-situ und ex-situ testen. Die MEA-Designs wurden im Anschluss den Partnern für weitere Praxistests überlassen werden.

Das von den Partnern selektierte MEA-Design sollte mit den neuen Elektroden und der angepassten Membran kombiniert und in die MEA-Produktion überführt werden, damit in der dritten Stack-Generation eine MEA genutzt werden konnte, welche die Ziele der Kostenoptimierung und Stabilität unter den Systembedingungen erfüllt.

AP 2300: Entwicklung Bipolarplatte

Die Auslegung sowie die Konzeption des Brennstoffzellensystems aus den AP 1000, AP 2100 und 2200 waren die wesentlichen Voraussetzungen für die Entwicklung der metallischen Bipolarplatte. Die Fertigung sollte mit der wirkmedienbasierten hydrostatischen Streckumformung (Hydroforming) erfolgen. Dieses Verfahren erlaubt das Einbringen von feinsten, maßhaltigen Kanälen, ohne dass es zu einem Nachfließen und damit zu einem Verzug des Bleches kommt. Die Fertigungstechnik musste für die Herstellung dieser Zellbleche auf die hohen Drücke von ca. 3000 bar angepasst werden. Die vorhandenen Hydroformpressen mussten dazu mittels Aufnahmen, Adapter und spezieller hochdrucktauglicher Komponenten aus Leitungen und Handpumpen angepasst werden. Die so entstandene, auf miniaturisierte Zellblechfertigung angepasste Hydroformpresse ermöglichte damit die weitere Entwicklung und spätere Handstraßenfertigung der benötigten, metallischen Bipolarplatten.

In den parallel ausgeführten Arbeitsschritten im AP 2300 sollten die Anforderungen an die neue Struktur der metallischen Bipolarplatte aus einer Folie durchgeführt werden. Dabei wurde zunächst das Flowfield derart entwickelt, dass es entsprechend dem neuen Ansatz aus nur noch einer umgeformten Folie erstellt werden kann. Dazu waren die Kanalbreiten und Tiefen, die aktive Fläche, sowie die Dimensionierung der Einlauf und Versorgungsbohrungen aus den vorhergehenden AP zu berücksichtigen. Gleichzeitig musste aber auch das nötige Design-Konzept für eine aktive Kühlung beachtet werden. Die sich daraus ergebende Flowfieldstruktur wurde im Anschluss in ihre wesentlichen Detailpunkte zerlegt, die in der Folge nun, separat untersucht und optimiert werden konnten. Dies erfolgte zum Teil mit Hilfe von Berechnungen aber auch durch direkte Versuche. Ein ganz wesentlicher Einfluss auf die Ausgestaltung kam dabei aus dem zu

verwendenden Material, welches ebenfalls in Vorversuchen auf seine Eignung in Bezug auf Korrosions- und Kontaktwiderstände untersucht wurde. Nachdem alle Detailpunkte der konstruktiven Flowfield-Ausbildung an das Materialverhalten in Bezug auf Umformbarkeit, benötigten Druck, erreichte Kanaltiefe und Kanalgeometrie gelöst wurden, konnte das Gesamtwerkzeug auf Basis dieser Vorergebnisse konstruiert und gefertigt werden. Gemeinsam mit den nötigen Aufnahmen und Adaptern war die Fertigung an dieser Stelle problemlos durchzuführen. Für den Fall das sich Änderungen, z.B. aus strömungstechnischer Sicht, ergeben haben, konnte der konstruktive Aufwand mit Hilfe dieses Baukastensystems auf ein Minimum reduziert werden. Nur noch die von dieser Korrekturmaßnahme beeinflussten Elemente mussten verändert und im Detail untersucht werden. Aufnahmen/Adapter sowie der Rest des Flowfields konnten direkt übernommen werden. Teilweise konnten die Werkzeuge der Voruntersuchungen aus gut und einfach zu bearbeitenden Messinglegierungen erstellt werden. Eine besondere Standzeit war für diese Werkzeuge nicht gefordert, was den Kostenaufwand dieser Vorgehensweise gering halten sollte.

Es war geplant die ersten fertig gestellten Zellbleche der ersten Iterationsstufe an das folgende Arbeitspaket 2400 zur Integration der Dichtung zu übergeben, die ein wesentliches Element in der Funktionsweise dieser Zelle darstellte. Das metallische Zellblech war alleinig nicht in der Lage alle Funktionen der Bipolarplatte zu übernehmen. Ein Teil dieser Aufgaben, wie die Randdichtung, der Höhenausgleich, die vollständige Ausbildung der Randkanäle sowie die Einströmung und Abdichtung im Einlaufbereich mussten daher von einer adaptiven Dichtung übernommen werden. Deren Lage und konstruktive Ausbildung war an dieser Stelle bereits weitestgehend festgelegt und wurde an den nachfolgenden Entwicklungsschritt weitergereicht.

AP 2400: Entwicklung Dichtungskonzept

Zur Auslegung der Dichtung und Überprüfung des Dichtungsdesign sollten in diesem Arbeitspaket Simulationen eingesetzt werden. Nach Auswahl der Dichtungsmaterialien sollten Verträglichkeitsversuche mit den verschiedenen Dichtungswerkstoffen durchgeführt werden. In jedem Entwicklungsschritt wurden Definitionen von Entwicklungszielen für die Weiterentwicklung der Dichtungswerkstoffe in Bezug auf die neuen Anforderungen (Temperatur und Medienbeständigkeit) festgelegt. Ziel war es eine geeignete Werkstoffauswahl zu treffen.

Zur Fertigung und späteren Produzierbarkeit musste das Spritzgießwerkzeug für die Dichtung, insbesondere unter der Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse sowie der speziellen Geometrie einer metallischen Bipolarplatte für die Aufbringung der Dichtung, besonders genau ausgelegt werden.

Gemeinsam mit Schuler arbeitete SKF an der Fertigung von Bipolarplattenprototypen mit einem geeigneten Dichtungskonzept. Für einen ausreichenden Elastomer- Metallverbund war eine Vorbehandlung der metallischen Bipolarplatte nötig.

Notwendige Ausgangsdaten:

Zur Bearbeitung dieses Arbeitspaketes waren die Ergebnisse aus AP 1000 und AP 4200 notwendig. Insbesondere waren die Ergebnisse aus AP 2100 und 2200 wichtig. Die Verschaltung des Gesamtsystems und das Kühlkonzept waren für die Stackauslegung grundlegend.

Ergebnis:

Es sollte ein Mikrobrennstoffzellenstack mit modularem Aufbau erarbeitet werden, welcher problemlos mit den restlichen Komponenten verschaltet werden kann und in Hinsicht auf die gesteckten Ziele des Pflichtenheftes optimiert war.

1.3.3. Arbeitspaket 3000: Mikro Reformer

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Konzept, Konstruktion und Aufbau eines Mikroreformers
(OWI, Schuler, IMT)

Arbeitsinhalte:

Im Rahmen der Entwicklung des Mikroreformers musste ein katalytisch beschichteter Wärmetauscher und Reaktor entwickelt und hergestellt werden. Dies sollte zweckmäßig ebenfalls mit den neuen Methoden des Hochdruck-Hydroformings geschehen, wodurch verbesserte Qualitäten in Bezug auf den Wirkungsgrad gerade bei kleinsten Bauteilen erwartet wurden. Außerdem sollte ein katalytischer Brenner, ein Startup Brenner sowie eine Verdampfeinheit entwickelt werden, die so zu gestalten waren, dass eine Integration mit dem Reformer im Gesamtsystem möglich wurde. Für dieses Arbeitspaket waren ebenfalls drei Iterationsstufen vorgesehen.



Abbildung 1-3 Funktionsmuster Mikroreformer

Arbeitsschritte:

AP 3100: Reformer- / Verdampfereinheit, Katalysatorauswahl, Integration im Stack und Wärmemanagement

Es war eine Reformereinheit in Form eines beschichteten Mikro Wärmetauschers mittels des Verfahrens des Hochdruck-Hydroforming zu entwickeln. In einer gemeinsamen Tätigkeit zwischen OWI und Schuler sollte das Konzept sowie dessen Umsetzung entwickelt werden, das auf dem gleichen Design-Konzept der Kanalstrukturen aus nur einem umgeformten Blech aufbaut. Damit sollte die Reformereinheit direkt in den Stack integriert werden. Hierzu waren aber umfangreiche Berechnungen und Simulationen durchzuführen. Als Rückfallszenario, war es aber möglich den Reformer auch als eigenständige Lösung zu betreiben.

Dabei sollte in Zusammenarbeit mit Katalysatorherstellern der optimale Katalysator identifiziert werden. In der Reformereinheit sollte gleichzeitig ein Verdampfer mitentwickelt werden. Beide Einheiten sollten ein Bauteil ergeben und waren über ein optimales Wärmemanagement im Brennstoffzellenstack zu integrieren.

AP 3200: Katalytischer Brenner, Integration im Stack und Wärmemanagement

Zum Starten des Brennstoffzellensystems, zum Aufrechterhalten der Reformierungsreaktion sowie der Verdampfung des benötigten Wasser- Methanolgemisches sollte in diesem Arbeitspaket ein katalytischer Brenner ausgelegt werden, welcher in den Stack zu integrieren war. Ein Wärmemanagement war auszuarbeiten.

AP 3300: Betriebsstrategieentwicklung, An- Abfahrprozedur, dynamische Simulation, stationäre Bedingungen, Entscheidung Shiftstufe ja / nein

Für den Betrieb der Demonstratoren waren Betriebsstrategien zu erarbeiten. Stationäre Simulationen sollten zeigen ob eine zusätzliche CO-Reinigung über eine Shiftstufe notwendig würde oder ein anspruchsvolles Thermomanagement realisiert werden muss.

Zusätzlich waren dynamische Simulationen des Gesamtsystems geplant, um An- und Abfahrverhalten des Systems zu bestimmen.

AP 3400: Umsetzung und Fertigung eines Reformers

Schüler sollte die benötigten Reformerbleche mittels Hydroforming herstellen. Die Vorgehensweise wurde analog zur Entwicklung des Flowfields für die Bipolarplatte durchgeführt (s.o.).

Notwendige Ausgangsdaten:

Zur Durchführung des Arbeitspaketes waren Informationen aus AP 1000 sowie AP 2000 notwendig. Insbesondere waren Daten zu den Schnittstellen mit dem Mikro Brennstoffzellenstack wichtig.

Ergebnis:

Ziel in diesem Arbeitspaket sollte es sein eine kompakte Mikro Reformer Einheit, eine Verdampfereinheit und einen katalytischen Brenner zu entwickeln, welche der geometrischen Form des Brennstoffzellenstacks entsprechen und sich problemlos mit dem Stack zu einem Bauteil integriert lassen. Auch sollten die Ziele aus dem Pflichtenheft erfüllt werden.

1.3.4. Arbeitspaket 4000: BOP Balance of Plant Komponenten

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Entwicklung, Integration von Balance of Plant Komponenten (Mikroventile, Mikropumpen, Mikrowärmetauscher(Stackkühlung) und Steuerungskonzeption)
(IMT, Kom-Tron EVT, Schuler,)

Arbeitsinhalte:

In diesem Arbeitspaket sollte die elektrische Schaltung, Regelung und die Mikro System Peripherie entwickelt werden. Dazu kamen die Entwicklung der elektrischen Energieversorgung und der Umwandlungsprozesse, sowie die Umsetzung des Hybridkonzepts und die Integration von DC-DC Wandlern mit hohem Wirkungsgrad. Während der Entwicklung waren vor allem der niedrige Energieverbrauch des Gesamtsystems und die kompakte Bauweise sowohl der Einzelkomponenten als auch des Gesamtsystems zu berücksichtigen. Der Methanoltank sollte lageunabhängig ausgelegt werden, d.h., dass über den erzeugten Unterdruck der Methanolförderpumpe ein Stempel im Tank das Volumen zur Ansaugstelle hin reduziert.

Arbeitsschritte:

AP 4100: Auswahl hochwertiger Mikropumpen und -ventile, Integration in die Mikro System Peripherie, Schnittstellenmanagement

Anhand der im Pflichtenheft festgelegten Daten sollten im Rahmen dieses Arbeitspaketes die benötigten Mikropumpen und -ventile ausgelegt werden. Es waren dazu geeignete auf dem Markt erhältliche Mikropumpen und -ventile auszuwählen. Diese sollten verschiedenen Tests unterzogen werden, um deren Eignung zu überprüfen. Auf Grundlage der ausgewählten Mikropumpen und -ventile sollte der Entwurf und die Entwicklung des mikrofluidischen Systems statt finden. Basis der Mikro System Peripherie sollte eine Grundplatte sein, die eine kompakte und modulare Integration in das Gesamtsystem ermöglicht. Die Grundplatte muss alle nötigen Schnittstellen zum Anschluss der weiteren Komponenten wie z.B. Mikro Reformer und Mikro Stack zur Verfügung stellen. Anschließend sollte eine Umsetzung der Entwicklung in eine prototypische Fertigung statt finden.

AP 4200: Entwicklung eines möglichst konvektiven Kühlkonzepts

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollten mögliche Kühlkonzepte hinsichtlich ihrer Eignung und Realisierbarkeit untersucht werden. Dazu sollten verschiedene Positionierungsmöglichkeiten des Kühlsystems im Bereich des Mikro Stacks überprüft und geeignete Varianten festgelegt werden. Auf dieser Grundlage mussten Wärmetauscher entwickelt werden, die eine einfache Integration in das Gesamtsystem ermöglichten. Dabei war ein wesentlicher Aspekt eine modulare Bauweise, um eine maximale Flexibilität zu gewährleisten. Die Wärmetauscher sollten im institutseigenen Reinraum im Rahmen einer Prototypenfertigung hergestellt und den Projektpartnern zu Testzwecken zur Verfügung gestellt werden. In anschließenden Tests musste das Konzept überprüft und ggf. in iterativen Arbeitsschritten unter Berücksichtigung der Erkenntnisse optimiert werden.

AP 4300: Entwicklung Steuerung

In diesem Arbeitspaket sollte die Steuerung entwickelt werden. Für die Auslegung der Steuerung sollte das System aus Rücksicht auf die Kosten so minimal wie möglich ausgelegt werden, auch um die Anforderungen an die Komponenten klein zu halten.

Um einen Wirkungsgrad des Gesamtsystems von über 25 % bezogen auf den Heizwert von Methanol zu erreichen, musste insbesondere der Eigenenergieverbrauch der Steuerungsbauteile klein gehalten werden. Dafür waren im Platinenlayout Vereinfachungen sowie regelungstechnische Optimierungen durchzuführen.

AP 4400: Hybridisierung, Batterieauswahl

Für die Hybridisierung und die Batterieauswahl war zunächst ein Hybridkonzept auszuarbeiten welches sowohl den Leistungsbedarf für Spitzenleistungen als auch die Aufladezeiten im Stillstand berücksichtigte. Hierfür war insbesondere eine geeignete Batterie auszuwählen, die die Anforderung hinsichtlich schnellen Aufladens sowie schneller und hoher Leistungsbereitstellung erfüllte. Anschließend war das Hybridisierungskonzept auf eine Hardware umzusetzen und in die Gesamtsteuerung zu integrieren.

Notwendige Ausgangsdaten:

Zur Realisierung des Arbeitspaketes waren die Ergebnisse oder Teilergebnisse aus den APs 1000, 2000 und 3000 notwendig. Festgelegte Anschlussschnittstellen aus dem Pflichtenheft mussten eingehalten werden. Abmaße des Stacks und des Reformers zur Anpassung der Grundplatte und der Kühlkörper mussten festgelegt werden. Weiter waren die Leistungsdaten des Mikro Stacks und Mikro Reformers zur Auslegung des Kühlkonzepts erforderlich. Die Menge und Zusammensetzung der Medien waren vorher festzulegen.

Ergebnis:

Es sollte eine auf einer Grundplatte integrierte Mikro System Peripherie mit den benötigten Anschlüssen sowie ein in dem Stack zu befestigender oder im Stack zu integrierender Wärmetauscher und eine Funktionsbeschreibung und Charakterisierung der Komponenten enthalten sein.

1.3.5. Arbeitspaket 5000: Integration Mikrobrennstoffzelle

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Integration der einzelnen Komponenten in ein Gesamtsystem.
(EVT, Schuler, OWI, IMT, BASF, Kom-Tron, SKF, Haseke)

Arbeitsinhalte:

Die Integration des Brennstoffzellensystems bedurfte des Zusammenbaus der einzelnen Komponenten zu einem funktionierenden Gesamtsystem. Hierfür war maßgebend, dass die in den Arbeitspaketen definierten Schnittstellen eingehalten wurden. Beim Zusammenfügen der einzelnen Komponenten sollte auf ein Bördelverfahren zurückgegriffen werden, wodurch insbesondere eine gleichmäßige Druckverteilung zwischen den Komponenten zu gewährleistet war und der aufwendige Zusammenbau der Komponenten u.a. die Verschraubungen entfallen sollten.

Die Einzeltests der Komponenten sollten in diesem Arbeitspaket durchgeführt werden. Zu diesem Zweck musste am OWI ein Refomer und Abgasbrennerprüfstand und ein Mikrobrennstoffzellenprüfstand erstellt werden.

Diese Prüfstände mussten neu erstellt werden, da bisherige Prüfstände am OWI für wesentliche größere Systeme ausgelegt waren.

Bei den Komponententests mussten Ergebnisse zu den einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel ermittelt werden, um diese weiter optimieren zu können.

Es erfolgte der Aufbau von 3 Gesamtsystemen mit jeweils einem Revisionsschritt. Insgesamt waren damit drei Evolutionsstufen geplant. Eine Revision von AP 1000 sollte durchgeführt werden, um zu kontrollieren ob gravierende Fehler gemacht wurden. Erst in der dritten Revision sollten Tank und Außenbox integriert werden. Insgesamt sollten von der dritten Version zwischen 2-6 Demonstratoren gefertigt werden. Die dritte Version sollte in einem Feldtest erprobt werden.

Arbeitsschritte:

AP 5100: Fertigung

Es sollten alle Einzelkomponenten Mikro Stack, Mikro Reformer mit Verdampfereinheit und katalytischem Brenner so gefertigt werden, dass sie über ihre definierten Schnittstellen zu einem Demonstrator verbaut werden konnten. Dabei war bereits auf die Industrialisierung des Fertigungsprozesses, insbesondere auch auf die Aufbringung der Dichtungen, zu achten. Die benötigten Balance of Plant BoP Komponenten wurden ebenfalls in diesem Arbeitsschritt zur Verfügung gestellt und waren in die jeweiligen Bauteile einzufügen.

AP 5200: Einzelkomponenten Test

Die gefertigten Einzelkomponenten Mikroreformer und Mikrobrennstoffzellen sowie die BoP Komponenten sollten separat auf Einzeltestständen auf Ihre Funktionstüchtigkeit hin getestet werden. Somit konnten die Einzelkomponenten im Vorfeld optimiert werden und mögliche Fehler vermieden werden.

AP 5300: Zusammenbau Demonstrator

Die fertigen und getesteten Einzelkomponenten Mikro Stack, Mikro Reformer mit Verdampfereinheit und katalytischem Brenner sollten in einem Bördelungsverfahren (oder einem ähnlichen Verfahren) zu einem Demonstrator zusammengefügt werden, um u.a. auf Verschraubungen verzichten zu können. In der dritten Version sollte der Methanol-tank und das Gehäuse integriert werden.

Notwendige Ausgangsdaten:

Erkenntnisse und Ergebnisse aus den Arbeitspaketen AP 1000, AP 2000, AP 3000 und AP 4000 waren für die Realisierung des Arbeitspaketes notwendig.

Ergebnis:

Ziel war der Erhalt von Demonstratoren für Feldtests, Demonstrationseinheiten für Kundenpräsentationen sowie Systemen, welche ihre Funktion in Dauerversuchen unter Beweis stellen sollten.

1.3.6. Arbeitspaket 6000: Systemtests

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Integration der einzelnen Komponenten in ein Gesamtsystem.

(OWI, Haseke)

Arbeitsinhalte:

In diesem Arbeitspaket waren die Systemtests durchzuführen. Zu diesem Zweck musste am OWI ein Mikrobrennstoffzellengesamtsystemprüfstand gefertigt werden.

Im Rahmen der durchzuführenden Dauertests sollte gezeigt werden, dass das Brennstoffzellensystem die hohen Zielerfordernisse an die Dauerhaltbarkeit erfüllt. Dafür wurden die Mikrobrennstoffzellengesamtsysteme auf einem Prüfstand installiert und komponentenweise charakterisiert und dann im Zusammenbau getestet. Anschließend war geplant einen 2000 h Dauerlauftest durchzuführen. Nach dem Test sollten die einzelnen Komponenten analysiert und dokumentiert werden um Aufschluss über Schwachstellen und Potentiale zu bekommen.

Angestrebt waren 2000 h Dauerversuche mit dem System 2 und 3 und zusätzlich Feldtests mit System 3.

Durch den Aufbau mehrerer funktionsfähiger Golf-Caddies sollte die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle, sowohl in Testständen als auch im Feld getestet werden.

Arbeitsschritte:

AP 6100: 2000 h Dauerlauf

In diesem Arbeitsschritt waren die Versuchstände für die Daueruntersuchungen von 2000 h aufzubauen. Insbesondere sollten die Versuchstände Bedingungen unter realem Einsatz simulieren können. Hierfür war eine Versuchsprozedur entwickelt worden, welche dem Einsatzzyklus eines Golf-Caddy entspricht.

AP 6200: Feldtest

Im Rahmen des Feldtest sollten die Golfcaddys auf verschiedenen Plätzen erprobt und getestet werden. Anschließend sollte ausgewählten Kunden der Golfcaddy zur Verfügung gestellt und von diesen unter extremen Bedingungen getestet werden. Für diese Tests war geplant einen Datenlogger anzubringen um Rückschlüsse auf das Kundenverhalten zu erhalten und mögliche Fehlerursachen zu bestimmen.

Notwendige Ausgangsdaten:

Zur Durchführung dieses Arbeitspaketes war die Erfüllung des Arbeitspaketes AP 5000 notwendig.

Ergebnis:

Ziel war es einen serienreifen Demonstrator zu entwickeln und in diesem Arbeitspaket letzte Optimierungsschritte für die Überführung in die Serienproduktion durchzuführen.

1.3.7. Arbeitspaket 7000. Produzierbarkeit

Zielsetzung und beteiligte Partner:

Aufbau einer Handfertigungsstraße
(EVT, Schuler, IMT, BASF, Kom-Tron, SKF)

Arbeitsinhalte:

Bei der Produzierbarkeit sollte mit Hilfe einer Handmontagelinie die Produktion der Brennstoffzelle dargestellt werden. Mit Hilfe dieser Handstraße sollte eine Fertigung für geringe Stückzahlen mit beispielsweise 1 Stück pro Stunde ermöglicht werden. Alle Komponenten des Systems und die Implementierung des Systems in die Anwendung wurden ebenfalls auf ihre Umsetzbarkeit überprüft. Es sollte der Aufbau einer Fertigungslinie sowie eine Einzelkomponenten Fertigung erarbeitet werden.

Arbeitsschritte:

AP 7100: Komponentenfertigung

Die Fertigung der Zellbleche erfolgte auf eigens dafür angepassten Hydroformpressen, die über Handpumpen betätigt werden können. Die taktweise Fertigung der Zellbleche sollte dazu realitätsnah direkt vom Coil erfolgen. Die Auslegung der jeweiligen Pressentakte sollte dazu in Bezug auf einen kurzen Verfahrensweg des Arbeitskolbens und dem Druckaufbau zeitlich optimiert werden. Die Presse wurde daher nur um den Spalt geöffnet, der nötig war, um das Blech einzuführen, bzw. das umgeformte Blech gerade aus

der Presse führen zu können. Neben dieser zeitlichen Optimierung erfolgte eine Reduktion des Materialeinsatzes. Dies sollte durch die neuartige Konstruktion der Presse erreicht werden. Die einzelnen Arbeitstakte sollten in enger Folge von wenigen Millimetern ausgeführt werden. Auch der seitlich abdichtende Rand konnte auf wenige Millimeter reduziert werden. Neben dem Abtrennen eines jeden umgeformten Zellbleches wurde nur noch das Einbringen der Einlauf-Bohrungen nötig, was durch eine nachgeschaltete Stanzeinrichtung gelöst wurde. Beschichtungslösungen wie das Vergolden sollten entweder an den Einzelzellblechen oder alternativ auf die unzugeschchnittenen, noch auf dem Coil befindlichen Strukturen aufgebracht werden.

Wichtig war ein Transfer in die Massenproduktion. Voraussetzung für eine erfolgreiche Einführung des Brennstoffzellensystems in den Markt war die kostengünstige, zuverlässige Produktion aller Komponenten in ausreichender Anzahl. Das erste Volumen für eine zuverlässige Produktion wurde auf etwa 2000-3000 Mikrobrennstoffzellen mit den entsprechenden Komponenten geschätzt.

BASF sollte deshalb sicherstellen, dass die im Rahmen des Projektes entwickelte kostengünstige Elektrode sowie die MEA nicht nur im Handlabor, sondern auch auf der Produktionsanlage hergestellt werden kann. Dies sollte mit einem erfolgreichen Transfer der Einzelhandproduktion der Elektrode in die Maschinenproduktion erreicht werden. Erfolgreiche Tests der Produktionsfähigkeit der neuartigen MEA auf der bestehenden Pilotproduktionsanlage wurden angestrebt.

Schon während der Konzeption der MEA-Designs wurden nicht nur die Bedürfnisse des Stackbauers berücksichtigt, sondern von Anfang an auch die kostengünstige Massenproduzierbarkeit. Nach der Auswahl des Designs durch die Partner sollte BASF Studien unternehmen, um die mögliche Herstellung des MEA-Designs und der neuen Materialien auf der Pilotproduktionsanlage zu gewährleisten.

BASF sollte 5 bis 10 Versuchsläufe unternehmen, um die Massenproduktionsfähigkeit der neu entwickelten MEA auf der Anlage zu überprüfen.

In Zusammenarbeit mit SKF musste sichergestellt werden, dass das ausgewählte Dichtungskonzept für die Übertragung in die Serienfertigung geeignet und kostengünstig einsetzbar war.

AP 7200: Auswahl eines Herstellers für die Serienfertigung der Mikro System Peripherie

Am IMT war eine Fertigung der entwickelten Komponenten im industriellen Maßstab nicht möglich. Es konnten nur Systeme zum Bau von Demonstratoren zur Verfügung gestellt werden. Deshalb wurde am IMT ein Konzept entwickelt, dass die Machbarkeit

einer anschließenden vollautomatischen Fertigung der Mikro System Peripherie aufzeigte. Mit Hilfe dieses Konzepts sollten Industriepartner gesucht werden, die die Serienfertigung der benötigten Teile übernehmen können, um Verzögerungen beim Übergang von Demonstrator zu Serienprodukt zu minimieren.

AP 7300: Handfertigungslinie

Es sollte ein Konzept für eine Handfertigungslinie zur Industrialisierung des Mikrobrennstoffzellengesamtsystems erarbeitet und aufgebaut werden. Die Handfertigungslinie sollte demonstrieren, dass es möglich war eine Kleinserie der Mikrobrennstoffzellengesamtsysteme unter günstigen Kostengesichtspunkten herzustellen. Eine Stückzahl in der Fertigung von 1 Mikrobrennstoffzelle pro Stunde wurde angestrebt.

Notwendige Ausgangsdaten:

Es waren sämtliche Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen AP 1000 bis AP 5000 zur Auslegung der Handfertigungsstraße notwendig.

Ergebnis:

Ergebnis des Arbeitspaketes sollte eine funktionsfähige Handfertigungslinie für die Herstellung einer Kleinserie des entwickelten Mikrobrennstoffzellensystems sein.

1.4. Ergebnisse und Anwendungspotentiale

Es waren drei Optimierungsschleifen für das Projekt MIMEMIZ geplant, in denen mit den jeweils gewonnenen Erkenntnissen eine gezielte Optimierung und Integration durchgeführt werden sollte. Nach der ersten Entwicklungsschleife sollte ein Demonstrator gebaut werden, der erste Schritte in Richtung der Volumen- und Gewichtziele aufzeigt. Dabei sollte insbesondere die Integration von Mikroreformer und Mikrobrennstoffzelle dargestellt werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse sollte mit diesem Demonstrator die Steuerungs- und Regelungsstrategien weiter entwickelt werden. Ziel war es durch eine intelligente Regelungsstrategie möglichst viele Komponenten und Sensoren einzusparen. In der nächsten Entwicklungsschleife sollten mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse aus der ersten Schleife insbesondere das Wärmemanagement und Flowdesign weiter optimiert werden. Darüber hinaus flossen die Optimierungen der Hochtemperatur Membran in die Entwicklung ein. In der letzten Entwicklungsschleife sollten die Ergebnisse der zweiten Schleife in die Weiterentwicklung des Produktes umgesetzt werden. Im Vordergrund standen besonders die Lebenszeitanforderungen und die Kostengesichtspunkte bei der Komponentenauswahl. Im Anschluss erfolgte noch

eine Erprobungsphase des Mikrobrennstoffzellengesamtsystems, bei der die Leistungsfähigkeit unter realen Einsatzbedingungen untersucht und beurteilt werden sollte.

Am Ende des Projektes war es geplant, dass Haseke die HT-PEMFC Technologie in den Antrieb eines elektrisch betriebenen Golf-Caddys integriert. Ein Markt von bis zu 5000 Stück pro Jahr wurde zunächst erwartet. Relevante Stückzahlen und damit ein signifikanter Umsatz mit dem neuen Mikrobrennstoffzellengesamtsystem nach Markintegration und –behauptung, waren vor diesem Hintergrund zu erwarten.

Zu der Vermarktung im Bereich der Golf-Caddys war ein weiteres Marktpotential im Bereich Elektrofahrräder, Elektrorollstühle, Mobile Stromversorgung, Mobiler Strompack, Militär, Telekommunikation, Lampen, Straßenlampen, Outdoorbereich (Kühlboxen) etc., im Fall eines günstigen Preis/Leistungsverhältnis, zu erwarten.



Abbildung 1-4 **Golf Caddy CaddyCool Electra**

Projekt im Internet: www.mimemiz.de

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

2.1. Aufgabenstellung und Ziele

Das Ziel des Arbeitspaketes Mikrobrennstoffzelle war es, einen Mikrobrennstoffzellenstack mit modularem Aufbau zu entwickeln, welcher problemlos mit den restlichen Komponenten verschaltet werden kann. Die Hauptaufgaben waren dabei konzeptionelle Arbeiten am Stack (zum Teil mit Hilfe von Strömungssimulationen) und die Schnittstelle zwischen Reformier bzw. der Brenngaserzeugereinheit (bestehend aus Reformier, Verdampfer, katalytischen Brennern und einem Wärmeübertrager) und der Mikrobrennstoffzelle.

2.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand des Vorhabens

Im Bereich der portablen Stromversorger und kleiner mobiler Systeme bis 1 kW_{el} werden aufgrund der vergleichsweise geringen Systemkomplexität hauptsächlich die Direct Methanol Fuel Cell (DMFC), die Polymer Membrane Fuel Cell (PEMFC) und die High Temperature Polymer Membrane Fuel Cell (HT-PEMFC) eingesetzt. Ein wesentlicher Vorteil der DMFC ist die direkte Verstromung von Methanol ohne Reformierungsschritte [Kurzwe. 03]. Allerdings werden in DMFC-Systemen aufgrund von elektrochemischen Verlusten derzeit Wirkungsgrade von 20 % - 30 % realisiert [Heinze. 06a]. Bei PEM und HT-PEM Brennstoffzellen sind dagegen Wirkungsgrade von über 50 % Stand der Technik, wobei Wasserstoff das eingesetzte Brenngas ist. Die Entwicklung der HT-PEM Brennstoffzelle ermöglicht eine Anhebung der CO- und Schwefeltoleranz durch eine erhöhte Betriebstemperatur von 120°C – 200°C. Der Elektrolyt der HT-PEM besteht aus temperaturstabilem Polybenzimidazol und Phosphorsäure. Heinzel et al. zeigen an einer HT-PEM MEA (Membrane-Electrode-Assembly), dass bei einer Temperatur von 180 °C ein stabiler Betrieb bei einem CO-Gehalt von bis zu 5 Vol-% möglich ist [Heinze. 06b]. Aufgrund des hohen Temperaturniveaus und der Eigenschaften des Elektrolyten sind geeignete Materialien für Bipolarplatten und Dichtungen Gegenstand der Forschung.

2.3. Erzielte Ergebnisse

2.3.1. MEA Entwicklung

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der BASF Fuel Cell GmbH, die innerhalb des Projektes erzielt wurden, dargestellt.

Arbeitspaket 2200: MEA-Entwicklung

Im Rahmen des Projekts MIMEMIZ entwickelte BASF eine Celtec-MEA mit reduzierter Platin-Beladung auf der Anode. Das Ziel der Entwicklung war eine Anode mit signifikant geringerem Pt-Gehalt ohne Leistungseinbußen. Vor Projektbeginn enthielt das Celtec Standardmaterial 0,7 mg/cm² Pt auf der Kathode und 1,0 mg/cm² Pt auf der Anode. Im ersten Projektjahr wurden Experimentalelektroden im Handlabor hergestellt und dabei Pt-Gehalte zwischen 0,25 und 1,0 mg/cm² im Betrieb mit Reformat getestet. Für die Optimierung der Struktur wurde die Konfiguration mit 0.5 mg/cm² ausgewählt. Um die Leistung der MEA trotz der geringeren Katalysatormenge zu halten, wurde die Elektrodenstruktur neu eingestellt und optimiert (Porenstruktur, Hydrophobizität). Zunächst wurde die Anode im Handlabor hergestellt und in mehreren Iterationen getestet, bis die Referenzleistung erreicht wurde. Anschließend wurde diese Konfiguration maschinell hergestellt und nachoptimiert. Diese Anode wurde im Maßstab mehrerer Quadratmeter hergestellt und charakterisiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2-1 dargestellt: Die Leistung der Referenz-MEA mit 1,0 mg/cm² Pt auf der Anode wird über den technisch relevanten Stromdichtebereich erreicht und die Standardabweichungen sind sehr gering.

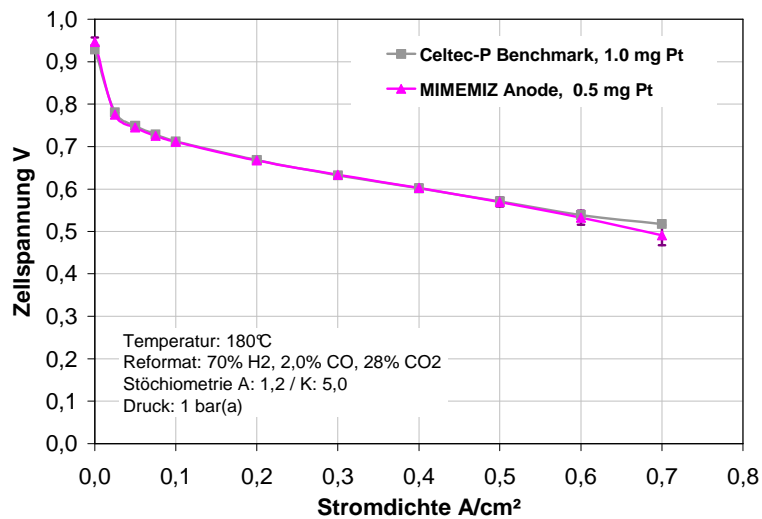


Abbildung 2-1 Testergebnisse einer MEA mit maschinell hergestellter Anode (MIMEMIZ-Anode, 0,5 mg/cm² Pt). Mittelwert von 10 Messungen mit geringer Standardabweichung

Die nächsten Schritte in AP2200 waren Tests zur Reproduzierbarkeit der low-Pt-Anode bzw. deren maschineller Herstellung. Die in MIMEMIZ entwickelte Anode sollte bei BASF Fuel Cell in eine kommerziell erhältliche MEA implementiert werden, so dass Platin eingespart wird und die Materialkosten gesenkt werden können.

Arbeitspaket 5000: Unterstützung der Systemintegration

BASF hat im Berichtszeitraum EVT / OWI bei der Stackentwicklung durch anwendungstechnische Beratung unterstützt, insbesondere bezüglich der Dichtungen, Kompression, Anfahren und Start-Stopp Prozedur sowie der Wechselwirkung zwischen Bipolarplatte und MEA. Die Gasdiffusionslagen der MEA wurden an die relativ flachen Kanäle der Bipolarplatte angepasst, um den Druckverlust zu mindern und somit periphere Verbraucher klein zu halten.

Um langfristig anstelle von Vergoldung auf unedel beschichtete Platten zurückgreifen zu können, wurden in Kooperation mit EVT / OWI Versuche mit MEAs durchgeführt, die nur sehr wenig Säure enthielten. BASF stellte dazu Experimental-MEAs zur Verfügung. Es sollte überprüft werden, ob die Korrosion der Platte durch eine Verminderung des Säuregehalts verlangsamt oder sogar verhindert werden kann.

Arbeitspaket 7000: Studie Produzierbarkeit

Der Aufbau der derzeitigen Celtec-MEA ist wegen eines integrierten Rahmens komplex und nur bedingt für eine Massenproduktion geeignet. Daher wurden im Projekt MIMEMIZ Konzepte für ein neues MEA-Design entwickelt und Vorversuche durchgeführt, um

die Eignung der Materialien für die Fertigung in einem kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess zu prüfen. Das Ziel war ein MEA-Konzept mit verstärkter Membran und nachträglich aufgebrachtener Zelldichtung. Für eine solche MEA muss die Membran mechanisch besonders stabil sein, z.B. durch Verstärkung mit einem Vlies (Abbildung. 2-2a). Nach dem MEA-Assembling sollte eine hitze- und säurestabile FKM-Dichtung von außen aufgebracht werden, mit der die MEA ohne weitere Komponenten in den Stack eingebaut werden kann (Abbildung. 2-2b).

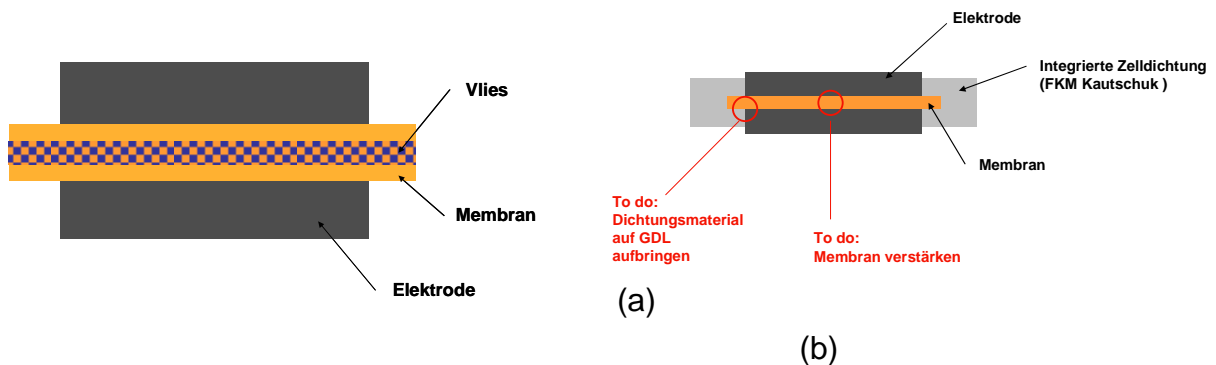


Abbildung 2-2 Konzept der Membranverstärkung (a) und integrierten Zelldichtung (b)

In 2008 wurden Vorversuche mit Vlies-Membranen durchgeführt, in denen die Machbarkeit dargestellt werden konnte. In den ersten Entwicklungsiterationen zeigte sich allerdings, dass die Vlies-Membranen noch eine zu geringe ionische Leitfähigkeit aufweisen. Durch Auswahl der Grundmaterialien und Anpassung der Herstellparameter konnte dieser Parameter verbessert werden, sodass es möglich war, MEAs herzustellen, deren Leistung auf dem Niveau der Referenz CeltecP1000 liegen (Abbildung 2-3). Weiterhin erfolgten proof-of-concept Versuche zum Anbringen einer integrierten Zelldichtung, wobei verschiedene Resins auf Basis von Fluorpolymeren hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit getestet wurden. Abbildung 2-4 zeigt eine solche nachträglich aufgebrachte Zelldichtung auf einer Gasdiffusionslage, wie sie in der Celtec-MEA eingesetzt wird.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

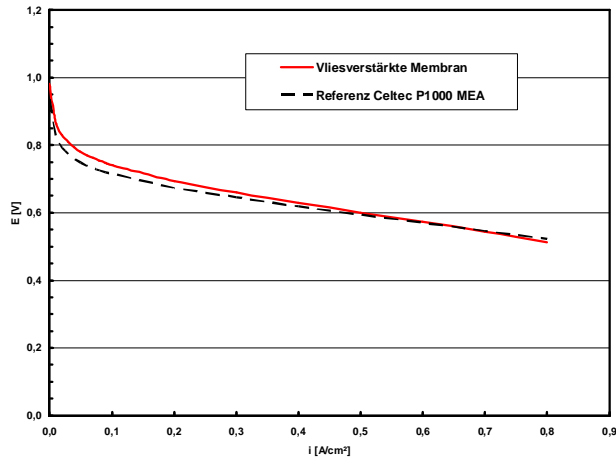


Abbildung 2-3 Vergleich einer neuartigen, vliesverstärkten Membran mit der Referenz MEA Celtec P1000. 180°C, H₂-Air, stoich 1.2/2, p=1bar_a

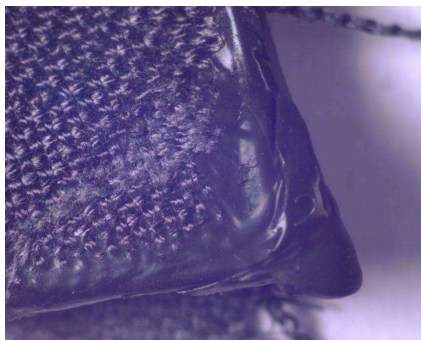


Abbildung 2-4 Vorversuch zum neuen MEA-Design: GDL mit aufgespritzter Viton-Dichtung

Im nächsten Schritt wurde im PoP die Machbarkeit von zwei neuen MEA-Architekturen dargestellt: a) eine MEA mit Membran als Zeldichtung (hierbei wurde eine durch Vlies verstärkte Membran verwendet) und b) eine MEA mit integrierter FKM Dichtung. Die Leistungskurven im Vergleich zur Referenz MEA Celtec P1000 sind in Abbildung 2-5 zu sehen.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

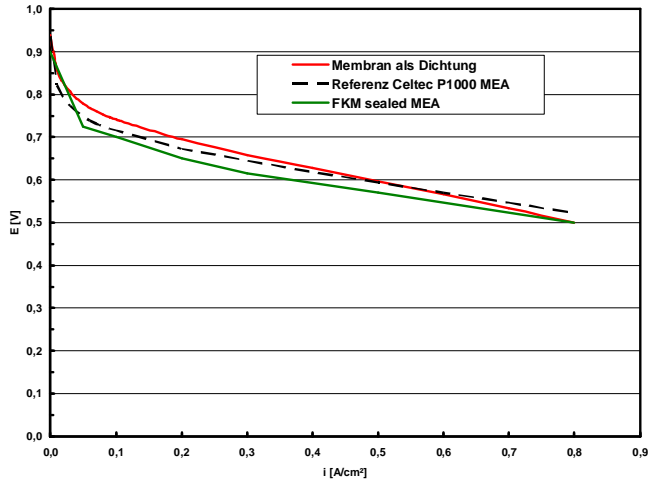


Abbildung 2-5 Vergleich von unterschiedlichen MEA Architekturen im H₂-Luft Betrieb bei 180°C, stoich 1.2/2, p=1bar_a

Wie dem Bild zu entnehmen ist, sind die MEA Leitungen sehr gut und vor allem in ähnlichem Bereich wie die Referenz MEA, was ein sehr wichtiger Schritt zur Weiterentwicklung neuer MEA-Architekturen bedeutet, speziell im Hinblick auf eine mögliche Kostenreduzierung der MEA durch Reduzierung von Materialien und Prozessschritten.

2.3.2. Bipolarplattendesign und Stackentwicklung

Für die Bipolarplatte, eine der Hauptkomponenten der Brennstoffzelle, ist ein mäanderförmiges Design, welches aus einem Metallblech zu beiden Seiten ausgeformt wird, von der Firma borit Leichtbau-Technik GmbH entwickelt und zum Patent angemeldet worden (Offenlegungsschrift vom 26.11.2006, Patent DE 102005026060 A1). Durch die beidseitige Ausformung wird erreicht, dass auf beiden Seiten der Blechebene ein Strömungsfeld entsteht, welches sowohl die Medienzufuhr zur Anode als auch zur Kathode sicherstellt (Abbildung 2-6), dabei aber äußerst dünn bleibt. Dieses innovative Design bewirkt daher eine Verminderung des Materialaufwandes, da die Verwendung zweier Halbseiten zur Bildung einer Bipolarplatte vermieden wird.

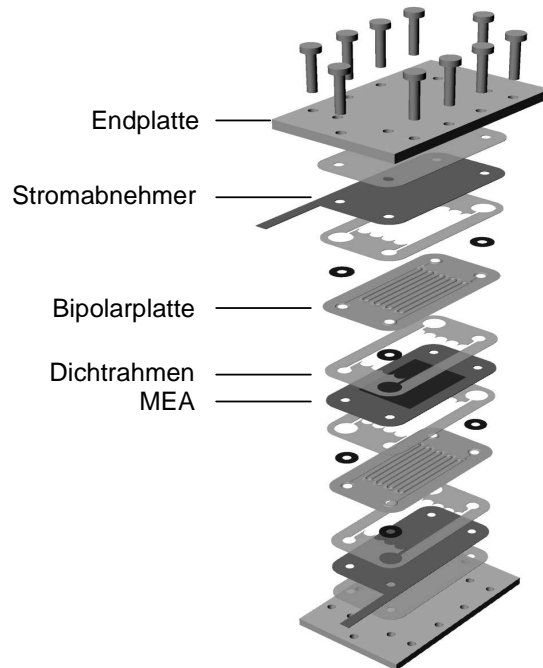


Abbildung 2-6 Explosionsdarstellung der Mikrobrennstoffzelle des Typs HT-PEM basierend auf mittels Hydroforming hergestellten metallischen Bipolarplatten

Darüber hinaus erlauben die Symmetrien der Bipolarplatte die Verwendung eines einzigen Werkzeuges zur Herstellung des Brennstoffzellenstapels. Mit Hilfe des Designs wird somit den angestrebten Zielen des Verbundprojektes MIMEMIZ des verringerten Materialaufwandes und der optimierten Fertigung Rechnung getragen.

Das Dichtungskonzept stammt, wie die Bipolarplatte, von der Firma borit Leichtbau-Technik GmbH. Da das Blech durch die Konstruktionsweise bedingt eine zu beiden Seiten ausgeformte Kanalstruktur aufweist, müssen die Randkanäle durch zusätzliche Höhenausgleichselemente ausgebildet werden. Diese abschließenden Elemente bilden dabei gleichzeitig auch die Dichtung. Die MEA wird ebenfalls in einen Dichtungsrahmen eingelegt und auf das Strömungsfeld gepresst. Zum Aufbau eines Brennstoffzellenstapels wird dieses Prinzip entsprechend oft wiederholt. Die Dichtungen können durch Stanzen hergestellt werden. Der Querschnitt der Kanäle beträgt 0,8 mm x 1,5 mm bei einer Blechdicke von 0,1 mm, wobei sich eine beidseitige Kanaltiefe von 0,8 mm aus der Ausformung von 0,4 mm zu beiden Seiten ergibt. Daraus ergibt sich ein sehr dünnes und leichtes Zellblech der Bauhöhe 0,9 mm. Insgesamt kann man bei einem 20-Zellen-Stapel von einer Bauhöhe von etwa 4,5 cm ohne Endplatten ausgehen.

Das OWI hat im Rahmen der Stackkonzeption die Auslegung und Konstruktion der Stromabnehmer, Abschlussdichtungen und Endplatten durchgeführt. Zudem sind CFD-

Simulationen des Mikroflowfields der Bipolarplatte durchgeführt worden. Hintergrund der Untersuchung war die Prüfung der Eignung des Flowfields für das Brennstoffzellensystem. Hier stand vor allem der Druckverlust, der sich auf den Systemwirkungsgrad auswirkt, im Vordergrund. Um die Symmetrie des Bipolarplattendesigns herzustellen, und somit die Vorteile in Hinblick auf Kompaktheit und Materialaufwand voll ausnutzen zu können, sind Engstellen notwendig, die sich jeweils am Ende des Mäanderkanals befinden. Hier war potenziell die Gefahr gegeben, dass der Einfluss dieser Stellen auf den Druck zu hoch und somit das Design verworfen werden muss. Aus diesem Grunde wurde vor allem unter diesem Augenmerk simuliert. Abbildung 2-7 fasst die Ergebnisse dieser Berechnungen zusammen. Die gezeigte Berechnung wurde für einen Luftvolumenstrom von $\dot{V} = 0,15$ slm durchgeführt, was der Kathodenluft bei einer Stromdichte von ca. $0,7 \text{ A/cm}^2$ und $\lambda_{\text{O}_2} = 1,8$ entspricht. Des Weiteren wurde eine isotherme Strömung bei $180 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Eine weitere Randbedingung war, dass die MEA die Kanäle bündig abschließt.

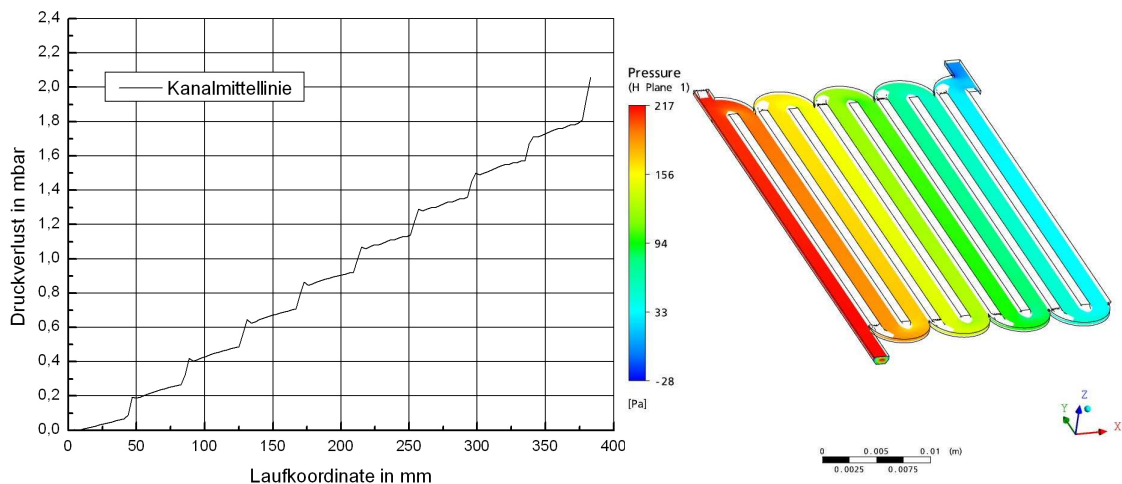


Abbildung 2-7 Druckverlauf über der Bipolarplatte (Mäander-Design der borit Leichtbautechnik GmbH) für folgende Randbedingungen: $\dot{V} = 0,15$ slm (entspricht der Kathodenluft bei ca. $0,7 \text{ A/cm}^2$ und $\lambda_{\text{O}_2} = 1,8$), isotherme Strömung bei $180 \text{ }^\circ\text{C}$, Annahme: MEA schließt Kanäle bündig ab

Die Berechnung zeigt, dass die Engstellen im Flowfield zwar signifikante Auswirkung auf den Druckverlust haben, dieser aber insgesamt unter den genannten Randbedingungen recht gering ausfällt und mit 2 mbar für handelsübliche Gebläse als durchaus machbar erscheint. Das Ergebnis bedeutet auch, dass extrem hohe Druckverluste, wie sie anfänglich am Brennstoffzellenprüfstand auftraten, nicht dem Flowfield zuzuschreiben sind. Die Simulationen unterstützten somit die Fehlersuche und trugen dazu bei,

dass der Druckverlust der Brennstoffzelle letztlich durch konstruktive Änderung der Einlässe gesenkt werden konnte. Mittels des von borit erarbeiteten Fertigungsprinzips können mittels Hochdruckumformung ausreichend tiefe Kanäle für die Bipolarplatten erzeugt werden, so dass der Aufbau funktionsfähiger Brennstoffzellen-Stapel mit Bipolarplatten mit der neuartigen Mäanderstruktur möglich ist (Abbildung 2-8).

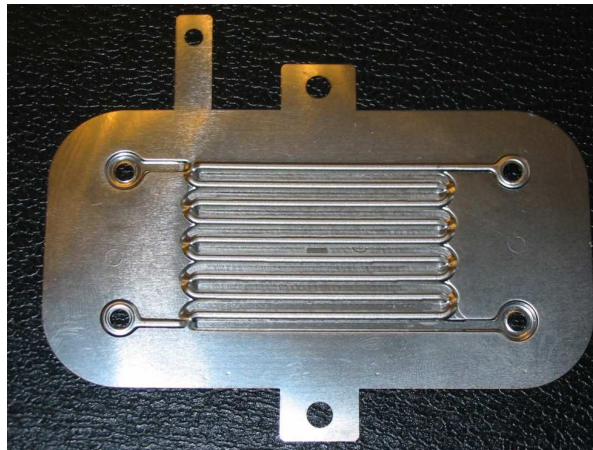


Abbildung 2-8 Unbeschichtete Bipolarplatte mit Stromabnehmer und seitlichen Montagelöchern

Die mäanderförmigen Bipolarplatten ermöglichen einen ausreichenden Volumenstrom der Prozessgase. Die Fertigungskonzepte mittels Hydroforming können wie angedacht für die vollautomatische Fertigung vom Coil verwendet werden.

Bei der Auslegung und Definition der Schnittstellen ist ein Konzept erarbeitet worden, das in Abbildung 2-9 dargestellt ist. Das Design der Bipolarplatte von borit ist, aufgrund der zuvor geschilderten konzeptionellen Überlegungen, als Systemkomponente ausgewählt worden. Somit waren die Abmaße der Brennstoffzelle als Randbedingung für die Auslegung des Brenngaserzeugers gegeben. Aus der Strömungsführung in der Brennstoffzelle, die nach Untersuchungen an Einzelzellen auf Gleichstrom festgelegt wurde, leitet sich eine Eintrittsbedingung in die Brennstoffzelle ab. Der Wärmeübertrager als Plattform für den Brenngaserzeuger sowie die interne Verschaltung der Prozessstufen ist unter Berücksichtigung der Schnittstelle, die durch eine temperaturstabile Zwischenplatte aus glasfaserverstärktem Kunststoff ausgeführt ist, im Rahmen des Arbeitspaketes Mikroreformer entwickelt worden.

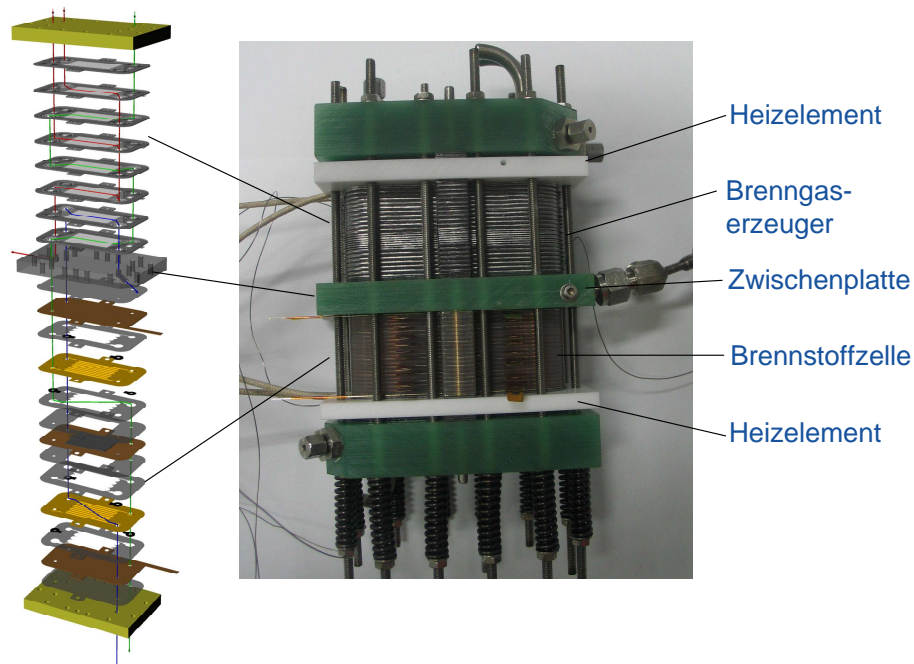


Abbildung 2-9 Darstellung der Schnittstelle zwischen Brenngaserzeuger (Reformer/Verdampfer/katalytischer Brenner/Wärmeübertrager) und Brennstoffzelle mit Ansicht der Einzelkomponenten in Explosionsdarstellung

Als Kühlkonzept wurde nach Auslegungsrechnungen und Versuchen eine externe konvektive Kühlung ausgewählt, für die man bei dieser Zellgröße und Leistungsklasse ein positives Resümee ziehen kann. Für die Kühlung wird ein handelsüblicher PC-Lüfter eingesetzt. Die Auslasttemperaturen der Brennstoffzelle lassen sich durch Regelung der Steuerspannung des Lüfters zwischen 160 °C und 170 °C einstellen (siehe Abbildung 2-10). Bei steigender Stromdichte und steigender Steuerspannung (und somit steigendem Luftvolumenstrom) ist eine Abkühlung der Ein- und Austrittstemperaturen der Brennstoffzelle zu beobachten. Die Versuche zeigen, dass die Brennstoffzelle erst ab einer elektrischen Leistung von 20 W gekühlt werden muss. Bei geringeren Leistungen ist eine Beheizung erforderlich.

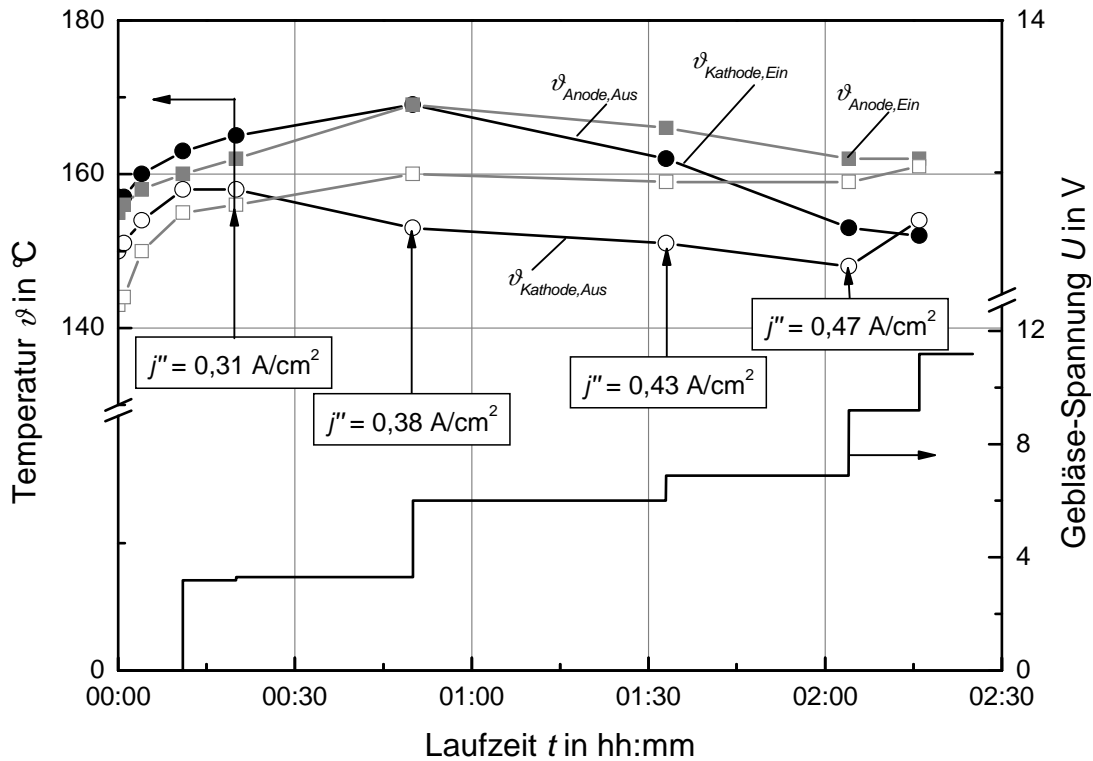


Abbildung 2-10 Gemessene Ein- und Austrittstemperaturen eines 20-Zellen-Stapels bei allmählicher Steigerung der Stromdichte und diskontinuierlicher Steigerung des Kühlluftstromes (über Steuerspannung des Lüfters)

Im Hinblick auf ein Gesamtsystem ist diese Möglichkeit der Kühlung als sehr viel versprechend zu bewerten. Die Regelung der Brennstoffzellenbetriebstemperatur kann auf diese Weise durch eine vom System unabhängige Stellgröße bewerkstelligt werden. Zudem liegt die elektrische Leistungsaufnahme des eingesetzten Lüfters deutlich unter 1 W_{el} und trägt daher nicht wesentlich zu den parasitären Verlusten des Systems bei.

2.3.3. Dauerversuche

Die Stackentwicklung ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass die Korrosionsstabilität der Bipolarplatte ausreichend hoch sein sollte, um die Lebensdaueranforderungen zu erfüllen. Daher wurden Dauerversuche mit verschiedenen Materialien und Beschichtungen der Bipolarplatten durchgeführt. Die nachfolgende Versuchsmatrix zeigt eine Zusammenfassung der durchgeführten Versuche mit den jeweils erzielten Laufzeiten.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

Nr.	Komponente	Ziel	Dauer
1	Vergoldeter Bipolarplatte, MEA (Standard)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	300 h
2	1.4571 Platten, MEA (Standard)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	67 h
3	2.4856 Platten, MEA (Standard)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	90 h
4	1.4539 Platten, MEA (Standard)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	34 h
5	Vergoldete Bipolarplatte, MEA (Standard)	Zyklen	198 h
6	Vergoldung PVD 0,1 µm, MEA (Standard)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	300 h
7	Titanbeschichtung PVD 0,1 µm	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	7 h
8	Beschichtete Platten und MEA (dry)	Inbetriebnahme sofort nach Montage	<3 h
9	Beschichtete Platten und MEA (dry)	Inbetriebnahme nach Standzeit	28h
10	Vergoldung PVD 0,8 µm MEA (Std)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	320 h
11	Vergoldung PVD 0,8 µm MEA (Std)	Zyklen	58 Zyklen
12	Ti/DLC beschichtete Platten	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	<0,5 h
13	a-C/Ti beschichtete Platten und MEA (Std)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	300 h
14	Corus - Material, MEA (Std)	Automatisierter Dauerlauf, Degradation	0,5h

Als Zielgröße wurde ein Dauerbetrieb von 300 h angesetzt. Zunächst wurden drei verschiedene Grundmaterialien ohne Beschichtung getestet (Nr. 2 bis 4). Keines zeigte jedoch ausreichende Laufzeiten. Die besten Ergebnisse wurden mit Goldbeschichtungen erreicht (Nr. 1, 5, 6, 10, 11). Dabei wurden zwei unterschiedliche Beschichtungsverfahren getestet: galvanische Beschichtung und PVD-Beschichtung. Beide Beschichtungen waren grundsätzlich für den Einsatz geeignet. Somit stehen zwei Optionen bereit, mit denen die angestrebte Lebensdauer erzielt werden kann. Als Alternative kann die Beschichtung mit a-C/Ti (ein spezielles Graphitgefüge mit Titandotierung) angesehen werden. Hier konnten ebenfalls die angestrebten 300 h nachgewiesen werden, wobei ähnliche Degradationsraten, wie bei der galvanischen Goldbeschichtung festzustellen waren. Durch den Einsatz einer goldfreien Beschichtung erhofft man sich längerfristig eine deutliche Kostenreduktion. Neben den Versuchen zur Beschichtung von Bipolarplatten wurden auch Untersuchungen mit einer modifizierten MEA (weniger Beladung mit Phosphorsäure) durchgeführt. Dabei stellten sich jedoch Undichtigkeiten ein. Zudem war die Performance ungenügend, wobei nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob die MEA oder die Korrosion ausschlaggebend waren. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Abbildung 2-11 dargestellt.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

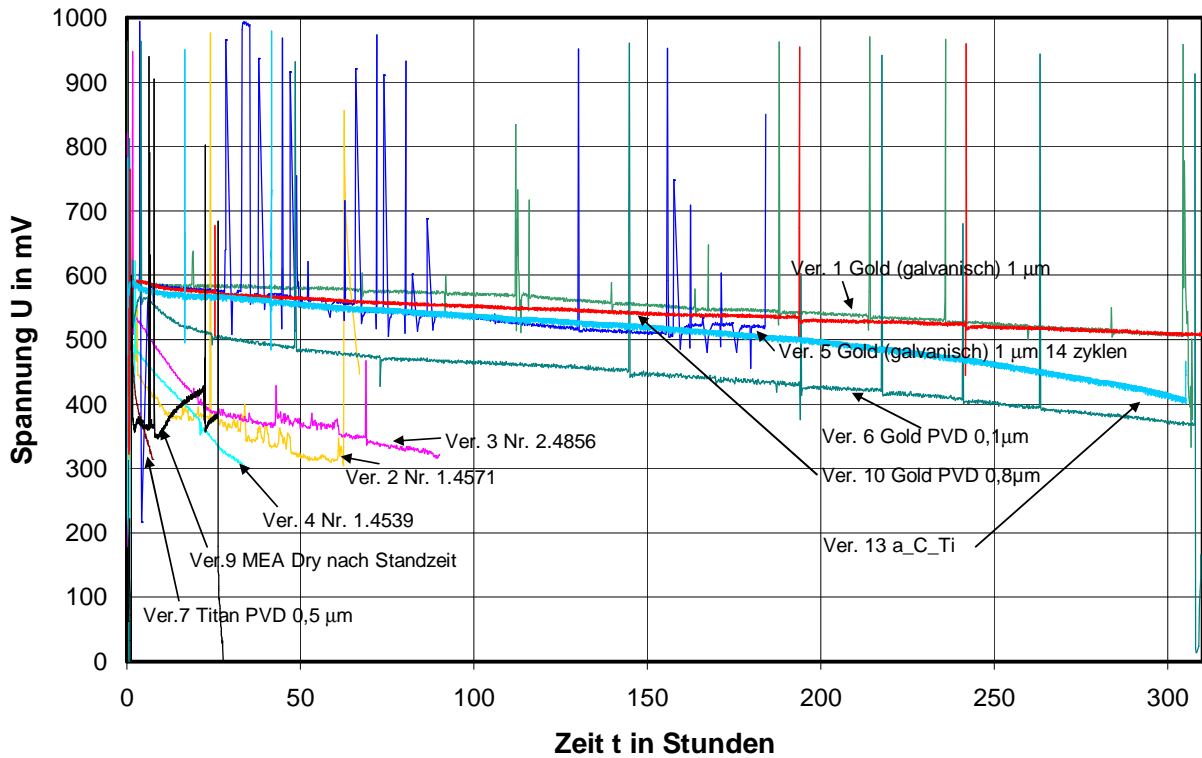


Abbildung 2-11 Degradation der verschiedenen beschichteten und unbeschichteten Bipolarplatten

Da die Zelle im späteren System nicht im Dauerlauf betrieben werden wird, wurde zusätzlich ein Zyklustest durchgeführt. Hierbei sollte der Einfluss eines Start-Stopp-Betriebs dargestellt werden. In 58 Zyklen wurde eine Gesamtversuchszeit von über 230 h erreicht. Der Vergleich des Zyklusversuchs mit dem Dauerlauf zeigte sehr ähnliche Degradationsraten.

Zusätzlich zu den Untersuchungen zur Korrosionsbeständigkeit der Bipolarplatte wurden mehrere Stacks und Short-Stacks aufgebaut und getestet. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht über alle bisherigen Stackversionen:

Versionen	Performance/Ergebnis	Lösungsansatz/weiteres Vorgehen
5-Zeller V1	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtigkeitsprobleme • Fertigung aufwendig • Druckverlust zu hoch • Keine Kühlmöglichkeit wegen Druckverlust 	<ul style="list-style-type: none"> • Dünnere MEA • Einlaufscheiben aus Metall • Zusätzliche Dichtlippe im Einlauf

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

5-Zeller V2	<ul style="list-style-type: none"> • Dichtung verstopft Kanäle 	<ul style="list-style-type: none"> • Änderung der Dichtungen (Einlassbohrung) • Änderung Einlaufscheiben zur Abstützung der Dichtung im Einlauf • Geringerer Anpress-druck (Feder)
5-Zeller V3	<ul style="list-style-type: none"> • 85 h Versuchszeit • keine Degradation • Deutlich gesenkter Druckverlust 	<ul style="list-style-type: none"> • Wiederinbetriebnahme nach Standzeit
20-Zeller V1	<ul style="list-style-type: none"> • Stack nach 2 Wochen Lagerung in Betrieb genommen • Ausgetretene Phosphorsäure greift Goldbeschichtung an • Blockieren der Kanäle durch gelartige grünliche Substanz 	<ul style="list-style-type: none"> • Säubern der Bipolarplatten • Erneuter Aufbau mit gleichen Dichtungen
20-Zeller V1 (Wiederaufbau)	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzzeitig war Versuch möglich • Ergebnis deutet auf gute Performance als Stack hin • Degradation und Undichtigkeit → Korrosion und Wiederverwendung Dichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Auseinandernehmen und Dokumentation
5-Zeller V3 (Wiederinbetriebnahme nach etwa 12 Wochen)	<ul style="list-style-type: none"> • Stack war nach Betrieb und Standzeit noch intern und extern dicht! • Bipolarplatten extrem angegriffen • Verminderte Performance: Max. 0,1 A/cm² 	<ul style="list-style-type: none"> • Auseinandernehmen und Dokumentation
20-Zeller V2	<ul style="list-style-type: none"> • 100 h Betriebszeit • Performanceverlust bei einzelnen Zellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Auseinandernehmen und Dokumentation

Bei den beiden Short-Stacks mit fünf Einzelzellen V1 und V2 wurden Probleme der Dichtigkeit und des Druckverlustes festgestellt. Die interne Undichtigkeit bei Version 1 wurde in Abstimmung mit dem Projektpartner Schuler Hydroforming sowie der brit

Leichtbau- Technik durch das Einbringen einer zusätzlichen Federnut im Einlaufbereich behoben. Des Weiteren wurden die im Einlauf verwendeten PFA-Scheiben für die nachfolgenden Versionen aus Metall gefertigt und zum Korrosionsschutz vergoldet. Neben den genannten Maßnahmen wurde für den Short-Stack Version 2 von BASF eine MEA mit dünnerer GDL bereitgestellt, um hierdurch die Druckverluste bei der Durchströmung zu verringern. Stack Version 2 zeigte eine gute Performance. Es wurden keine nennenswerten Leckagen festgestellt. Durch ein Absetzen der Randdichtung in die Kanäle kam es aber weiterhin zu erheblichen Druckverlusten.

Für den 5-Zeller Version 3 wurden weitere Modifikationen im Bereich des Einlaufes vorgenommen. Diese betrafen die Form der verwendeten Stützscheiben und die Geometrie der Dichtungen. Hierdurch war eine deutliche Reduzierung des Druckverlustes möglich. Das Betriebsverhalten des Short-Stacks ist maßgeblich von der Anodenstöchiometrie abhängig. Bei den Versuchen konnten H_2 -Umsätze von 70 % erreicht werden (Auslegungspunkt für das Gesamtsystem). Eine Kühlung über die Veränderung des Kathodenluftverhältnisses konnte realisiert werden. Allerdings waren hierzu sehr hohe Luftverhältnisse nötig, die wiederum zu erhöhten Druckverlusten führten. Die Versuchsergebnisse zeigten deutlich, dass eine Entkopplung von Brennstoffzellenkühlung und Kathodenstöchiometrie hinsichtlich des Einsatzes von kommerziell erhältlichen BoP-Komponenten zielführend ist. Druckverluste von < 20 mbar sind erreichbar und können von handelsüblichen Gebläsen bei ausreichender Luftförderung aufgebracht werden. Der 5-Zellen-Stack V3 hat während der ersten Betriebsphase 85 Stunden Strom produziert ohne Anzeichen von Degradation. Bei der Wiederinbetriebnahme nach etwa 12 Wochen Standzeit hatte der Stack nur noch einen Bruchteil seiner vorherigen Leistung. Nach der Demontage konnten Schädigungen an den Bipolarplatten festgestellt werden. Diese sind in Abbildung 2-12 dargestellt. Sie sind durch Ablösungserscheinungen und Blasenbildung der Goldbeschichtung charakterisiert.

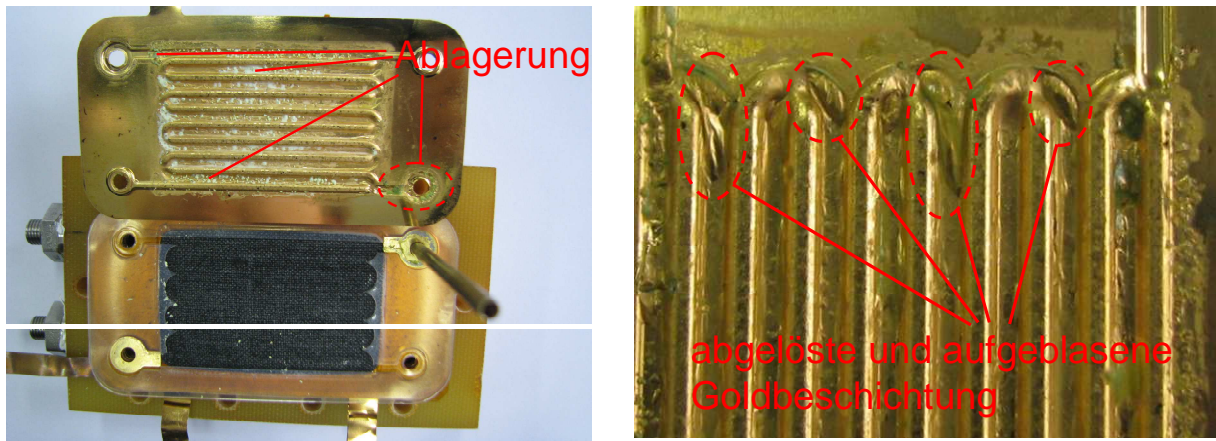


Abbildung 2-12 **Geschädigte Bipolarplatten nach Wiederinbetriebnahme des 5-Zellers**

Bei der Inbetriebnahme des 20-Zellers Version 1 wurde festgestellt, dass die für den Betrieb notwendige minimale offene Zellspannung nicht erreicht werden konnte, was ein Anzeichen für einen blockierten Massentransport ist. Nach der Demontage des Stacks zeigte sich, dass überschüssige Phosphorsäure aus der MEA ausgetreten war und sich in Fehlstellen der Goldbeschichtung eine gelartige Substanz gebildet hatte. Diese führte zu einer Blockade der Strömungskanäle. Durch das Einwirken der Phosphorsäure auf die Bipolarplatten während der Standzeit war die Beschichtung deutlich geschädigt. Um dennoch Erkenntnisse über den 20-Zellen-Stack zu gewinnen, wurden die geschädigten Platten gesäubert und erneut zu einem Stack montiert. Durch die umgehende Inbetriebnahme konnte eine erneute Vorschädigung verhindert werden. Der Betrieb mit reinem Wasserstoff ermöglichte eine Stromproduktion von 45 W. Im weiteren Versuchsverlauf nach mehreren Anfahrvorgängen zeigten einige Zellen verstärkte Schädigungen, was sich im Abfall der offenen Zellspannung widerspiegelte. Die Erfahrungen mit dem 20-Zeller zeigten, dass die Korrosion durch Standzeiten insbesondere vor der Erstinbetriebnahme gravierend ist.

Im Anschluss wurde ein weiterer 20-Zellen-Stack aufgebaut. Dieser konnte für 100 h mit Wasserstoff betrieben werden. Dabei war die Degradation bei einzelnen Zellen deutlich stärker als bei anderen. Abbildung 2-13 zeigt die Versuchsdurchführung. Um auf die angestrebte Betriebszeit von min. 300 h zu kommen, sind noch weitere Optimierungen hinsichtlich der Montage und der Qualitätssicherung erforderlich.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

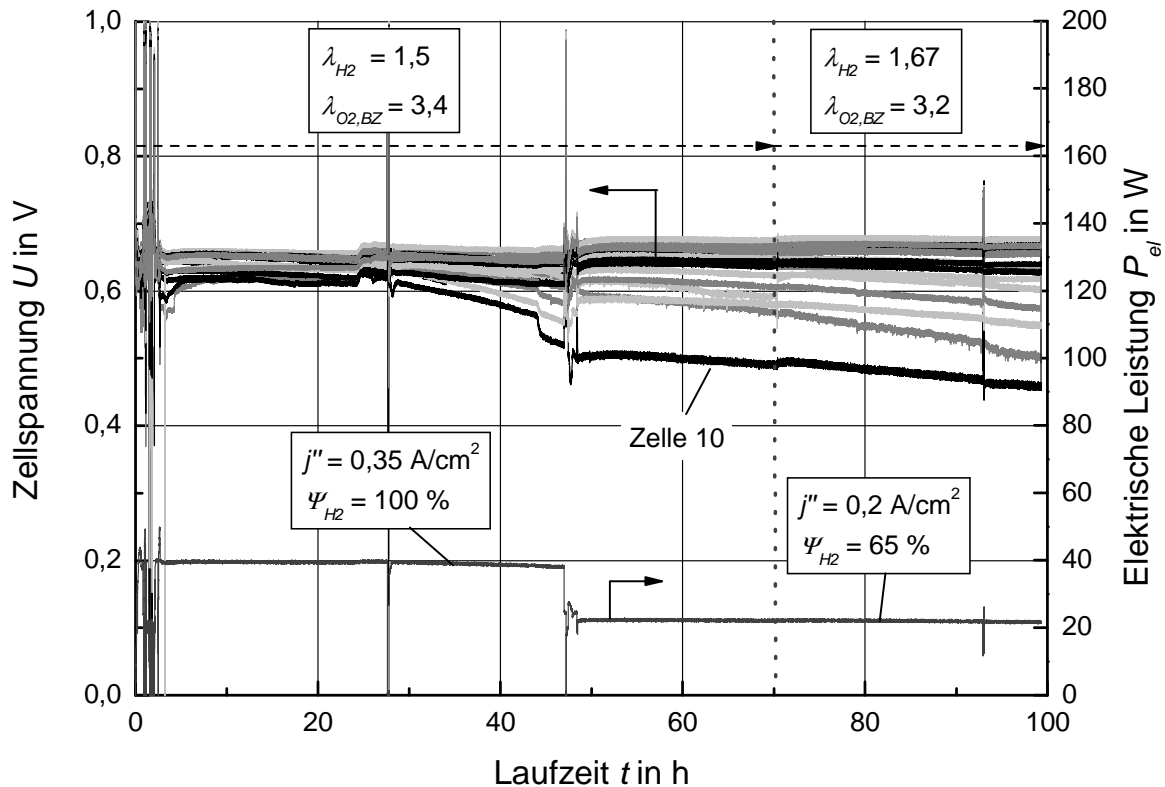
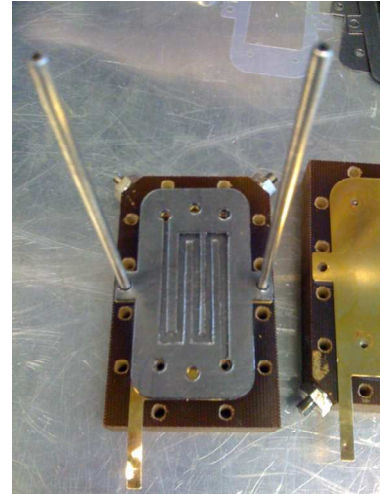


Abbildung 2-13 Versuch mit 20-Zeller - 100h Laufzeit

Das an der EVT GmbH im Rahmen der Stackentwicklung durchgeführte Screening zur Korrosionsstabilität der Bipolarplatten wurde von der AixCellSys GmbH fortgeführt. Ziel war einerseits der Nachweis längerer Betriebszeiten durch Modifikation der Goldbeschichtung, andererseits Untersuchungen zu alternativen Bipolarplattenkonzepten, die eine Kostenreduktion ermöglichen. Im Bereich der metallischen Bipolarplatten wurde zunächst eine galvanische Goldbeschichtung mit einer Nickel-Unterschicht getestet. Die Schichtdicke der Goldschicht wurde dabei, wie beim bisher besten Ergebnis mit 1 μm beibehalten. Anschließend wurde der gleiche Schichtaufbau mit einer Goldschicht von 4 μm getestet. Da die Goldbeschichtung sehr kostenintensiv ist und diese Kosten vor allem auch durch den Rohstoffpreis für Gold bestimmt werden, wurde ein alternatives Konzept getestet. Dabei wurde eine graphitische Bipolarplatte aus mehreren geschnittenen Graphitfolien zusammengesetzt. Jedes Plattenassembly besteht aus drei Schichten. Zwei Schichten die die Gasverteilung auf der Anode- bzw. Kathodenseite ermöglicht und eine Trennschicht. Es wurde sowohl das Grundmaterial hinsichtlich Optimierung der elektrischen Leitfähigkeit variiert als auch eine erste Fertigungsoption getestet. Hinsichtlich der Fertigung stellte sich heraus, dass ein Laserschneiden der Graphitfolien zu erhöhten Übergangswiderständen führte und somit nicht für die Fertigung eingesetzt werden kann. Alternativ können die Strukturen durch Ausstanzen produziert werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Überblick über die durchgeführten Versuche.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

Nr.	Material Bipolarplatte	Dauer
1	Sigraflex F10010C, handgeschnitten	239 h
2	Sigraflex F10010C, handgeschnitten	3 h
3	Sigraflex F10010C, gelasert	2 h
4	Sigraflex F10010C, handgeschnitten	1 h
5	Sigraflex F10010C, gelasert	1 h
6	Sigraflex F10007C, handgeschnitten	50 h
7	Sigraflex F05007Z, handgeschnitten	95 h
8	Gold mit Nickel Untersicht, galvanisch beschichtet, 1 μm	620 h
9	Gold mit Nickel Untersicht, galvanisch beschichtet, 4 μm	> 750 h



In Abbildung 2-14 ist der Verlauf der Zellspannung über der Versuchszeit für einige ausgewählte Proben dargestellt. Als Referenz ist der Versuch EVT1 mit einer 1 μm -Goldschicht, die galvanisch aufgebracht wurde, aufgetragen. Dieser Versuche stellt den besten Korrosionsschutz dar, der im Rahmen der Untersuchungen der EVT ermittelt werden konnte. Durch den Einsatz einer Ni/Au-Doppelschicht konnte bei gleichbleibender Golddicke bereits eine deutliche Verbesserung der Lebensdauer erzielt werden. Wird als Vergleichswert ein Abfall der Zellspannung um 100 mV angesetzt, konnte die Standzeit bereits von 300 Stunden auf 450 Stunden verlängert werden. Der Einsatz einer dickeren Goldschicht zeigt, dass auch deutlich längere Betriebszeiten möglich sind. Abgesehen vom anfänglichen Spannungsabfall, der wahrscheinlich auf ein Kontaktierungsproblem der Messtechnik zurückzuführen ist, ist über mehr als 700 Stunden Betriebszeit nur eine minimale Degradation von wenigen Millivolt festzustellen. Eine dickere Goldschicht führt somit zu einer deutlich geringeren Degradation durch Korrosion.

2. Entwicklung und Test einer Mikrobrennstoffzelle

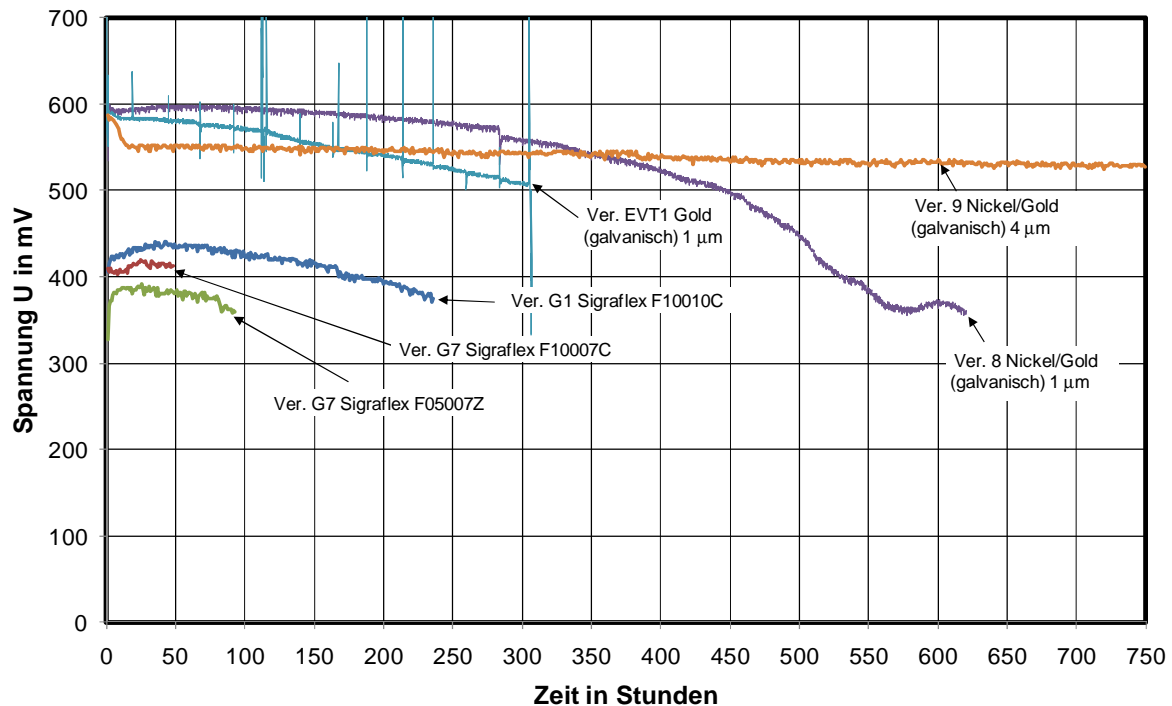


Abbildung 2-14 Degradation verschiedener Bipolarplattenkonzepte

Die Versuchsergebnisse mit der graphitischen Schichtenplatte zeigen etwas schlechtere Betriebseigenschaften als die goldbeschichtete metallische Bipolarplatte. Das geringe Spannungsniveau deutet darauf hin, dass hier ein erhöhter Kontakt- / Leitungswiderstand vorliegt. Die Degradationsrate ist mit der des Referenzversuchs mit Goldbeschichtung vergleichbar. Zur Reduzierung der Spannungsverluste wurden noch andere Materialien mit einer verbesserten elektrischen Leitfähigkeit getestet. Diese zeigen jedoch keine signifikante Verbesserung. Hinsichtlich der Kostenreduktion ist der Ansatz mit einer Schichtenplatte sehr vielversprechend. Allerdings sind noch weitere Optimierungen hinsichtlich des eingesetzten Materials erforderlich, um Kontaktwiderstände und Leitungswiderstände zu reduzieren.

Neben der Lebensdauer im Dauerbetrieb ist auch die Stabilität in einer zyklischen Betriebsweise der Brennstoffzelle wichtig, da sich der Betrieb des Systems in der Golf-Caddy Anwendung vor allem durch kurze Ladezeiten während eines Spieltages und durch lange Standzeiten zwischen Spieltagen und jahreszeitbedingten Spielpausen auszeichnet. Der schon für den Dauerversuch gewählte Betriebspunkt $j'' = 0,5 \text{ A/cm}^2$ wurde zur Prüfung des Einflusses der Standzeit auf die Degradation der Bipolarplatten in 14 Zyklen unterschiedlicher Laufzeit, ausgehend von Starts im kalten Zustand nach unterschiedlich langen Standzeiten, eingestellt. Abbildung 2-15 zeigt die Auswertung dieses Versuchs. Ein signifikanter Einfluss der Standzeit auf den Verlauf der mittleren

Zellspannungen über die Zyklen ist dabei nicht zu erkennen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass der Abfall der Zellspannung nach den 200 h Laufzeit des Versuchs vergleichbar ist mit dem der Zelle aus dem Dauerbetrieb nach gleicher Laufzeit. Nach den längeren Standzeiten von über 50 Stunden, die jeweils nach den Zyklen 5 und 9 zu verzeichnen sind, ist keine stärkere Degradation zu sehen als nach den übrigen Zyklen, was ein weiterer Hinweis für den geringen Einfluss der Standzeit ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die Korrosion der Bipolarplatten nach korrekter Inbetriebnahme, vor allem auf ein anliegendes Potenzial bzw. den Lastfall zurückzuführen ist.

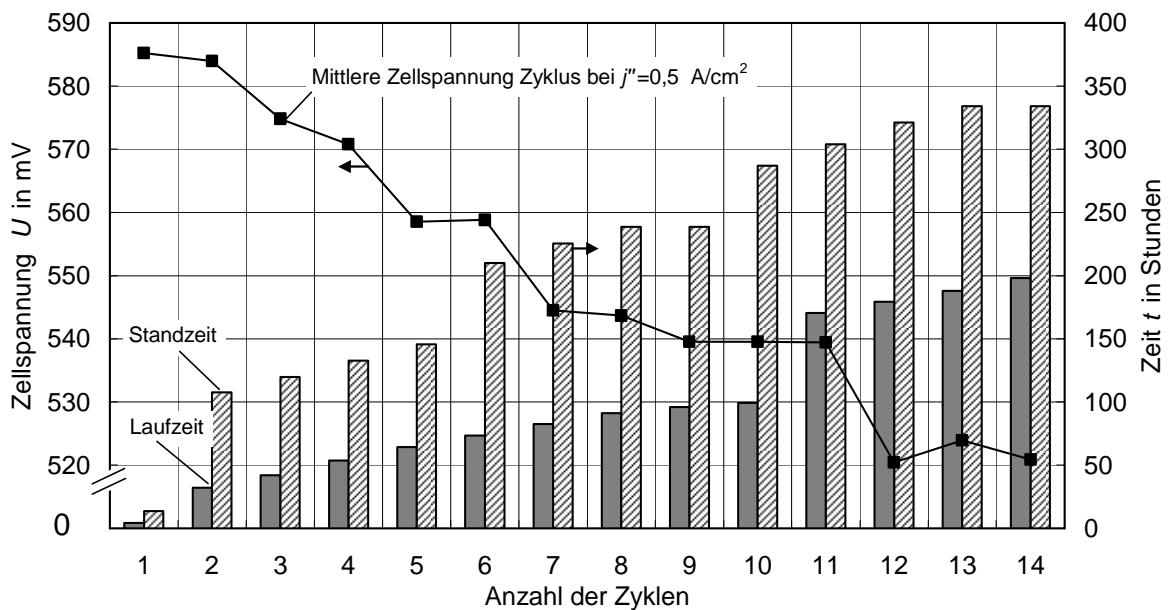


Abbildung 2-15 Mittelwert der über 14 Zyklen gemessenen Zellspannung sowie Stand- und Laufzeit der Einzelzelle aufgetragen über die Anzahl der Zyklen

Die Durchführbarkeit von 100 Zyklen à 3 Stunden scheint darstellbar, so dass im Rahmen der Dauerversuche wichtige Grundlagen zur Erfüllung der Anforderungen einer Golf-Caddy Anwendung erarbeitet werden konnten. Nach Abschluss der Untersuchungen kann man festhalten, dass es aufgrund der Herausforderungen mit der Korrosionsstabilität und den Erkenntnissen aus den geschilderten Versuchen sinnvoll war, die Dauerläufe mit Einzelzellen durchzuführen.

2.4. Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung der Mikrobrennstoffzelle wurden zunächst Versuche mit einer elektrisch beheizten Einzelzelle mit goldbeschichteten Bipolarplatten aus umgeformten Edelstahlfolien durchgeführt. In den Versuchen konnte eine gute Leistungsfähigkeit der Einzelzelle dargestellt werden. Es konnten hohe Stromdichten erreicht werden, was auf eine ausreichende Qualität des Strömungsfeldes hinweist. Weiterhin wurde deutlich, dass die Betriebstemperatur bei CO-haltigem Anodengas einen erheblichen Einfluss auf die Leistung der Zelle hat. Im Rahmen der Versuche wurde die Notwendigkeit hoher Betriebstemperaturen (über 180 °C) bestätigt. Auf Basis des eingesetzten Bipolarplattenkonzeptes wurde ein 20-Zellen-Stapel aufgebaut und erfolgreich betrieben. Dabei konnte eine gute Durchströmung der Randzellen nachgewiesen und somit das Konzept auch für größere Brennstoffzellenstapel verifiziert werden [Wichma. 10]. Durch die konvektive Kühlung über die Außenflächen der Brennstoffzelle mit Hilfe eines PC-Lüfters konnten Betriebstemperaturen zwischen 160 °C und 180 °C eingestellt werden.

Eine große technische Herausforderung stellt die Korrosion der Bipolarplatten dar, die stark von der Beschichtungsdicke der Platten abhängt. Zum Erreichen einer guten Leistungsfähigkeit ist bei der Montage der Zellen eine Prozedur notwendig, die das direkte Spülen und Aufheizen der Zelle vorsieht, um überschüssige Phosphorsäure auszutragen. Im Rahmen von Daueruntersuchungen an Einzelzellen aus unterschiedlichen Edelstählen und mit unterschiedlichen Beschichtungen wurde für eine Bipolarplatte mit einer Goldbeschichtung von 4 µm Dicke nach über 750 Betriebsstunden ein Abfall der Zellspannung von nur wenigen Millivolt festgestellt. Dies ist für die angestrebte Anwendung akzeptabel und deutet darauf hin, dass das Konzept auch für langlebige Anwendungen im Bereich von Massenmärkten attraktiv ist.

3. Entwicklung und Test eines Mikroreformers

3.1. Aufgabenstellung und Ziele

Ziel des Arbeitspaketes Mikroreformer war die Auslegung und Entwicklung der Reformereinheit. Die Arbeiten sollten hier z. B. die Auswahl Katalysatoren, die Entwicklung der Verdampferereinheit und die Durchführung von Simulationen zur größtmöglichen thermischen Integration der Komponenten sein. Ziel der technischen Entwicklung war ein mit dem Brennstoffzellenstack integrierbarer Brenngaserzeuger (Reformer / Verdampfer / katalytische Brenner), der analog zur Brennstoffzelle, also unter Nutzung des Hydroforming-Verfahrens, konzipiert sein sollte. Das Arbeitspaket umfasste dabei auch die Entwicklung von Betriebsstrategien für den Reformer.

3.2. Wissenschaftlicher und technischer Stand des Vorhabens

Im Bereich der mikrostrukturierten Reaktoren sind vor allem Untersuchungen veröffentlicht, die entweder eher unter akademischen als unter industriellen Aspekten durchgeführt worden sind oder eher eine Einzelkomponentenentwicklung darstellen, bei der kein so hoher Integrationsgrad zwischen den Prozessstufen der Brenngaserzeugung und der Brennstoffzelle möglich ist, wie im MIMEMIZ-System. Auf nationaler Ebene sind umfangreiche Untersuchungen zu mikrostrukturierten Reformern vor allem von den folgenden Institutionen bekannt: Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH IMM, Forschungszentrum Karlsruhe FZKA, TU München und ZAE Bayern. Im internationalen Umfeld sind insbesondere Arbeiten von der Lehigh University Bethlehem, von PNNL und vom Laboratory of Chemical Reaction Engineering Lausanne bekannt.

3.3. Erzieltes Ergebnis

3.3.1. Entwicklung der Reformerbleche

Hauptziel war bei der Reformerentwicklung war das Erarbeiten eines Wärmeübertragerkonzeptes, das durch eine katalytische Beschichtung auch die Funktion eines Reaktors abbilden kann.

Die Konzeption der Geometrie für den Dampfreformer und der Systemkomponenten wurde unter Berücksichtigung einiger Randbedingungen durchgeführt, die im Folgenden dargelegt werden. Bei der Entwicklung eines Reaktors für eine Dampfreformierung von Methanol, deren Wärmebedarf laut Systemsimulation von einer katalytischen Verbrennung gedeckt werden soll, wurde der Mikrokanalreaktor, vor allem aufgrund der guten Wärmeübertragung und kompakten Bauform, als geeigneter Reaktortyp ausgewählt. Zudem lässt sich ein solcher Reaktor mit Hilfe des Hydroformings dünner Bleche herstellen, was die Grundlage für eine kostengünstige Fertigung ist. Aus der Anforderung eines möglichst hohen Integrationsgrades leitet sich die Vorstellung ab, die Systemkomponenten Verdampfer und Wärmeübertrager mit dem Reformer in ein Bauteil zu integrieren. Das Ziel war daher die Entwicklung eines Wärmeübertragers, der sich mit Hilfe des Hydroformings herstellen lässt, in dem sich neben der Reformierung auch die Verdampfung und die Wärmeübertragung zwischen zwei gasförmigen Prozessströmen realisieren lässt und in dem alle Prozessströme intern geführt werden können. Zudem musste eine kompakte Integration mit der HT-PEM Brennstoffzelle möglich sein. Da die Geometrie der Bipolarplatten schon vor Beginn der Auslegungsarbeiten des Reformers feststand, sind die Grundfläche und die Schnittstelle der Anschlüsse vordefiniert. Die Brennstoffzelle wird durch Stapeln der einzelnen Komponenten mit einem anschließenden Verspannen mit Hilfe von Endplatten aufgebaut. Um die Integration des Mikrobrennstoffzellengesamtsystems zu vereinfachen, wurde auch für die Brenngaserzeugung als Fügekonzept das Stapeln und Verspannen von Einzelblechen vorgesehen. Hierfür musste ein geeignetes Dichtungskonzept entwickelt werden. Die Schritte zur Entwicklung des Basisbleches werden im Folgenden zusammengefasst. Daraufhin wird das Prinzip für die Integration aller Prozessstufen vorgestellt.

Ausgehend von der für die Brennstoffzelle vordefinierten rechteckigen Grundfläche der Kanalstruktur musste im ersten Schritt die Dimensionierung der Kanäle vorgenommen werden bzw. die notwendige Kanalanzahl bestimmt werden. Die Kanalhöhe wurde aus den Randbedingungen des Hydroforming-Prozesses und des angestrebten Dichtungsmaterials abgeleitet. Die Kanäle können zu beiden Seiten mit je maximal 0,5 mm aus der Blechebene ausgeformt werden, wodurch sich eine maximale Kanalhöhe von 1 mm

ergibt. Abbildung 3-1 zeigt das entwickelte Werkzeug zur Herstellung von Reform-, Brenner- und Wärmetauscherblechen.



Abbildung 3-1 **Werkzeug zur Herstellung der Reformbleche**

Für die Dichtungen wurde expandierte Graphitplatten verwendet, die als Massenware (wichtige Anforderung hinsichtlich der Kosten) in einer Dicke von 0,8 mm erhältlich sind. Wegen der praktischen Umsetzbarkeit wurde die Kanalhöhe daher durch Ausformen von 0,4 mm zu beiden Seiten auf 0,8 mm festgelegt. Die bei der festgelegten Kanalhöhe minimal mögliche Kanalbreite ergibt sich aus den Umformparametern des eingesetzten Edelstahlbleches für die Dicke des Bleches von 0,1 mm. Unter Einbeziehung der Randbedingungen des Hydroforming-Prozesses, der Grundfläche der Kanalstruktur und der praktikablen Kanalhöhe wurde in Zusammenarbeit mit der Firma borit Leichtbau-Technik GmbH eine Kanalanzahl von 12 festgelegt. Die Kanäle wurden wegen der besseren Umformbarkeit mit dem Querschnitt einer Sinuswelle gefertigt.

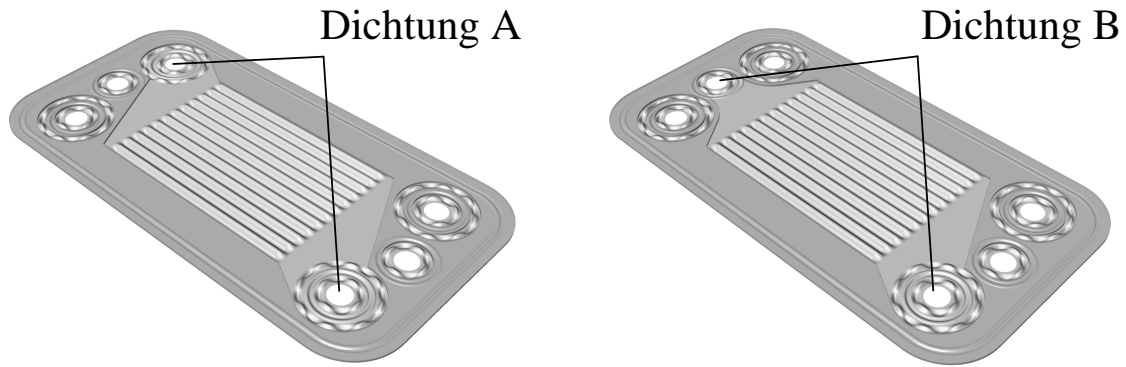


Abbildung 3-2 Design des Wärmeübertragers für das Mikrobrennstoffzellensystem mit 12 Kanälen und 2 unterschiedlichen Dichtungen (Typ A und B) zur Verwendung unterschiedlicher Ein- und Auslassbohrungen

Abbildung 3-2 zeigt das Wärmeübertragerblech inklusive aufgelegter Dichtung. Neben dem Strömungsfeld mit den wellenförmigen Kanälen können bis zu drei Bohrungen eingebracht werden. Mit Hilfe der Dichtungsform wird pro Seite eine Bohrung für das Ein- und Ausströmen des Mediums ausgewählt. Dabei besteht für die Durchströmung der Kanäle die Möglichkeit entweder mit Dichtung A Bohrungen zu verwenden, die in der Diagonale der Grundfläche liegen, oder mit Dichtung B eine Durchströmung durch eine der auf der Diagonale liegenden und eine der mittleren Bohrungen zu realisieren. Die dritte Möglichkeit, nämlich die beiden mittleren Bohrungen für Ein- und Auslass zu verwenden, kommt im realisierten Brenngaserzeuger nicht vor, ist aber grundsätzlich als weitere Option der internen Strömungsführung denkbar. Neben dem gezielten Auswählen bestimmter Ein- und Auslassbohrungen kommt den Dichtungen auch die Ausbildung eines geeigneten Strömungsfeldes für die Zu- und Abführung eines Mediums zu den Kanälen zu. Die Gleichmäßigkeit der Durchströmung der Kanäle hängt dabei wesentlich von der Form des Ein- und Auslasses ab. Zur Ermittlung der passenden Dichtungsgeometrie wurden CFD-Simulationen mit Ansys CFX durchgeführt (Abbildung 3-3). Die simulierten Einläufe sind trichterförmig ausgeformt, wobei sich der Trichter linear über Breite des Strömungsfeldes so verjüngt, dass er an der verlängerten Mittelachse des in Strömungsrichtung gesehen letzten Kanals noch $1/12$ seiner Ursprungsbreite aufweist. Die Berechnungen erfolgten isotherm ohne Berücksichtigung der Reaktionen. Dabei wurde ein Tetraeder-Gitter (bedingt durch die komplexe Geometrie im Einlassbereich) mit zunächst 3 Millionen Zellen eingesetzt. Gitterstudien zeigten allerdings, dass sich die Zellenzahl ohne signifikante Änderung der Lösung auf 1,1 Millionen Zellen reduzieren lässt, so dass die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse mit der genannten Zellenzahl generiert wurden. Als Randbedingung wurde die Rauigkeit des Bleches

und der Dichtungen vorgegeben. Einlassseitig wurden die Temperatur und der Massenstrom als Parameter gesetzt. Auslassseitig war die Bedingung das Erreichen des Umgebungsdrucks. Als Diskretisierungsschema wurde „high-resolution“ gewählt. Aufgrund der geringen Reynolds-Zahlen wurde Turbulenz nicht betrachtet. Ansys CFX benutzt kein Druckkorrekturverfahren, sondern löst die gekoppelten Impuls- und Kontinuitätsgleichungen, was zu einer robusten Lösung bei schneller Konvergenz führt. Ein Relaxationsfaktor wurde nicht verwendet, da alle Gleichungen in kurzer Zeit konvergierten.

Die CFD-Simulationen zeigen, dass insbesondere der Bereich der Dichtung, der die Ein- bzw. Auslassbohrung direkt umschließt für die Strömungsverteilung von besonderer Bedeutung ist. Bei einem zu kleinen Öffnungswinkel der die Ein- und Auslassbohrung direkt umgebenden Dichtung zu Beginn des trichterförmigen Einlaufs kann es zu einer Unterversorgung der äußeren Kanäle oder sogar Rückströmungen kommen. Die Ergebnisse einer Strömungssimulation für die optimierte Dichtungsform für Dichtung A sind in Abbildung 3-3 dargestellt. Dabei wurde ein Volumenstrom von 0,15 slm pro durchströmter Ebene und eine Temperatur von 280 °C angenommen. Es zeigt sich eine leichte Unterversorgung von Kanal 1, wobei Rückströmungen mit diesem Design vollständig vermieden werden können. Die gesamten Berechnungen ergaben, dass eine leichte Ungleichverteilung bei der diagonalen Durchströmung in Kauf genommen werden muss. Sie deuten außerdem daraufhin, dass die Strömungsverteilung bei Dichtung B ungünstiger ist als bei Dichtung A. Bei der Auslegung der integrierten Brenngaserzeugung muss daher die Anzahl der Prozesse, in denen eine nicht-diagonale Durchströmung erforderlich ist, minimiert werden. Insgesamt muss das nicht-ideale Strömungsfeld von Dichtung B zu Gunsten der Realisierbarkeit einer komponenteninternen Strömungsführung und zu Gunsten der Kompaktheit des Systems in Kauf genommen werden.

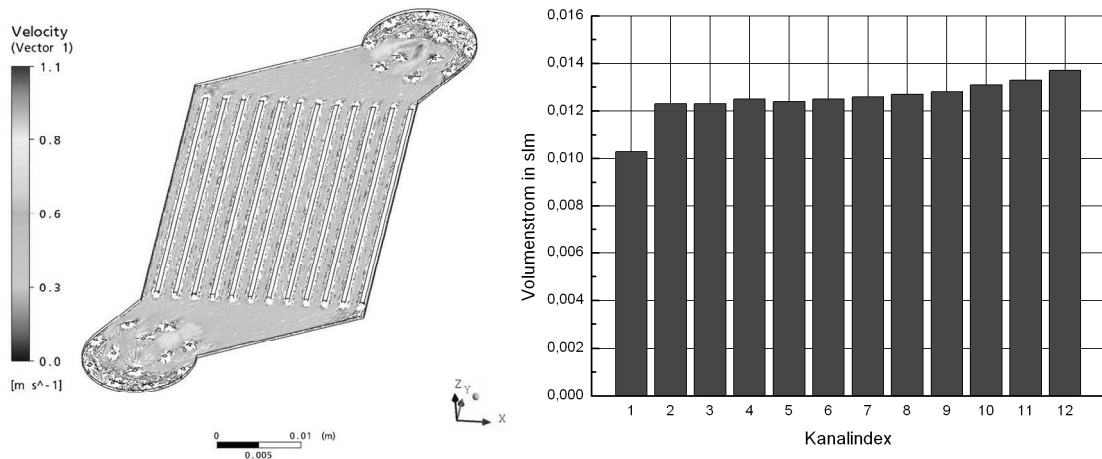


Abbildung 3-3 Berechnete Verteilung der Volumenströme über den Einzelkanälen des Wärmeübertragers (Dichtung A)

Neben der Auswahl der Strömungsform in der Wärmeübertragerblechebene durch aktives Öffnen und Verschließen bestimmter Bohrungen für eine Prozessstufe besteht für die vertikale Strömungsführung in einem Plattenstapel noch die Möglichkeit, nur an bestimmten Stellen Bohrungen einzubringen und somit einen sich durch Stapeln vertikal ausgebildeten Strömungskanal zu verschließen. Da bei insgesamt 6 maximal möglichen Bohrungen eine Vielzahl an Lochmustern entstehen kann, ergibt sich hier eine hohe Anzahl an Möglichkeiten Medien zu führen. Das definierte Einströmen wird also einerseits durch Ausführung oder Weglassen einer Bohrung und andererseits durch definiertes Einlegen einer der Dichtungstypen bestimmt. Beide vorgestellten Prinzipien werden angewendet, um den Brenngaserzeuger mit allen Prozessstufen in ein Bauteil zu integrieren. Die Dichtungen werden aus Graphit, das in oxidierender Atmosphäre bis 400 °C stabil ist, gestanzt. Die Dichtungen A und B übernehmen dabei vor allem die Abdichtung gegenüber der Umgebung. Zur Absicherung der internen Dichtigkeit werden in die Bohrung, die nicht zur Einströmung in eine Blechebene verwendet werden, Ringe aus Graphit eingelegt.

Die aus Systemsimulationen abgeleitete Systemverschaltung wird mit Hilfe des Wärmeübertragerkonzeptes in einem thermisch integrierten Brenngaserzeuger umgesetzt, der sich direkt an die Brennstoffzelle ankoppeln lässt. Abbildung 3-4 zeigt das Konzept, wobei jede Prozessstufe durch eine Strömungsebene angedeutet ist. Tatsächlich werden für alle Prozesse mehrere Strömungsebenen benötigt.

3. Entwicklung und Test eines Mikroreformers

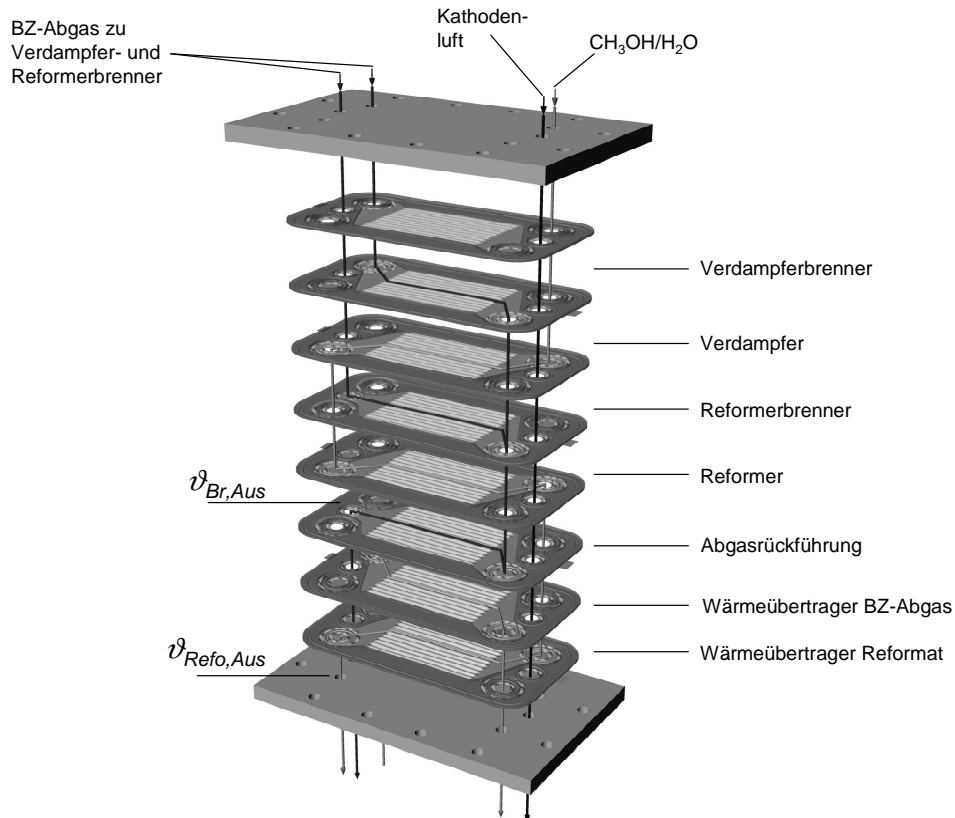


Abbildung 3-4 Darstellung des Konzeptes zur Integration der Systemkomponenten Verdampferbrenner, Verdampfer, Reformerbrenner, Reformer, Abgasrückführung und Wärmeübertrager in ein Bauteil

In der obersten Stufe, dem Verdampferbrenner, reagiert Brennstoffzellenabgas an der katalytisch beschichteten Oberfläche und überträgt die freiwerdende Wärme in den Verdampfungsraum. Das zugeführte Methanol-Wasser-Gemisch wird durch die Verdampferbrenner-Stufe hindurch durch Offenlassen des Einlasses in der Diagonale der Grundfläche dem Strömungsraum unter dem katalytischen Brenner zugeführt, wo eine Verdampfung im Gegenstrom stattfindet. Der erzeugte Dampf wird durch die nächste Stufe (Reformerbrenner) hindurch dem mit Reformerkatalysator beschichteten Strömungsraum zugeführt, in den wiederum Wärme aus einem Verbrennungsprozess übertragen wird. Das hierfür benötigte Brennstoffzellenabgas wird durch den sich entlang der mittleren Bohrungen ergebenden Strömungskanal durch die ersten Prozessstufen hindurch geführt und durch gezieltes Öffnen des Einlasses zum Reformerbrenner geleitet. Die Abgasströme vom Reformer- und Verdampferbrenner werden gemischt und werden, um über einen freien Kanal nach außen zu strömen, durch die hier als Abgasrückführungsstufe bezeichnete Strömungsebene entgegen der Strömungsrichtung der Brenner auf eine mittlere Bohrung zurückgeführt. Diese Prozessstufe erfüllt aus wärmetechnischer Sicht keinerlei Zweck und kommt daher auch in der Systemauslegung nicht

vor. Es handelt sich vielmehr um einen Kompromiss bei der technischen Realisierung des Brenngaserzeugers. Um alle Medien des Systems ohne Abgasrückführungsstufe zu führen, wären bei der Auslegung des Wärmeübertragers vier Bohrungen pro Seite notwendig, was allerdings zu einer erheblichen Verbreiterung des Bleches führt und daher im Hinblick auf die Integration mit der Brennstoffzelle nicht zielführend ist. Das Brennerabgas wird im mittleren Strömungskanal durch den sich anschließenden Brennstoffzellenabgas/Reformat-Wärmeübertrager hindurch nach außen geführt. Das Reformat überträgt Wärme an das dem Brenngaserzeuger zugeführte Brennstoffzellenabgas. Dieses wird nach Verlassen des Brenngaserzeugers zurück zu den Einlässen für die beiden Brenner auf der Oberseite des Bauteils geführt. Der gesamte Brenngaserzeuger wird mit Hilfe von verschraubten Endplatten verspannt. Diese dienen im Rahmen der Untersuchungen auch als Aufnahme für die Temperatursensoren, die durch seitliche Bohrungen in die Auslässe eingebracht werden. Zur Überwachung des Prozesses wird dabei hauptsächlich die Abgastemperatur $\vartheta_{Br,Aus}$ verwendet, da diese sich in größter räumlicher Nähe zum Reformer befindet und somit die wichtigste Bewertungsgröße ist. Die Temperatur des Reformates $\vartheta_{Refo,Aus}$ als relevante Größe für die Kopplung mit der Brennstoffzelle wird im Auslass der unteren Endplatte gemessen.

3.3.2. Dauerversuche

Im Rahmen der Untersuchungen zur Dampfreformierung wurden drei verschiedene kommerziell erhältliche Katalysatoren in Betracht gezogen. Bei einem der Katalysatoren handelte es sich um einen kupferbasierten Katalysator. Die beiden anderen waren Edelmetallkatalysatoren. Die Untersuchungen mit dem Kupferkatalysator konnten nur in einem Festbettreaktor durchgeführt werden, der für die Anwendung keine Relevanz besitzt. Die Beschichtung des Wärmeübertragers war nicht stabil und wies bereits nach der Inbetriebnahme signifikante Fehlstellen auf, so dass dieser Katalysator für eine Verwendung im System nicht in Betracht gezogen werden konnte. Einer der beiden Edelmetallkatalysatoren zeigte zwar eine deutlich bessere Stabilität, konnte jedoch im Versuch bei der Reformatqualität nicht überzeugen. Der zweite Edelmetallkatalysator zeigte in allen Belangen ein sehr zufriedenstellendes Ergebnis und wurde daher auch für die Systemversuche ausgewählt. Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Brenngaserzeuger unter Verwendung dieses Katalysators werden im Folgenden zusammengefasst. Hinsichtlich der Stabilität und Haltbarkeit kann man nach Abschluss der Untersuchungen mit den beschichteten Reformerblechen ein positives Resümee ziehen. Die Beschichtungen sowohl im Brenner als auch im Reformer zeigten nach der Demontage keine Ablösung und waren auch nach ca. 130 h Betrieb und 15 Kaltstarts noch stabil (Abbildung 3-5). Es gibt partielle Ablösungen auf den Kanaloberseiten

(durch Pressung an der Kontaktstelle), die jedoch nicht zur Rissbildung auf der aktiven Kanalfäche führten.

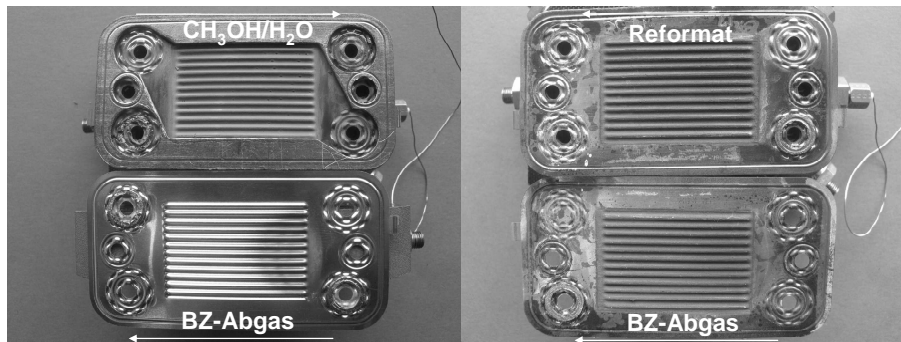


Abbildung 3-5 (Links) Zustand der Brennerbeschichtung in der Verdampfer/Brennereinheit nach 130 h und 15 Kaltstarts, (rechts) Zustand der Reformerbeschichtung in der Reformer/Brenner-einheit nach 130 h und 15 Kaltstarts

Die Leistung des Reformers ist auch nach mehreren Montage- und Demontagevorgängen mit den gleichen Blechen reproduzierbar. Dies ist ein weiterer Hinweis auf eine hervorragende Stabilität und Haltbarkeit der Beschichtungen. Im Hinblick auf den Einsatz im Gesamtsystem wurden neben der Stabilität auch die Leistungsfähigkeit bezüglich Brennstoffumsatz und CO-Gehalt des Reformates unter variierenden Prozessbedingungen geprüft. Anhand dieser Untersuchungen wurde das entwickelte Konzept verifiziert und die technische Machbarkeit eines hochintegrierten Brenngaserzeugersystems basierend auf umgeformten Blechen gezeigt. Die für die Kopplung mit einer Brennstoffzelle des Typs HT-PEM geeigneten Betriebspunkte des Systems wurden identifiziert. Hierfür wurden die in den unterschiedlichen Betriebspunkten gemessenen Reformatkonzentrationen anhand von zwei Kriterien geprüft. Das erste Kriterium war das Verhältnis aus feuchten Wasserstoff (H_2) – und CO-Konzentrationen. Das zweite Kriterium war die feuchte CO-Konzentration. Die Grenzwerte für beide Kriterien richten sich nach der Arbeitstemperatur der Brennstoffzelle, wobei im Rahmen der Untersuchungen Temperaturen zwischen 160 °C und 180 °C in Betracht gezogen wurden. Der Betriebspunkt des Reformers lässt sich durch die thermische Leistung P_{th} und das sogenannte Wasserdampf-Kohlenstoff-Verhältnis SCR beschreiben. Die Temperatur des Reaktors wird, aufgrund der Wärmezufuhr im Wärmeübertrager, maßgeblich vom Arbeitspunkt des katalytischen Brenners bestimmt. Da der katalytische Brenner wiederum vollständig mit dem Abgas der Brennstoffzelle versorgt wird, ist also die Temperatur des Reformers im Gesamtsystem abhängig vom Betriebspunkt der Brennstoffzelle. Zur Untersuchung der Brenngaserzeugung wurde die Brennstoffzelle durch eine beheizte

Gasmischstrecke simuliert. Die Zusammensetzung des dem Verdampfer- und dem Reformerbrenner zugeführten Brenngases wurde anhand der Brennstoffzellenbetriebsparameter Wasserstoffumsatz Brennstoffzelle U_{H_2} und Luftzahl System $\lambda_{O_2, Sys}$ als Kennzahl für den der Kathode zugeführten Luftvolumenstrom berechnet. Ein hoher Wasserstoffumsatz in der Brennstoffzelle führt dazu, dass den Brennern weniger Heizwert zugeführt wird und demzufolge die Reformertemperatur absinkt. Hohe Luftzahlen bewirken ebenfalls ein Absinken der Reformertemperatur, allerdings zeigen die Untersuchungen, dass die Luftzahlen im für das System relevanten Wertebereich keinen großen Einfluss auf die Reformertemperatur und somit auch auf den Brennstoffumsatz und die Reformatkonzentrationen haben, so dass eine Auftragung über dem Parameter U_{H_2} als Haupteinflussgröße sinnvoll ist.

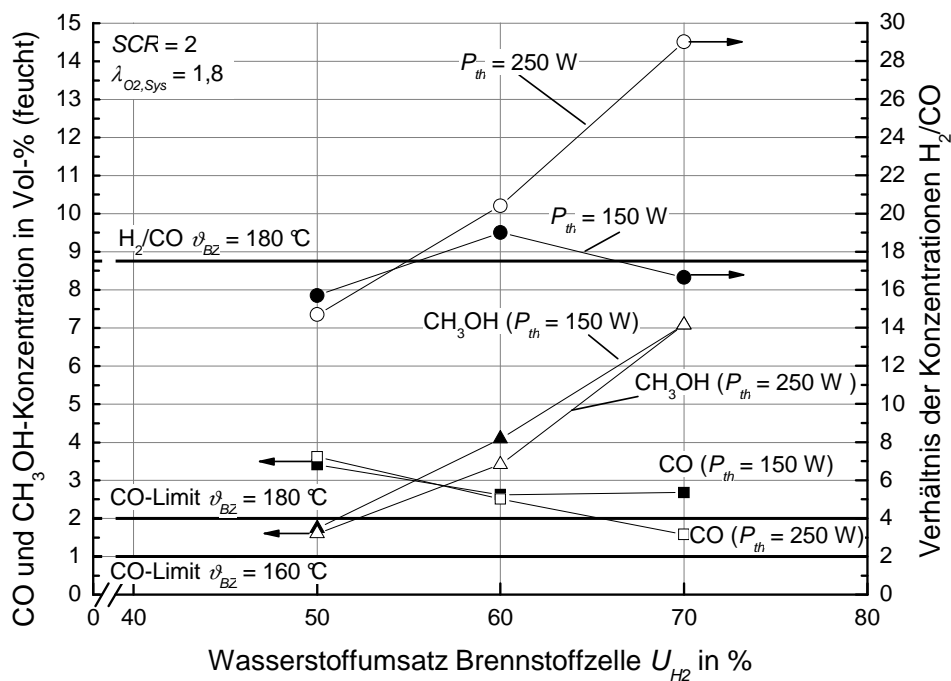


Abbildung 3-6 Aus Messwerten der trockenen Reformatkonzentrationen und der gemessenen Summe der Restkohlenwasserstoffe berechnete feuchte Reformatkonzentrationen mit dem Verhältnis aus H₂ und CO-Konzentrationen und der Einordnung in die Grenzwerte für die HT-PEM ($SCR = 2$, $\lambda_{O_2, S} = 1,8$)

Abbildung 3-6 zeigt die für eine Kopplung mit der Brennstoffzelle relevanten feuchten Konzentrationen an CO und Methanol im Reformat sowie das aus den Messwerten berechnete Verhältnis der H₂- und CO-Konzentration. Deutlich erkennbar ist die Abhän-

gigkeit der CO-Konzentration vom simulierten Wasserstoffumsatz der Brennstoffzelle U_{H_2} und somit von der Betriebstemperatur. Bei großen Wasserstoffumsätzen sinkt die Reaktionstemperatur und die CO-Konzentration im Reformat, was auf die Wassergas-Shift-Reaktion zurückzuführen ist, deren chemisches Gleichgewicht sich bei niedrigeren Temperaturen zu niedrigeren CO-Konzentrationen hin verschiebt. Auffällig bei den Untersuchungen ist die eindeutige Abhängigkeit der CO-Konzentration von der Aufenthaltszeit der Reaktanden im Reaktor (gekennzeichnet durch den Lastwechsel von $150 W_{th}$ auf $250 W_{th}$). Eine geringere Aufenthaltszeit bei $150 W_{th}$ fördert die CO-Bildung und verringert die Abhängigkeit der CO-Bildung von der Reaktionstemperatur. Der Brennstoffumsatz (erkennbar an der Methanolkonzentration im Reformat) bleibt bei beiden Leistungspunkten etwa gleich. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der Reaktor in der untersuchten Konfiguration mit 4 durchströmten Ebenen für eine Leistung von $150 W_{th}$ überdimensioniert ist. Insgesamt lässt sich beobachten, dass das Verhältnis der H_2 - und CO-Konzentration bei $250 W_{th}$ deutlich günstiger ist, so dass man von einer deutlich besseren Wasserstoffausbeute bei niedrigeren CO-Gehalten sprechen kann. Die gute Ausbeute beim „Überfahren“ des Reaktors lässt sich mit dem in den Kanälen bei großen Volumenströmen deutlich verbesserten Wärmeübergang erklären. Die verstärkte CO-Bildung bei einem Überangebot an aktiver Fläche ist ein Indiz dafür, dass die Wassergas-Shift-Reaktion bei einer Überdimensionierung des Reaktors bei den eingestellten Reaktionstemperaturen zwischen 200 °C und 300 °C auch in eine ungünstige Richtung ablaufen kann.

Für die Kopplung mit der Brennstoffzelle lässt sich folgern, dass bei Leistungen über $150 W_{th}$ und $SCR = 2$ geeignete Betriebspunkte bei Wasserstoffumsätzen zwischen 60 % und 70 % zu finden sind, was Abgastemperaturen $\vartheta_{Br,aus}$ kleiner als 260 °C entspricht. Die Brennstoffumsätze im Reformer liegen in diesen Betriebspunkten zwischen 70 % und 85 %. Das im Reformat enthaltene Methanol wird von der Brennstoffzelle bei entsprechender Betriebstemperatur toleriert und in den katalytischen Brennern zur Schließung der Energiebilanz umgesetzt. Bei der Regelung des Gesamtsystems wird die Abgastemperatur durch Beeinflussung des Wasserstoffumsatzes in der Brennstoffzelle eingestellt.

Das Auffinden des Betriebsfensters zwischen Reformer und Brennstoffzelle spricht eindeutig dafür, dass eine Shift-Stufe nicht zwangsläufig in das System integriert werden muss. Trotz dieses Ergebnisses wurden Versuche mit einer Shift-Stufe im Brenngasergezeuger als mögliche Option zur Leistungsoptimierung durchgeführt. Technisch wurde dies durch eine reformatseitige Beschichtung des Wärmeübertragers im System, der mit Hilfe des Brennstoffzellenabgases für eine Wärmeabfuhr aus dem Reformatstrom sorgt und diesen an die Temperatur der Brennstoffzelle annähert, umgesetzt. Dies ist deswegen als vielversprechend anzusehen, weil sich über der Fläche des Wärmeü-

bertragers, aufgrund der Gegenstromführung, zwangsläufig ein Temperaturprofil zwischen ca. 300 °C am Eintritt (in Strömungsrichtung des Reformats gesehen) und ca. 200 °C am Austritt ergeben muss, was für die leicht exotherme WGS ideal ist, da sich am Reaktoreintritt eine für die Reaktionskinetik günstige und am Reaktoraustritt eine für das chemische Gleichgewicht günstige Temperatur einstellt. Die Untersuchungsergebnisse waren zunächst vielversprechend, da geringere trockene Volumenkonzentrationen von 1,7 Vol-% CO im Reformat aufgefunden wurden. Die Leistungsfähigkeit des Reaktors nahm allerdings so rapide ab, dass ein Einsatz des getesteten Katalysators im System nicht zielführend wäre. Er ist aufgrund der zuvor geschilderten Ergebnisse nicht zwingend erforderlich. Die schnelle Abnahme der Performance wurde hier durch eine Ablösung der Beschichtung verursacht.

3.4. Zusammenfassung

Im Rahmen der Reformerentwicklung wurde ein Dampfreformer für Methanol aufgebaut und erfolgreich getestet. Dabei wurden sowohl kupferbasierte als auch ein edelmetallbasierte Katalysatoren getestet. Im System wurde ein edelmetallbasierter Katalysator eingesetzt, da der kupferbasierte Katalysator eine unzureichende Stabilität der Beschichtung aufwies. Beim edelmetallbasierten Katalysator waren die Beschichtungen sowohl im Brenner als auch im Reformer auch nach ca. 130 Betriebsstunden und 15 Kaltstarts noch stabil. So konnte ein umfangreiches Versuchsprogramm zur Charakterisierung des Katalysators und der Brenngaserzeugung durchgeführt werden. Bei Leistungen über 150 W_{th} und $SCR = 2$ lassen sich geeignete Betriebspunkte bei Wasserstoffumsätzen zwischen 60 % und 70 % einstellen. Dafür ist der Betrieb der Brennstoffzelle bei einer Temperatur von 180 °C notwendig. Der Edelmetallkatalysator erreichte durch den verbesserten Wärmeübergang im Reaktor auch bei Raumgeschwindigkeiten, die das Dreifache des Auslegungspunktes betragen, noch Brennstoffumsätze über 90 % [Wichma. 10].

Die Arbeiten konnten trotz Verzögerungen wegen der Katalysatorverfügbarkeiten mit großem Erfolg abgeschlossen werden. Es ist gelungen, einen kompakten und robusten Reformer auf Basis des Hydroforming-Fertigungsprozesses zu entwickeln, der sich mit einer Brennstoffzelle integrieren lässt.

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

4.1. Aufgabenstellung und Ziele

Nach der erfolgreichen Entwicklung einer Mikrobrennstoffzelle und eines Mikroreformers war das Ziel, ein integriertes und kompaktes Gesamtsystem zu entwickeln, welches eine elektrische Leistung von 30 W aufweist und als Hybridsystem mit einem Lithium-Ionen-Akkumulator die Energieversorgung eines Golf-Caddy gewährleisten soll. Teil der Entwicklung des Gesamtsystems war die thermodynamische Auslegung und die Schnittstellendefinition zwischen Brennstoffzelle und Reformers. Das Gesamtsystem sollte getestet und in mehreren Stufen optimiert werden. Nachdem die technische und wirtschaftliche Machbarkeit gezeigt wurde, sollte eine Handfertigung aufgebaut werden, so dass Brennstoffzellensysteme für die Caddy-Anwendung produziert werden können.

4.2. Stand der Technik

Bei den bereits auf dem Markt verfügbaren Systemen muss zwischen Direktmethanolbrennstoffzellen (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC) und Systemen mit vorgeschalteter Reformierung (Reformed Methanol Fuel Cell – RMFC).

DMFC-Systeme stehen in Konkurrenz zu den RMFC-Systemen. In diesem Bereich ist die Firma SFC Smart Fuel Cell mit einer breiten Palette an Produkten in unterschiedlichen Leistungsbereichen, vor allem für Freizeitwendungen, etabliert. Ein Produkt, das System Jenny 600S-BZ, ist mit einer elektrischen Leistung von 25 W speziell für den militärischen Markt entwickelt worden. Im hier relevanten Leistungsbereich $< 50 W_{el}$ sind bei SFC zudem noch Systeme aus der EFOY-Serie, das EFOY 600 und 900, vor allem für Freizeitwendungen erhältlich. Die genannten Systeme werden, abgesehen vom Betrieb in Wüsten, mit reinem Methanol betrieben. RMFC-Systeme erfordern die Beimischung von Wasser. Die hier betrachteten EFOY-Systeme kosten zwischen 2200 € und 2500 €.

Die Firma UltraCell Corporation bietet Mikrobrennstoffzellengeräte auf RMFC-Basis an. Mit zwei unterschiedlichen Geräten kann man elektrische Leistungen von 25 W und 40 W abdecken. Die Systeme sind für den militärischen Sektor bestimmt und sind nicht für den zivilen Einsatz konzipiert. Die Systeme erreichen Leistungsdichten von 20,16 W/kg (System XX25) und 34,75 W/kg (System XX55). Der Preis für das 25 W – System liegt bei ca. 3000 €. Das 40 W – System kostet bereits 6700 €.

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

Beide Firmen befanden sich zu Projektbeginn in einer frühen Phase der Kommerzialisierung, sind aber inzwischen im Markt etabliert. Zu diesem Zeitpunkt war von Seiten der Firma Casio die Markteinführung eines Brennstoffzellensystems mit einer elektrischen Leistung von 20 W für 2007 angekündigt [Casio 06]. Informationen über einen erfolgreichen Abschluss dieses Prozesses liegen dem OWI bis zum heutigen Tage nicht vor. Gleiches gilt für die Entwicklung eines RMFC-Systems der Motorola Labs [Motoro. 05]. Tabelle 4-1 stellt die genannten Systeme gegenüber.

Hersteller	SFC Smart Fuel Cell	SFC Smart Fuel Cell	SFC Smart Fuel Cell	UltraCell	UltraCell
System	JENNY 600S-BZ	EFOY 600	EFOY 900	XX25	XX55
Elektrische Leistung	25 W	25 W	38 W	25 W	40 W
Volumen inkl. Tank	3,19 l	29 l	29 l	2 l	5 l
Tankvolumen	0,35 l	5 l	5 l	0,5 l	0,5 l
Energieinhalt pro Tankfüllung (elektrischer Nettowirkungsgrad berücksichtigt)	400 Wh	5555 Wh	5555 Wh	180 Wh	200 Wh
Gravimetrische Leistungsdichte ohne Tank	14,7 W/kg	4,17 W/kg	6,13 W/kg	20,16 W/kg	34,375 W/kg
Volumetrische Energiedichte (Energieerzeugung zu Tankvolumen)	1143 Wh/l	1111 Wh/l	1111 Wh/l	360 Wh/l	400 Wh/l
Laufzeit pro Tankfüllung	16 h bei 25 W	220 h bei 25 W	145 h bei 38 W	9 h bei 20 W	5 h bei 40 W
Gewicht ohne Tank	1,7 kg	6 kg	6,2 kg	1,24 kg	1,6 kg
Abmessungen (LxBxH) - ohne Batterie - ohne Tank	25,2 x 17,1 x 7,4 cm	43,5 x 20 x 27,6 cm	43,5 x 20 x 27,6 cm	23 x 15 x 4,3 cm	27,2 x 20,8 x 8,1 cm
Preis	ubekannt	ca. 2200 €	2.500 €	ca. 3000 €	6.700 €
Einsatzbereich	ausschließlich Militär	Freizeitwendungen	Freizeitwendungen	Militär	Militär

Tabelle 4-1 Vergleich von kommerziell verfügbaren Methanolbrennstoffzellen im Leistungsbereich < 50 W_{el}

Bei dem im Rahmen des Projektes MIMEMIZ entwickelten System handelt es sich definitionsgemäß um eine RMFC. Es konkurriert aufgrund des gleichen Brennstoffs und ähnlichen Anwendungen mit den zuvor beschriebenen RMFC- und DMFC-Systemen, deren grundlegende Eigenschaften Tabelle 4-1 zusammengefasst sind.

Beim Vergleich der gravimetrischen Leistungsdichte zeigt sich, dass die RMFC-Systeme gegenüber den DMFC-Systemen deutlich im Vorteil sind. Sie lassen sich deutlich kompakter und leichter bauen. Ein fairer Vergleich ist hier zwischen dem DMFC-basierten Jenny-System von SFC und den Ultracell-Systemen möglich, da beide Systeme auf den militärischen Markt ausgerichtet sind, bei dem für Kompaktheit und Gewicht Abstriche bei den Kosten in Kauf genommen werden können. Vergleicht man die Systeme im Hinblick auf den Freizeitmarkt, kann man aus der Aufstellung in Tabelle 4-1 ableiten, dass DMFC-Systeme in einem vergleichbaren Kostenrahmen deutlich größer und schwerer gegenüber RMFC-Systemen ausfallen. Allerdings ergibt sich aus der Re-

cherche, dass DMFC-Systeme eine bessere Energiedichte aufweisen, da sie nicht auf eine Wasserbeimischung angewiesen sind. Eine Ausnahme ist laut SFC-Homepage z. B. der Betrieb in Wüsten (meist militärische Anwendungen). In warmen Umgebungen ist auch bei der DMFC eine Wasserbeimischung notwendig, so dass sich hier der genannte Vorteil relativiert. Zusammenfassend kann man sagen, dass RMFC-Systeme überall dort Sinn machen, wo wenig Bauraum für das Gesamtsystem zur Verfügung steht. Dies ist zum Beispiel bei der mit dem MIMEMIZ-System angestrebten Golf-Caddy Anwendung der Fall und lässt sich für den Bereich kleiner mobiler Geräte verallgemeinern. DMFCs sind sinnvoll einsetzbar, wenn der Bauraum keine Rolle spielt, dafür eine möglichst große Bevorratung erforderlich ist (Camping etc.). Wie am Beispiel beider im Markt befindlicher Firmen ersichtlich wird, gibt es für beide Systemtypen bereits einen Markt.

4.3. Erzielte Ergebnisse

4.3.1. Auslegung des Gesamtsystems

Im Rahmen der Systemauslegung wurde eine thermodynamische Betrachtung des Mikrobrennstoffzellensystems durchgeführt, um Potenziale zur Wärmeintegration zu identifizieren und eine möglichst optimale Verschaltung der Komponenten zu entwickeln. Das Mikrobrennstoffzellensystem besteht aus mehreren endothermen und exothermen Prozessstufen. Bei der Dampfreformierung und deren Eduktkonditionierung (Verdampfung und Überhitzung von Methanol und Wasser) liegt ein Wärmebedarf vor, während bei der Brennstoffzelle und der katalytischen Verbrennung von Brennstoffzellenabgas Wärme abgeführt werden muss. Die unterschiedlichen Temperaturniveaus der Prozesse machen zudem die thermische Konditionierung von Stoffströmen innerhalb des Systems notwendig. Um eine geeignete Systemverschaltung zu entwickeln, wurde zunächst eine Wärmeintegrationsanalyse durchgeführt, in die die obengenannten Prozesse einbezogen wurden. Das Ziel der Analyse war, diejenigen Prozesse zu ermitteln, die thermisch aneinander gekoppelt werden können, um den Wärmebedarf des Systems möglichst optimal zu decken. Neben einem möglichst hohen Maß an Wärmeintegration musste allerdings auch die Regelbarkeit des Systems sichergestellt werden. Des Weiteren musste eine hohe Systemkomplexität insbesondere im Hinblick auf die Leistungsdichte vermieden und die Anzahl an BoP-Komponenten minimiert werden. Aus den genannten Kriterien ergab sich ein Zielkonflikt, dessen Lösung anhand der Ergebnisse der Wärmeintegrationsanalyse entwickelt wurde.

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

Die für die Wärmeintegrationsanalyse notwendigen thermodynamischen Berechnungen wurden mit Matlab/Simulink[®] durchgeführt. Abbildung 4-1 zeigt ein vereinfachtes Schema der beteiligten Prozesse und die getroffenen Annahmen für die Prozesstemperaturen. Prozesse mit Wärmebedarf sind durch den Buchstaben H und Prozesse mit Wärmerfreisetzung bzw. Kühlungsbedarf durch den Buchstaben K gekennzeichnet. Vor dem Eintritt in den endothermen Dampfreformer (Prozess H2) werden die Edukte Wasser und Methanol vorgewärmt, verdampft und überhitzt (Prozess H1). Der Dampfreformer wurde im Rahmen der Simulation durch einen Gleichgewichtsreaktor abgebildet, der mit einem SCR von 1,5 betrieben wird. Mit dem Ziel, eine theoretische Kohlenmonoxidkonzentration von kleiner als 1 Vol-% als geeigneten Grenzwert für die HT-PEM Brennstoffzelle zu erhalten, wurde bei dem gewählten SCR eine isotherme Reaktionsführung bei 230 °C angenommen, was gemäß der Literaturrecherche ein realistisches Temperaturniveau ist. Die Brennstoffzelle wurde als isotherm bei einer Prozesstemperatur von 160 °C angenommen. Die erzeugte Wärme fließt als Prozess K2 mit in die Analyse ein. Das Reformat wird vor dem Eintritt in die HT-PEM Brennstoffzelle auf 160 °C abgekühlt (Prozess K1). Als Randbedingung für die Wärmeintegrationsanalyse wurde zu Grunde gelegt, dass die Kathodenluft vor Eintritt in die Brennstoffzelle auf 160 °C vorgewärmt wird (Prozess H3). Neben der Prozesswärme der Brennstoffzelle wurde die Möglichkeit der Einkopplung von Wärme durch die Kathodenabluft (Prozess K3) und die katalytische Verbrennung (Prozess K4) in das System betrachtet.

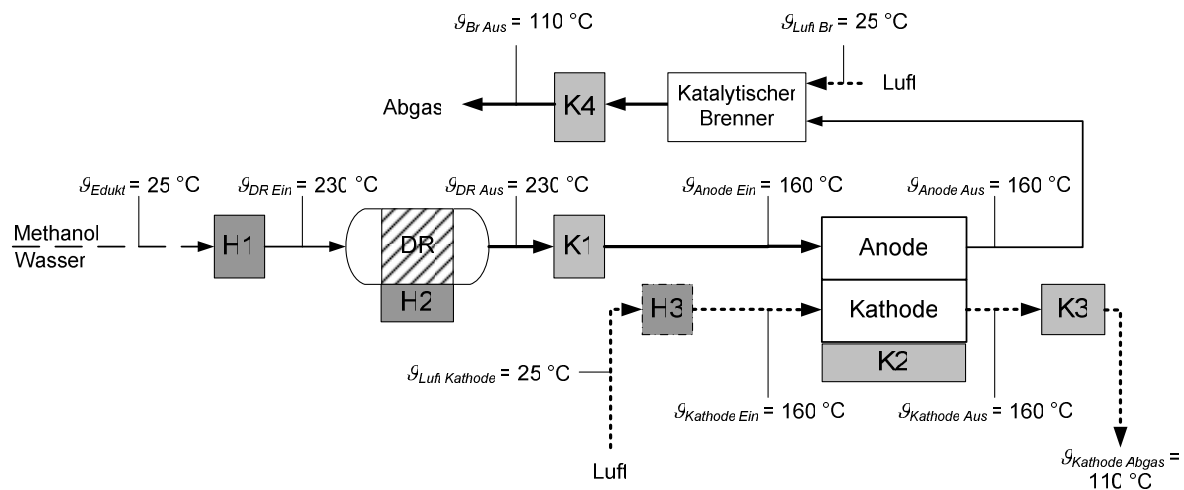


Abbildung 4-1 Vereinfachtes Schema der Prozessstufen mit Temperaturannahmen für die Wärmebedarfsbilanzierung

Die katalytische Verbrennung wurde als adiabat angenommen. Zudem wurde vorausgesetzt, dass die Reaktionen im Brenner und im Reformer das chemische Gleichgewicht erreichen. Die stöchiometrischen Verhältnisse auf der Anoden- und Kathodenseite

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

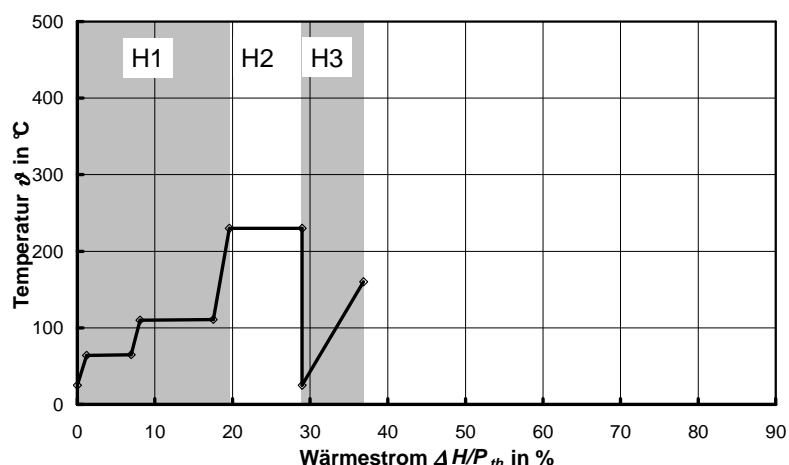
te, die im Folgenden definiert werden (Gl. 4.1 und Gl. 4.2), haben einen großen Einfluss auf den Wärmehaushalt des Systems und die Leistungsfähigkeit der Brennstoffzelle. Die Kathodenluftzahl $\lambda_{O_2,BZ}$ ist definiert als das Verhältnis des tatsächlich zugeführten Sauerstoffvolumenstroms zu dem stöchiometrischen Sauerstoffbedarf der Brennstoffzelle bezogen auf den elektrochemisch umgesetzten Wasserstoffvolumenstrom. Im Rahmen der Wärmeintegrationsanalyse wurde von einer Kathodenluftzahl von 1,8 ausgegangen (Gl. 4.1).

$$\lambda_{O_2,BZ} = \frac{\dot{n}_{O_2,BZ,Ein}}{(\dot{n}_{H_2,BZ,Ein} - \dot{n}_{H_2,BZ,Aus}) \cdot 0,5} \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Die Anodenstöchiometrie λ_{H_2} ist ein Faktor für den anodenseitigen Wasserstoffüberschuss (bei Membranbrennstoffzellen), wiederum bezogen auf den im aktuellen Lastpunkt elektrochemisch umgesetzten Wasserstoffvolumenstrom. Reziprok zur Anodenstöchiometrie wird auch häufig der Wasserstoffumsatz der Brennstoffzelle U_{H_2} in Prozent angegeben (Gl. 4.2). Für die Wärmeintegrationsanalyse wird ein Wasserstoffumsatz von 80 % vorausgesetzt ($\lambda_{H_2} = 1,25$).

$$U_{H_2} = \frac{1}{\lambda_{H_2}} = \frac{\dot{n}_{H_2,BZ,Ein} - \dot{n}_{H_2,BZ,Aus}}{\dot{n}_{H_2,BZ,Ein}} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

In einer realen Brennstoffzelle wird der Wasserstoffumsatz durch die Belastung der Brennstoffzelle eingestellt. Dies hat einen großen Einfluss auf den Wärmehaushalt eines Brennstoffzellensystems, da sich mit dem Umsatz in der Brennstoffzelle auch der Heizwert des Brennstoffzellenabgases ändert.



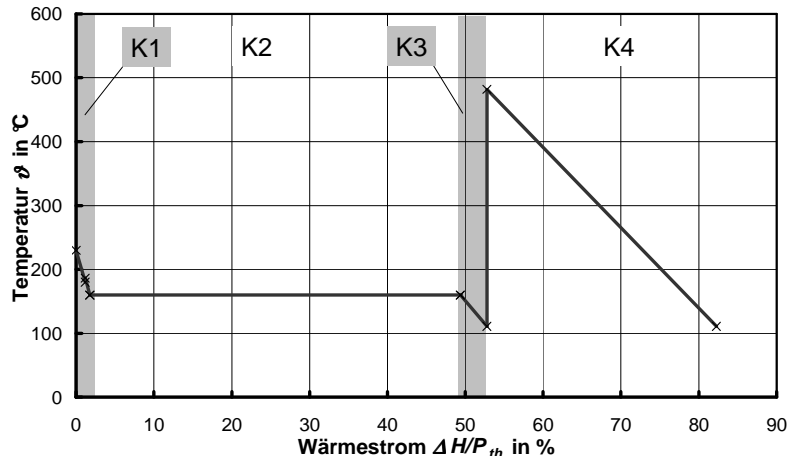


Abbildung 4-2 Profil des Wärmebedarfs und der Wärmefreisetzung in einem Prozess mit einer DR von Methanol und einer HT-PEM Brennstoffzelle

Abbildung 4-2 zeigt die Auswertung der Wärmeströme des in Abbildung 4-1 dargestellten vereinfachten Brennstoffzellensystems in $T, \Delta \dot{H}$ -Diagrammen. Die Enthalpieströme sind dabei auf die mit dem Brennstoff zugeführte thermische Energie bezogen. Die Abbildung verdeutlicht, dass für die Konditionierung von Methanol und Wasser für den Eintritt in den Dampfreformer (Vorwärmung, Verdampfung, Überhitzung) fast 20 % der zugeführten thermischen Energie aufgewendet werden müssen. Weitere 10 % sind für die Beheizung der Dampfreformierung notwendig. Um einen für die Wärmeübertragung in diese Prozesse ausreichenden Temperaturgradienten sicherzustellen, sind bei der Wärmequelle Temperaturen von mindestens 250 $^{\circ}\text{C}$ erforderlich. Bei diesem Temperaturniveau wird offensichtlich, dass nur die Verbrennung der im Brennstoffzellenabgas enthaltenen Reste an H_2 und CO (ersichtlich an Prozess K4) für die Deckung des Wärmebedarfs von Verdampfung und Reformierung (Prozesse H1 und H2) eine Rolle spielen kann. Des Weiteren ist zu sehen, dass der Reformatstrom (Prozess K1), wegen seiner sehr geringen Wärmekapazität, nicht zur Vorwärmung kalter Stoffströme wie den flüssigen Komponenten (Prozess H1) oder der Kathodenluft (Prozess H3) eingesetzt werden kann. Abbildung 4-2 verdeutlicht, dass die Brennstoffzelle (Prozess K2) ein großes Angebot an Wärme bei einer Temperatur von 160 $^{\circ}\text{C}$ bereitstellen kann. Im Sinne einer maximalen Wärmeintegration wäre daher die Verwendung der Abwärme des Brennstoffzellenprozesses für die Vorwärmung kalter Stoffströme als sinnvoll anzusehen. Aus Gründen der Systemkomplexität und Regelbarkeit ist von einer Integration der Brennstoffzelle in den Wärmehaushalt des Gesamtsystems allerdings abzusehen. Eine Wärmeproduktion in der Brennstoffzelle kann nur erfolgen, wenn der Reformer ein Produktgas mit ausreichender Qualität bereitstellt. Es wäre also ein äußerst komplexes Startkonzept notwendig. Auch unter der Voraussetzung, dass die Betriebsphase des

Systems erreicht werden kann, ist eine enorme Komplexität bei der Regelung zu erwarten, da in einem konkreten Lastpunkt eine definierte Wärmeabfuhr in der Brennstoffzelle zum Beibehalten der gewünschten Betriebstemperatur sichergestellt werden muss und diese definierte Wärme gleichzeitig in einem ausreichenden Maße zur Aufrechterhaltung des Betriebs der Brenngaserzeugung beitragen muss. Aus den genannten Gründen wurde die Abwärme der Brennstoffzelle für den Wärmehaushalt der Brenngaserzeugung nicht berücksichtigt. Vielmehr musste das Ziel sein, für die Betriebstemperatur der Brennstoffzelle eine eigene unabhängige Regelungsmöglichkeit durch eine separate Kühlung zu schaffen, auch wenn diese Maßnahme zu einer Senkung des erreichbaren Systemwirkungsgrades führt. Für die Abkühlung des Reformats (Prozess K1) auf die gewünschte Anodeneingangstemperatur von 160 °C wäre im Sinne der Systemkomplexität eine passive Kühlmöglichkeit wünschenswert. Durch den geringen Wärmekapazitätsstrom des Reformats besteht allerdings die Gefahr der Kondensation bei Unterschreiten der Zieltemperatur. Beim Vergleich der Kapazitätsströme und Temperaturniveaus offenbart sich die Möglichkeit der Kopplung des auf 160 °C temperierten Kathodenabgases (Prozess K3) mit dem Reformat. Bei einer Wärmeübertragung zwischen diesen beiden Stoffströmen ist eine exakte Temperierung des Reformats auf die Anodeneintrittstemperatur theoretisch zwar nur mit einer unendlich großen Wärmeübertragerfläche möglich, jedoch ist das Einhalten der maximalen Materialtemperaturen der HT-PEM von 180 °C auch mit einem realen Bauteil erreichbar. Die Maßnahme bringt keinen Regelungsaufwand mit sich. Bei Mischung von Anoden- und Kathodenabgas und Wärmeübertragung zum Reformatstrom kann, durch den stark erhöhten Wärmekapazitätsstrom, eine noch günstigere Temperierung des Reformats erreicht werden. Da weder der Reformatstrom K1 noch die Abwärme der Brennstoffzelle K2 zur Bereitstellung der Verdampfungs- und Reaktionswärme der DR geeignet sind, verbleibt nur noch die Verbrennung von Anodenabgas als potenzielle Wärmequelle zur Schließung der Energiebilanz. Aus Abbildung 4-2 ist abzulesen, dass die katalytische Verbrennung nur 20 % ihrer Wärme bezogen auf die gesamte zugeführte thermische Energie oberhalb von 250 °C bereitstellen kann, während Eduktkonditionierung (Prozess H1) und Reformierung (Prozess H2) gemeinsam 30 % benötigen, so dass mit den getroffenen Annahmen die Energiebilanz des Systems nicht zu schließen ist. Das Schließen der Bilanz kann durch elektrisches Beheizen des Prozesses, durch Verbrennung zusätzlichen Methanols und durch Verringerung des Wasserstoffumsatzes U_{H_2} erreicht werden. Die erstgenannte Möglichkeit ist aus energetischer Sicht nicht sinnvoll, da die elektrische Energie am Ende der Umwandlungskette bei der Verstromung von Methanol steht und somit mit dem Systemwirkungsgrad behaftet ist. Zudem ergibt sich im Hinblick auf ein reales Mikrobrennstoffzellensystem noch die Herausforderung Heizelemente direkt in den Reformer oder Verdampfer zu integrieren. Hinsichtlich des Wirkungsgrades ist die Verbrennung von zusätzlichem Methanol die optimale Lösung. Al-

lerdings muss hier ein zusätzliches Dosierelement ins System eingebracht und permanent angesteuert werden. Sinnvoll ist für ein kleines Brennstoffzellensystem, bei dem eine geringe Komplexität Vorrang gegenüber einem maximalen Wirkungsgrad hat, die Begrenzung des Wasserstoffumsatzes in der Brennstoffzelle, so dass der Wärmebedarf der Brenngaserzeugung gedeckt werden kann.

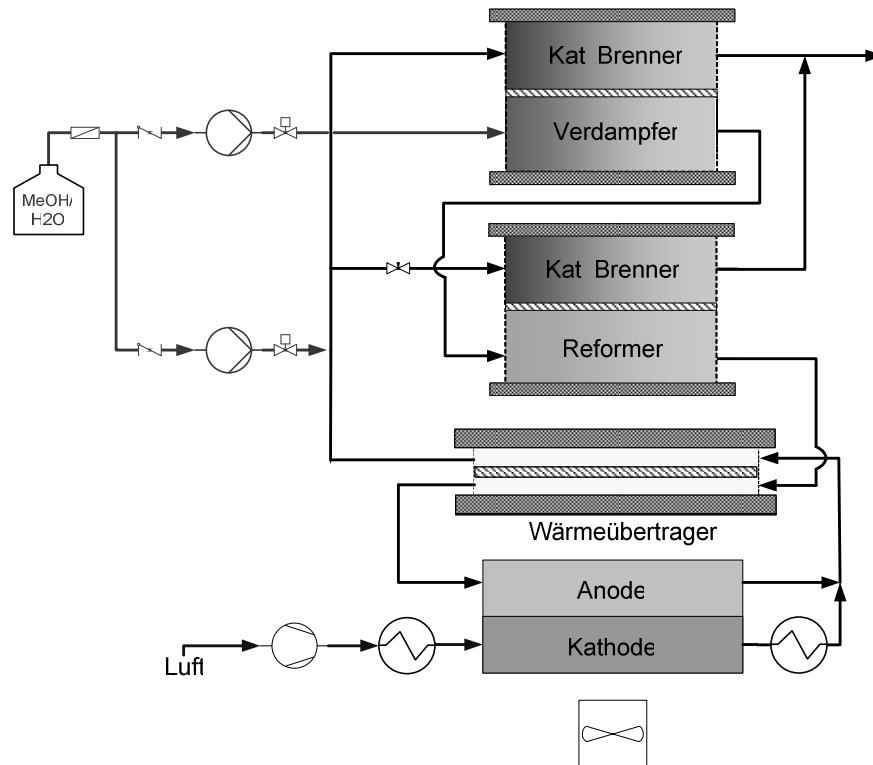


Abbildung 4-3 Systemauslegung für das Mikrobrennstoffzellensystem mit Reformierbrenner, Reformer, Verdampferbrenner, Verdampfer, Wärmeübertrager und Brennstoffzelle

Aus den Überlegungen zur Wärmeintegrationsanalyse wurde eine Systemverschaltung für ein Mikrobrennstoffzellensystem abgeleitet. Diese ist in Abbildung 4-3 schematisch dargestellt. Die notwendige Enthalpie für die Verdampfung und die Reformierung wird durch die katalytische Verbrennung des Brennstoffzellenabgases bereitgestellt. Für die technische Realisierung wurde ein Wärmeübertragerkonzept entwickelt, welches im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Vor dem Eintritt in die beiden katalytischen Brenner (Reformer- und Verdampferbrenner) wird das Brennstoffzellenabgas durch Wärmeübertragung mit dem Reformat weiter erhitzt und gleichzeitig das Reformat für den Eintritt in die Anode temperiert. Da die Verdampfung gemäß Wärmebedarfsanalyse eine etwa doppelt so große Wärmezufuhr erfordert wie die Reformierung, wird das Brennstoffzellenabgas im Verhältnis 1:2 geteilt, was technisch durch Einstellung der Druckverluste

über den Reformier- und Verdampferbrenner realisiert wird. Für die Kühlung der Brennstoffzelle wird ein Lüfter vorgesehen, der für eine äußere Umströmung der Brennstoffzelle und eine konvektive Wärmeabfuhr sorgt. Außerdem wird die Kathodenluft der Brennstoffzelle bei Umgebungstemperatur zugeführt, um auch innerhalb der Zelle, also auch direkt im Reaktionsraum, Wärme abzuführen.

Das Ergebnis einer Simulation der zuvor diskutierten Systemauslegung in Matlab/Simulink[®] ist in Abbildung 4-4 in einem Energieflussdiagramm dargestellt. Die Annahmen für die jeweilige Prozessführung und –temperatur entsprechen denen der Wärmeintegrationsanalyse.

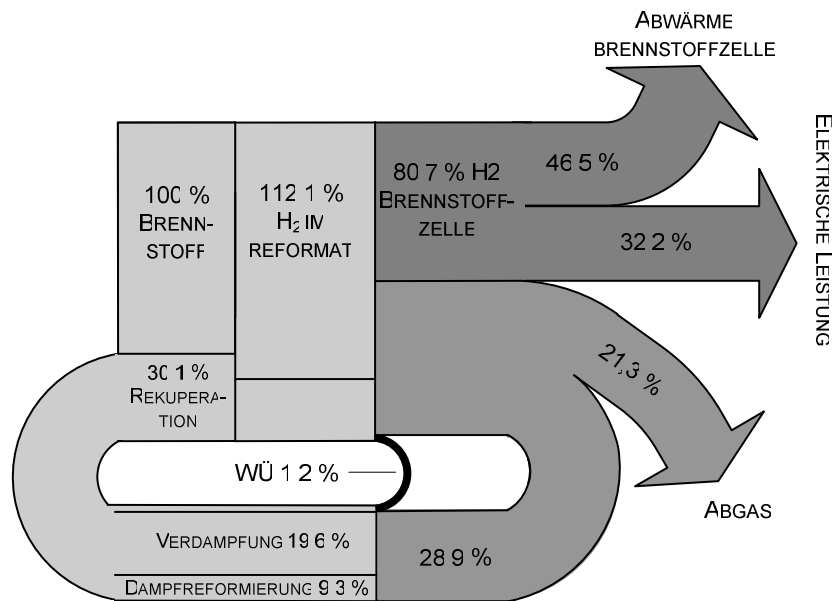


Abbildung 4-4 Energieflussdiagramm des Mikrobrennstoffzellensystems nach Abbildung 4-3

Für die Schließung der Energiebilanz des simulierten Gesamtsystems ergibt sich unter den getroffenen Annahmen ein maximaler Wasserstoffumsatz U_{H_2} von 73 %. Bezogen auf die zugeführte thermische Leistung werden 30,1 % der Wärme ins System zurückgekoppelt. 80,7 % der zugeführten thermischen Leistung stehen der Brennstoffzelle in Form von Wasserstoff zur Strom- und Wärmeproduktion zur Verfügung. Dies entspricht der Definition des so genannten Reformierungswirkungsgrades η_{Refo} , der in Gl. 4.3 in einer für Membranbrennstoffzellen gültigen Form gegeben ist (Umsatz von CO nicht berücksichtigt).

$$\eta_{Refo} = \frac{\dot{n}_{H_2} \cdot H_{U,H_2}}{\dot{n}_{Br} \cdot H_{U,Br}} \cdot U_{H_2} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

Mit der Annahme einer Zellspannung von 0,5 V, dem ermittelten Wasserstoffumsatz und der Prozesstemperatur von 160 °C ergibt sich für das simulierte Gesamtsystem ein elektrischer Bruttowirkungsgrad von 32,2 %. Einen entscheidenden Einfluss auf den realen elektrischen Wirkungsgrad des Systems haben die parasitären Verluste durch die BoP-Komponenten und die Steuerung, die im genannten Wert nicht miteinbezogen sind.

4.3.2. Steuerungsentwicklung

Auf Basis der Prüfstandssteuerungen für Reformer und Brennstoffzelle wurde eine Systemsteuerung entwickelt und implementiert. Diese ermöglicht den automatisierten Systemstart und Betrieb des Gesamtsystems. In Abbildung 4-5 ist der Ablauf der Steuerungen mit den verschiedenen Zuständen zusammengefasst.

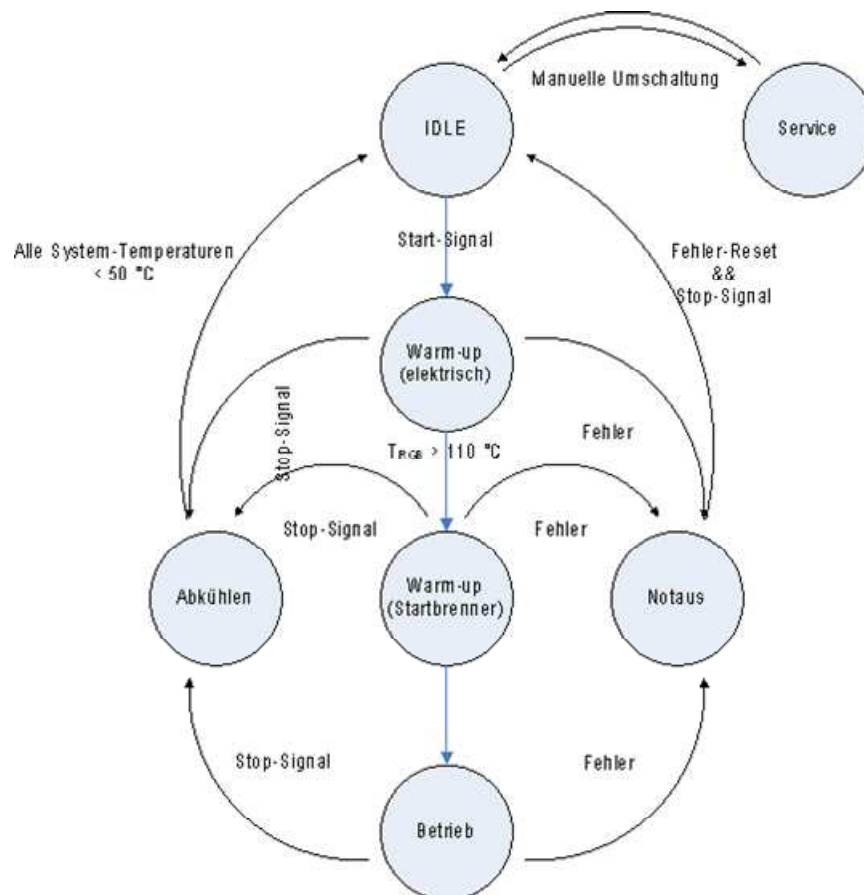


Abbildung 4-5 Ablaufdiagramm der Steuerung

Nach dem Einschalten befindet sich das System im Zustand Leerlauf (IDLE). Durch ein Startsignal wird das System gestartet. Die Startphasen werden anschließend bis zum Zustand Betrieb automatisch durchlaufen. Während des Systemstarts erfolgt zunächst

eine elektrische Vorwärmung. Dabei werden Brennstoffzelle und Restgasbrenner über Heizelemente in den Systemendplatten aufgeheizt. Die Heizungen werden auf eine Eigentemperatur von 200 °C am Reformers beziehungsweise 180 °C an der Brennstoffzelle geregelt.

Nachdem die Temperatur im Reformers ein Niveau erreicht hat, das die Verdampfung des Brennstoffs und die Funktionsfähigkeit des Katalysators sicherstellt, wird der Startbrenner gestartet. Hierfür wird Brennstoff direkt in den Restgasbrenner dosiert und die Luftzufuhr eingeschaltet. Erreicht die Temperatur des Restgasbrenner-Austritts einen Schwellenwert von etwa 200 °C, wird eine erfolgreiche Zündung des Startbrenners angenommen und die elektrische Heizung des Reformers abgeschaltet. Der Reformers wird mit dem Startbrenner weiter aufgeheizt bis zum Erreichen einer minimalen Betriebstemperatur.

Sobald der Reformers-Eintritt eine Temperatur erreicht hat, welche mindestens die Verdampfung des Brennstoffs sicherstellt, wird das System in den Reformers-Betrieb umgeschaltet. Im Reformers-Betrieb wird die Brennstoffzufuhr zum Startbrenner gestoppt und stattdessen Brennstoff in den Reformers dosiert. Entsprechend der Reformers-Leistung wird des weiteren Luft durch die Brennstoffzelle in den Restgasbrenner geleitet. Die Reformers-Leistung wird nach der Austrittstemperatur des Restgasbrenners geregelt, wobei diese etwa 250 – 280 °C betragen sollte.

Im Betriebszustand wird die Brennstoffzelle wahlweise entweder mittels der Ladestrategie oder einer elektrischen Last belastet. Die während des Betriebs frei werdende Wärme aufgrund des Wasserstoffumsatzes wird mittels externer konvektiver Kühlung über einen Lüfter abgeführt. Dieser wird automatisch gemäß der Ein- und Austrittstemperaturen des Stacks aktiviert oder deaktiviert. Um den Zustand Betrieb zu verlassen, muss ein Stoppsignal vorgegeben werden. Daraufhin stoppt die Steuerung die Brennstoffzufuhr und aktiviert die Brennstoffzellen-Kühlung. Nach Erreichen der Zieltemperatur geht das System selbständig wieder in den Zustand Leerlauf (IDLE) über.

Während des gesamten Betriebs, also in der Aufwärm-, Betriebs- und Abkühlphase werden die Temperatursensoren auf Kontaktbruch überwacht. Zusätzlich werden kritische Temperaturen wie Heizungen und Restgasbrenner-Austritt auf die Überschreitung der jeweiligen Maximaltemperatur überprüft. Wird ein Fehler erkannt, so schaltet das System sofort in den Zustand Notaus. In diesem Zustand werden alle Aktoren gestoppt. Das Verlassen des Notaus-Zustands ist möglich, wenn ein Stoppsignal an die Steuerung gesendet wird. Die Fehler müssen vor einem erneuten Start zurückgesetzt werden, da das System ansonsten direkt wieder in Notaus geht.

In Abbildung 4-6 und 4-7 ist ein beispielhafter Betrieb des Gesamtsystems dargestellt. Abbildung 4-6 zeigt dabei den Verlauf der verschiedenen Systemtemperaturen und die

Ansteuerung des Brennstoffzellenlüfters. In Abbildung 4-7 sind die Leistungsdaten des Systems aufgetragen. Die dargestellten Ergebnisse wurden mit einem 15-Zellen-Stack ermittelt. Die max. erreichte elektrische Brutto-Leistung beträgt 30 W bei einer zugeführten thermischen Leistung des Brennstoffs von ca. 170 W. Der Brutto-Systemwirkungsgrad liegt somit bei nahezu 18 %.

Neben der Belastung der Brennstoffzelle mittels elektronischer Last wurde eine innovative Ladestrategie für den Akku entwickelt und sowohl an einer Einzelzelle als auch am System getestet. Dabei wird die Zelle hochfrequent belastet. Ein Belastungszyklus ist dadurch gekennzeichnet, dass die Zelle elektrisch belastet wird. Die Leistungsabgabe erfolgt entlang der U-I-Kennlinie. Sinkt die Zellspannung unter einen vorgegebenen Wert, wird die Last zu Null gesetzt, bis die Zellspannung wieder ein max. Niveau erreicht hat und die Zelle erneut belastet wird. Hierdurch ergibt sich eine sehr hochfrequente Leistungsabnahme. Um dieses Konzept zur Akkuladung zu nutzen muss die Zellspannung immer größer der Spannung am Akku sein. Vorteil dieses Konzepts ist der sehr einfache Aufbau der elektrischen Verschaltung.

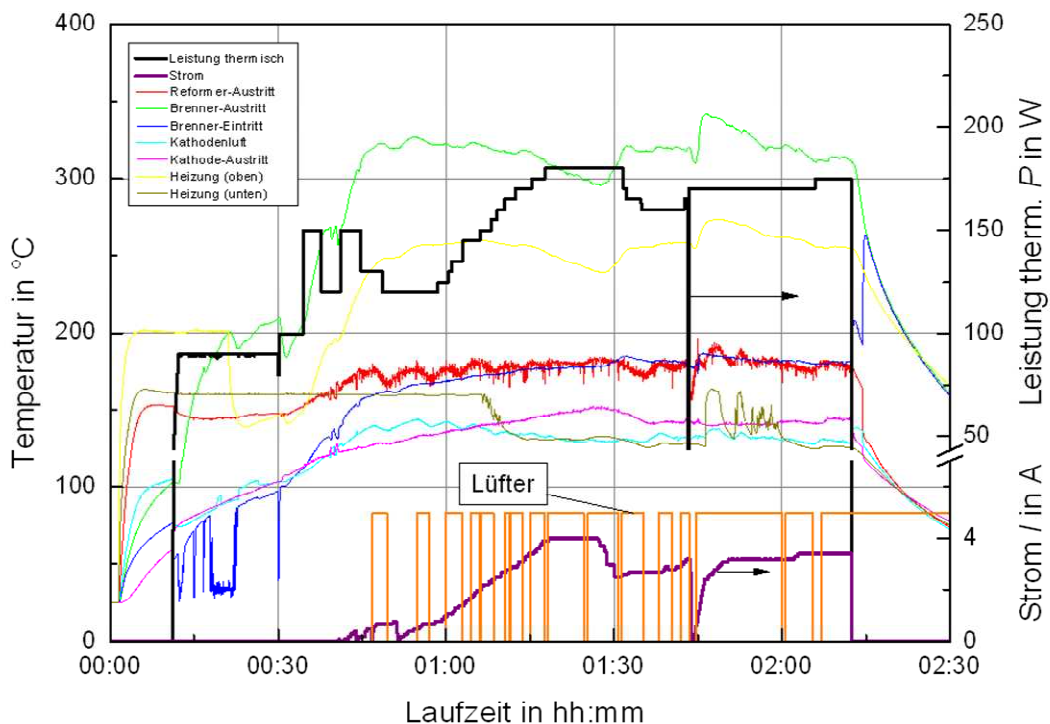


Abbildung 4-6 **Betrieb des Gesamtsystems – Temperaturen**

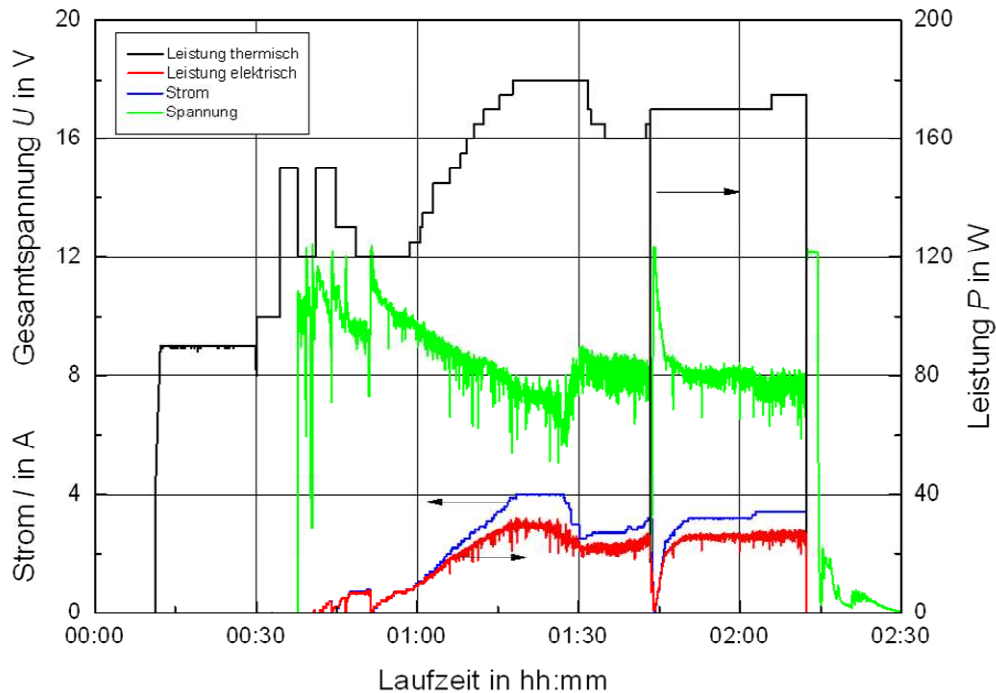


Abbildung 4-7 Betrieb des Gesamtsystems – Leistung, Strom, Spannung

Das beschriebene Konzept wurde sowohl an einer Einzelzelle als auch am Gesamtsystem verifiziert. Dabei wurde an der Einzelzelle ein kontinuierlicher Betrieb für mehr als 100 Stunden realisiert. Am System wurde die Machbarkeit ebenfalls in mehreren Testläufen nachgewiesen.

4.3.3. Balance of Plant Komponenten

AP 3200, Katalytischer Brenner, Integration im Stack und Wärmemanagement

Um die Hochtemperatur-Brennstoffzelle und den Brenngaserzeuger beim Kaltstart des Gesamtsystems möglichst schnell auf Betriebstemperatur zu bringen, war es erforderlich ein Startsystem zu konzipieren, welches die notwendige Heizleistung bereitstellt. Hierfür wurde zu Beginn des Projektes ein katalytischer Brenner vorgesehen, der beim Startvorgang Methanol und Luft verbrennt, um die benötigte Wärme zu erzeugen. Dieses Konzept wurde später auf Grund der Komplexität der Systemperipherie und der Überwachung des Brennvorgangs verworfen.

Stattdessen wurde ein einfacheres System verwendet, dass Strom aus dem gekoppelten Hybrid-Akku nutzt und mittels elektrischer Heizelemente die benötigte Wärme zum Erreichen der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle, zum Verdampfen des Brennstoffs und zur Vorwärmung der Luft erzeugt. Um die Wärme im gesamten Stack zu verteilen und die für den Betrieb notwendige Temperatur im späteren Betrieb zu halten, wurde in

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

Zusammenarbeit mit dem OWI Aachen ein Wärmemanagementsystem mit Wärmerückgewinnung entworfen. Bei einem Kaltstart nutzt dieses zwei an den Plattenstapelenden eingelassene elektrische Heizelemente, um den gesamten Stapel auf Betriebstemperatur zu bringen. Die zum Betrieb notwendige Luft- und Brenngasströmung bewirkt hierbei eine schnelle, konvektive Wärmeausbreitung im gesamten System. Nach der Startphase werden die elektrischen Heizelemente abgeschaltet. Die notwendige Wärmemenge zum Erhalt der Betriebstemperatur wird durch Wärmerückführung beim Abkühlen des überhitzten Reformats gewonnen. Ein schematisches Übersichtsbild des Wärmemanagementsystems ist in Abbildung 4-8 dargestellt.

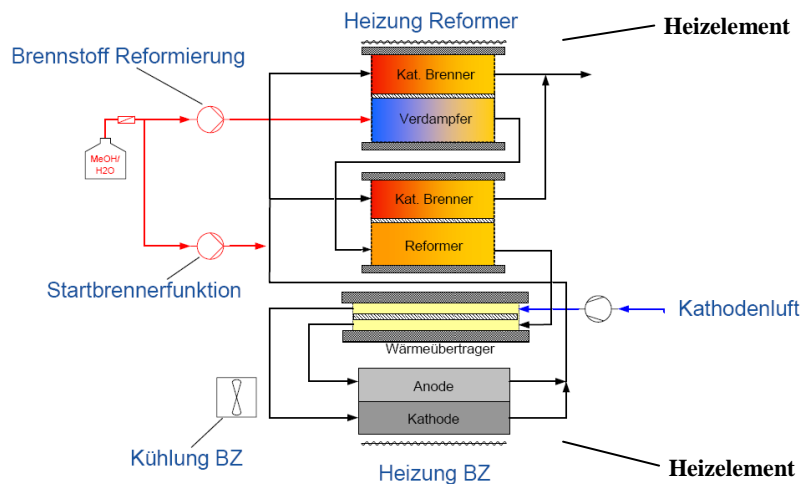


Abbildung 4-8 Übersichtsbild des Wärmemanagementsystems (OWI Aachen)

Die Berechnung der für den Start notwendigen Wärmeleistung erfolgte unter Berücksichtigung der Wärmekapazität der Komponenten, sowie der latenten Wärme für die Verdampfung des Fluids. Als Richtwert wurde so eine Leistung von 25 W ermittelt. Auf Basis dieser Berechnungen wurde ein Heizelement entwickelt und mit mikrotechnologischen Herstellungsprozessen (u.a. Photolithographie und Nickelgalvanik) im institutseigenen Reinraum gefertigt. Durch die mikrotechnische Fertigung des Heizers im eigenen Hause konnte der Vorteil einer relativ schnellen Umsetzung eines neuen Entwurfs zum Funktionsmuster in sehr kurzer Zeit erfolgen. So ließen sich variierende Substratgeometrien und Heizspiralförmigkeiten erproben, bevor das endgültige Design von einem kommerziellen Heizelementhersteller gefertigt wurde.

Für die Dimensionierung des Heizelementes wurde nach Rücksprache mit dem OWI eine Betriebsspannung von 12 V festgelegt. Die Geometrie der Heizspirale wurde anhand des Ohmschen Gesetzes und des spezifischen Widerstandes von Nickel ausge-

legt. Zunächst wurde eine 2D-Heizspirale gezeichnet, die die Fläche einer Reformerplatte homogen bedeckt. Dabei wurden Länge und Breite der Leiterbahn festgelegt und eine variable Leiterdicke zum Einstellen des Heizwiderstandes genutzt. Diese wurde während des Galvanik-Prozesses definiert. Das Spiralendesign wurde auf einer Lithographie-Maske geschrieben und in einem photolithographischen Prozess zur Herstellung der Nickel-Galvanikform verwendet. Da nur einige Substrate die Bedingungen für Mikrotechnikprozesse erfüllen, ist die Auswahl für ein Hezelementsubstrat limitiert. Aluminiumoxid ist relativ günstig, mechanisch fest, hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit und wurde in diesem Fall verwendet. Der schematische Prozessablauf zum Aufbringen und Strukturieren einer Nickelheizspirale ist in Abbildung 4-9 zu sehen.

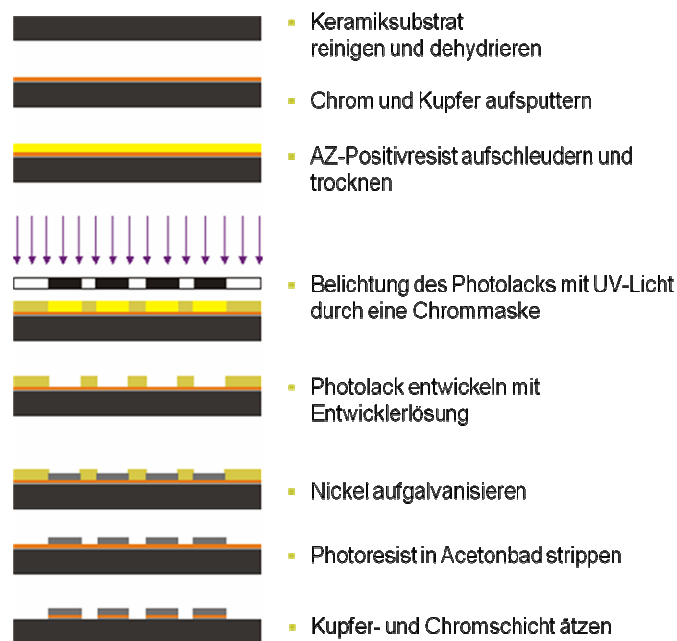


Abbildung 4-9 Photolithographische Strukturierung einer Nickel-Heizspirale

Nach der oben beschriebenen Methode wurden mehrere Hezelemente mit unterschiedlichen Heizleistungen gefertigt (Abbildung 4-10a). Auf diese Weise konnte die vorab rechnerisch ermittelte Heizleistung mit der praktisch benötigten Leistung verglichen werden. Im Anschluss an die Vorversuche mit den selbst hergestellten Hezelementen wurden kommerziell erhältliche Heizfolien mit ähnlicher Heizleistung gekauft (Abbildung 4-10b) und diese mit den eigenen verglichen. Bei den industriell gefertigten, flexiblen Heizfolien handelt es sich um mittels Ätzprozess hergestellte und zwischen dünne Kunststoff- oder Komposite-Folien laminierte Heizstrukturen, die mit gewünschten Widerständen und Geometrien gefertigt werden können.



Abbildung 4-10 (a) Nickel-Heizstruktur auf Keramiksubstrat (\varnothing 38,1 mm) (b) kommerziell erhältliches Heizelement (\varnothing 38,1 mm) (c) Endplatte zum Einbau eines Heizelementes

Die Fixierung der Heizelemente an den Enden des Stapels erfolgte mit thermisch einseitig isolierenden, hochtemperaturbeständigen Platten, in die eine Aufnahme für das Heizelement eingelassen ist (siehe Abbildung 4-10c). Durch den stapelförmigen Aufbau des Stacks und die flache Form der Heizelemente ließ sich so eine platz sparende Integration der Wärmequellen vornehmen ohne das Bauvolumen des Gesamtstacks nennenswert zu vergrößern. Dieser Aspekt war für die Miniaturisierung des Brennstoffzellen-Gesamtsystems von großer Bedeutung und wurde mit beiden Heizelementvarianten erfüllt.

Zur Ermittlung der Effektivität der Heizelemente wurde ein vereinfachter Aufbau, bestehend aus einer einzigen fluidischen Stufe, einem Heizelement und zwei Endplatten, montiert. Der Anschluss des Systems an die Messperipherie erfolgte nach dem in Abbildung 4-11 dargestellten Schema. Das im Plattenstapel angeordnete Heizelement erwärmt die Wärmetauscherplatten auf Betriebstemperatur und eine luftfördernde Pumpe mit Durchfluss- und Drucksensor fördert Frischluft in den Wärmetauscher. Mittels automatisierter Messdatenerfassung konnte so der im Wärmetauscher entstehende Druckverlust sowie die Temperaturdifferenz zwischen Eingangsluft und Ausgangsluft (Abgas) in Abhängigkeit von der Heizleistung ermittelt werden. Die in diesem Versuchsaufbau mit nur einer Wärmetauscherstufe gewonnenen Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf das Betriebsverhalten einer Mehrfachstufe zu.

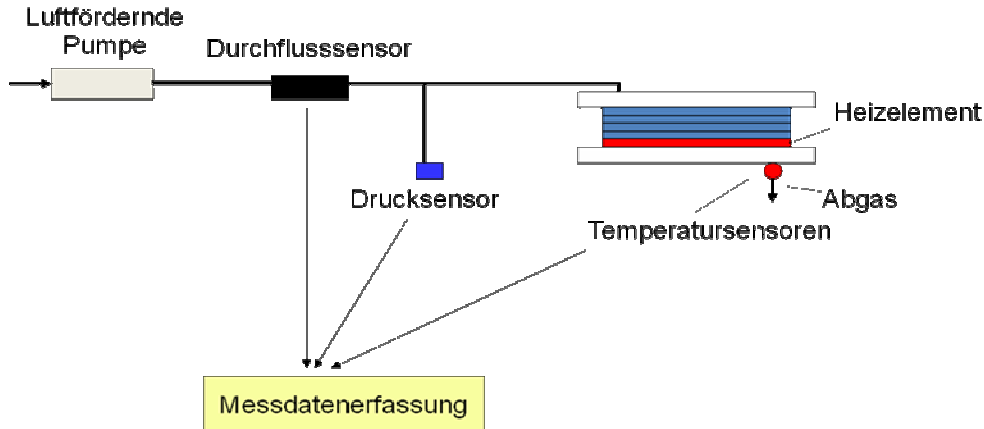


Abbildung 4-11 Schematischer Versuchsaufbau zur Untersuchung der Heizelemente

Wie sich bei der Durchführung der Versuche zeigte, war die anfangs errechnete Heizleistung von 25 W zu niedrig gewählt, um die Betriebstemperatur in annehmbarer Zeit zu erreichen. Als Grund hierfür werden parasitäre Wärmekapazitäten der Umgebungs-komponenten angenommen. In einem Redesign wurde das Heizelement anschließend mit 50 W etwas überdimensioniert, um eine ausreichende Leistungsreserve vorzusehen. Durch einen Kompromiss zwischen aufgebrachtener Heizleistung und Startzeit (zum Erreichen von 180°C) konnten schließlich annehmbare re Parameter gefunden werden. Bei einer Heizleistung von 32 W konnte das System in 4 min auf Betriebstemperatur gebracht werden (siehe Abbildung 4-12). Zum Halten der Betriebstemperatur wurde nach Erreichen der 180°C Grenze die Heizleistung um 50 % reduziert.

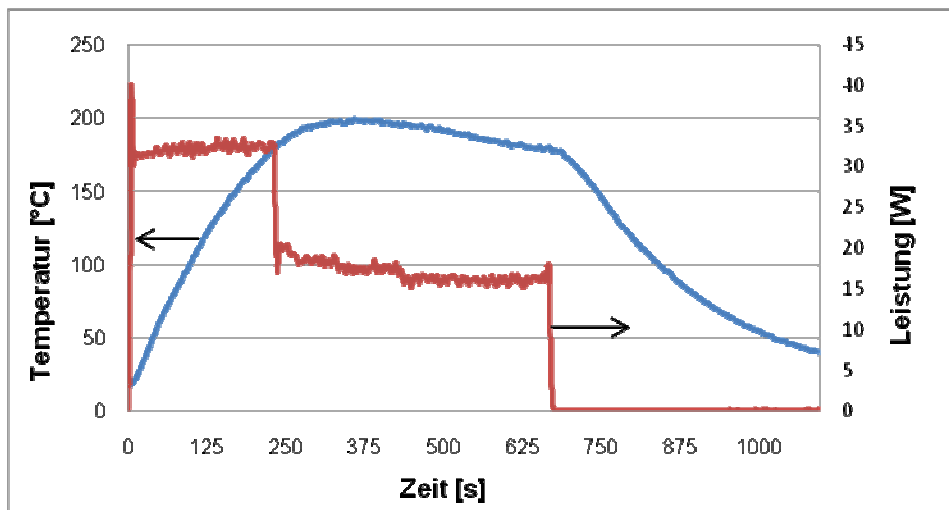


Abbildung 4-12 Erwärmung der Eingangsluft bei 5 slpm und variierender Heizleistung

In Absprache mit dem OWI Aachen wurde später entschieden, zwei Heizelemente (je 50 W) im vollständigen Stack vorzusehen, um das System letztendlich von zwei Seiten des Gesamtstacks aus heizen zu können und zudem den Startvorgang bei Bedarf weiter zu beschleunigen.

Neben der Ermittlung der Heizleistung wurde die Standzeit der Heizelemente bei mehrfachen Kaltstart und Dauerheizphasen untersucht. Hierbei erwies sich die sprödharte Eigenschaft der Keramiksubstrate als ungünstig. Nach zahlreichen zyklischen Tests und einigen Betriebsstunden wiesen die Aluminiumoxidsubstrate spannungsbedingte Risse auf, die letztendlich zum Ausfall der Heizer führten. Da die Keramikheizer jedoch aus Kostengründen nur für die Voruntersuchungen eingesetzt werden sollten, erwies sich dies nicht als sonderlich nachteilig. Bei den kommerziell erhältlichen Heizfolien ließen sich solche Defekte nicht beobachten.

AP 4100, Auswahl hochwertiger Mikropumpen und -ventile, Integration in die Mikrosystemperipherie, Schnittstellenmanagement

Die besonders hohen Betriebstemperaturen und die hohe Luftdurchflussanforderung hat die Auswahl von Mikropumpen und -ventilen limitiert. Eine weitere Recherche von miniaturisierten Pumpen im Millimeterbereich war unter Berücksichtigung folgender Eigenschaften notwendig: Gewicht, Leistung, Durchfluss und Gegendruck. Vom OWI Aachen wurden die vorläufigen Randbedingungen (5-10 slpm Durchflussrate und 45-50 mbar Gegendruck) angegeben. Nach einem gründlichen Benchmarking bestehender kommerziell erhältlicher Luftpumpen, konnte eine vorläufige Liste mit vom Hersteller angegebenen Werten zu den Pumpeigenschaften aufgestellt werden (siehe Tabelle 4-2).

Firma	Typenbezeichnung	Durchfluss (L/min)	Druckaufbau (mbar)	Gewicht (g)	Leistung (W)
Gardner Denver Thomas	BLG085	8,5	150	150	8
Gardner Denver Thomas	G 04	6,8	150	100	4,5
Micronel	U51DX	439	49	90	31
Parker Pneutronics	T2-06	12	140	186	8,4

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

Schwarzer Precision	SP 038 RO	4,5	200	~100	4
---------------------	-----------	-----	-----	------	---

Tabelle 4-2 Vorläufige Liste der luftfördernden Pumpen

Mit Rücksicht auf eine allgemeine Gewichtsreduzierung wurden die miniaturisierten Pumpen G04, BLG085 und U51DX besorgt und mittels geeigneter Versuchsaufbauten kontrolliert. Wie in Abbildung 4-11 dargestellt wurden Drucksensoren und Durchflusssensoren verwendet, um die Durchflussraten zu erfassen. Ein steuerbares Ventil wurde eingesetzt, um unterschiedliche Gegendrücke zu erzeugen.

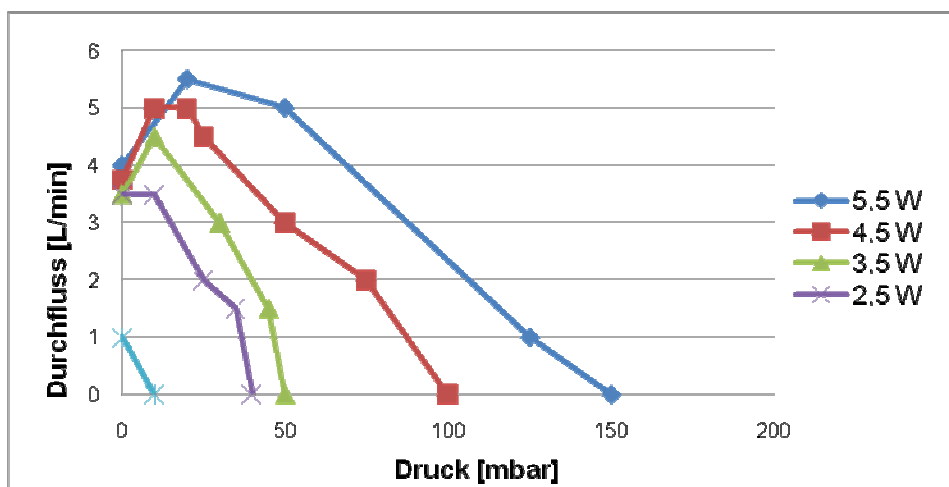


Abbildung 4-13 Detaillierte Spezifikation der G04 luftfördernde Pumpe

Obwohl gründliche Untersuchungen mit der U51DX durchgeführt wurden, wurde die Pumpe in der weiteren Projektphase verworfen, da die höher ausfallenden Gegendrücke von mehr als 50 mbar mit diesem Pumpentyp nicht erfüllt werden konnten. Die zwei in Frage kommenden luftfördernden Pumpen waren somit die BLG085 und G04 (siehe Abbildung 4-13). Eine detaillierte Pumpcharakteristik ist beispielhaft von der G04 in Abbildung 4-13 dargestellt. Trotz ähnlicher Durchflussraten und Gegendrücke, wurde die G04 aufgrund der geringeren Leistung und Kosten bzw. der kleineren Dimensionen für den Einsatz in das Brennstoffzellen-Gesamtsystem bevorzugt.

Neben der luftfördernden Pumpe musste auch ein Pumpentyp ausgewählt werden, der den Anforderungen der Flüssigbrennstoff-Förderungen (laut Vorberechnungen vom OWI: 0,56 g/min eines Methanol/Wassergemisch bei 50 mbar Gegendruck) entspricht. Tabelle 4-3 stellt die verschiedenen auf dem Markt bestehenden Mikropumpen dar.

Firma	Typenbezeichnung	Durchfluss (ml/min)	Druckaufbau (mbar)	Gewicht (g)	Leistung (W)
Bartels	MP5	3	250	0,8	~0,045
Bartels	MP6	5	500	2	~0,1
Burkert	7604	5	200	>5	NA
thinXXS	MDP1304	7	350	3	0,23
thinXXS	MDP2205	9,2	550	3	0,23

Tabelle 4-3 Vorläufige Liste der brennstofffördernden Pumpen

Nach gründlicher Analyse der verschiedenen Pumpen, waren alle ausgewählten Typen für die geforderten Pumpleistungen geeignet. Die MP5 (Bartels) wurde aufgrund des geringen Leistungsbedarfs, des kleineren Aufbaus und des günstigeren Preises ausgewählt. Die detaillierten Spezifikation des untersuchten Pumpentyps MP 5 sind in Abbildung 4-14 dargestellt.

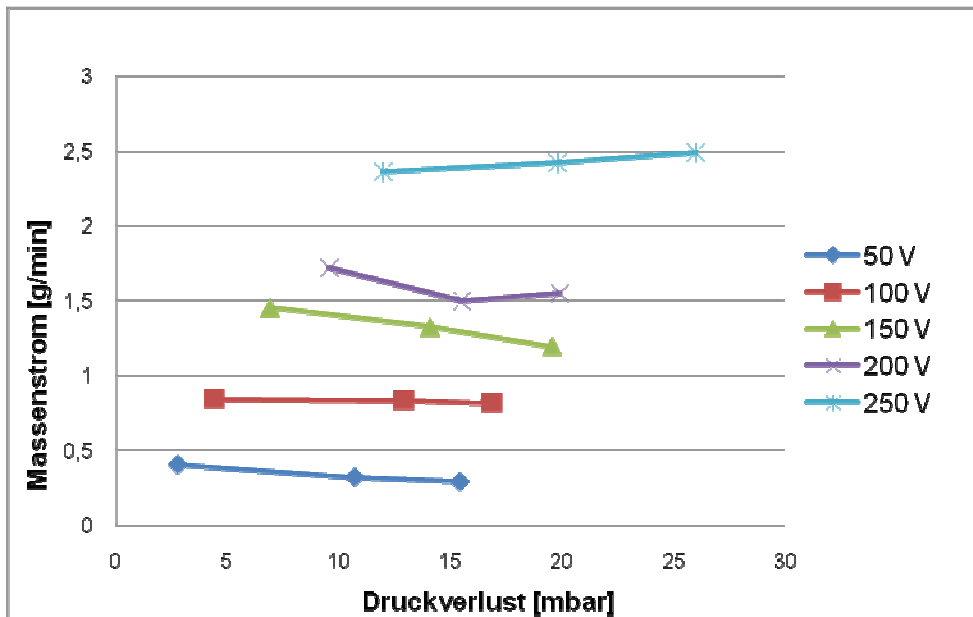


Abbildung 4-14 Detaillierten Spezifikation der MP5 Brennstofffördernde Pumpe

AP 4200, Entwicklung eines möglichst konvektiven Kühlkonzepts

Neben den mit den Prozessgasen in die Brennstoffzelle eingebrachte Wärmeenergie erzeugt auch die chemische Reaktion der Moleküle bei der Stromerzeugung zusätzliche Wärmeenergie, die zum Aufheizen der Zelle führt. Damit dieser Prozess nicht zu einer Überhitzung der Membranen führt, muss die Brennstoffzelle aktiv gekühlt werden. Dies

kann entweder durch eine Steigerung der eingeblasenen Kathodenluftmenge erfolgen, oder aber durch eine gesteigerte externe Konvektion geschehen.

Vorteil der Kühlung mittels interner Kathodenluft ist eine weitestgehend homogene Abkühlung der Brennstoffzelle. Gleichzeitig bewirkt eine gesteigerte Durchflussrate jedoch auch einen erhöhten Gegendruck in den kleinen Kanälen, wodurch die Leistungsaufnahme der Kathodenluftpumpe steigt.

Die Kühlvariante mittels aktiv gesteigerter externer Konvektion hat den Nachteil, dass durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Zelle ein Temperaturgradient entsteht, der sich nachteilig auf die Effizienz der Brennstoffzelle auswirkt. Vorteil dieser Variante ist eine im Verhältnis zur Kathodenluftpumpe deutlich geringe Leistungsaufnahme des angeschlossenen Lüfters.

In Anbetracht der Vor- und Nachteile beider Kühlvarianten sollte hier ein Kompromiss gefunden werden welcher eine minimale parasitäre Leistungsaufnahme bei maximaler Wärmeabfuhr ermöglicht.

Um einen Einblick in die Wärmeverteilung im Stack zu bekommen wurde ein FEM Modell der Brennstoffzelle erzeugt und unterschiedliche Umströmungsszenarien mit dem Simulationsprogramm Fluent berechnet. Da der Aufbau der Brennstoffzelle jedoch thermisch sehr komplex ist und zudem die im Inneren der Zelle ablaufenden chemischen Prozesse das thermische Verhalten stark beeinflussen, konnten bei dem numerischen Modell nicht alle thermischen Aspekte berücksichtigt werden. Somit wurde das vereinfachte Modell lediglich zur Bestimmung von Ergebnistendenzen herangezogen.

Anhand dieser 2D und 3D Simulationen bei variierenden internen und externen Luftströmungen (siehe Abbildung 4-15) wurde festgestellt dass eine längsgerichtete externe Luftströmung, kombiniert mit einer reduzierten internen Kühlung weitestgehend homogene Wärmeverteilungen liefert und gleichzeitig eine maximale Gesamtkühlwirkung erzielt.

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

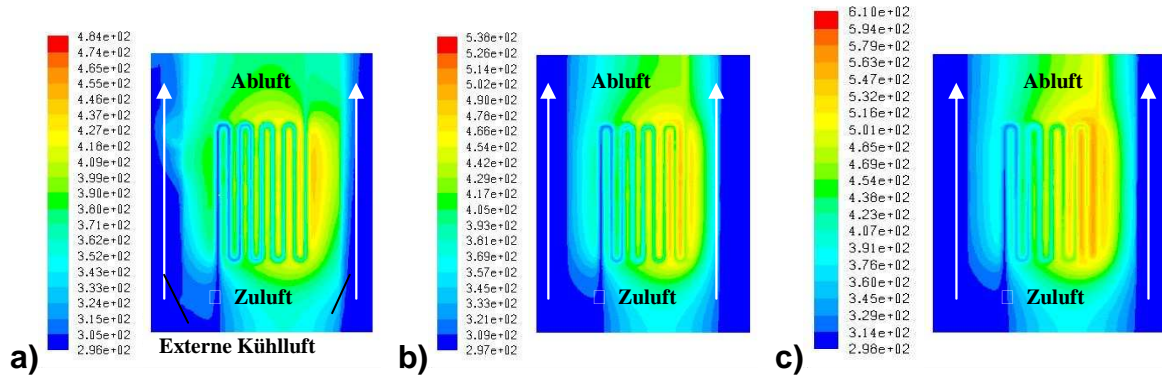


Abbildung 4-15 2D Simulationsergebnisse zur Wärmeabfuhr einer Bipolarplatte bei unterschiedlichen Luftströmungen a) 10 slpm Interne Luftmenge, 0,5 m/s Externer Luftfluss; b) 5 slpm Intern, 10 m/s Extern; c) 5 slpm Intern, 0,5 m/s Extern)

Um die Ergebnisse der Simulationen im Versuch zu bestätigen wurde ein Plattenstack bei einer internen Luftdurchflussmenge von 2,25 slpm mittels Heizelement auf eine Ausgangstemperatur von 210°C erwärmt. Anschließend wurde der Stack zum einen durch Erhöhen des internen Durchflusses und zum anderen durch Zuschalten eines Lüfters gekühlt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 3 dargestellt. Es zeigte sich, dass der Einsatz des externen PC Lüfters bei lediglich 60 mW zusätzlicher parasitärer Leistung eine bessere Kühlwirkung erzielt als die gesteigerte interne Luftmenge mit 3 W Zusatzleistung.

Innere Durchfluss [L/min]	Gegendruck [mbar]	Äußere Luftgeschwindigkeit [m/s]	Temperatur [°C]	Bemerkung
2,25	25	0	210	Anfangspunkt
2,25	25	2,5	180	PC Lüfter verwendet, 60mW
3,25	50	0	190	Maximale Luftförderung G04EB, ohne Lüfter

Tabelle 4-4 Untersuchungsergebnisse zur Kühlung der Brennstoffzelle mit und ohne konvektiver Kühlung

Folglich stellt das Verfahren mit zusätzlicher externer, konvektiver Kühlung bei gleichzeitiger Reduzierung des internen Durchflusses eine geeignete Lösung zum energiesparenden Kühlen des Brennstoffzellenstacks dar. Die Verringerung des internen Durchflusses ermöglichte die Einsparung von fast 3 W parasitärer Leistung. Somit konnte Arbeitspaket 4200 erfolgreich abgeschlossen werden und ermöglichte zudem den Einsatz einer kleineren luftfördernden Pumpe.

AP 5200, Einzelkomponenten-Test

Die Einzelkomponenten-Tests wurden nicht unabhängig von den vorherigen Arbeitspaketen durchgeführt. Die Auswahl der Gebläse bzw. der luftfördernden Pumpe, der Brennstoffpumpe und der Heizelemente wurde innerhalb der entsprechenden Arbeitspakete durchgeführt. Hierbei wurde für jede Einzelkomponente eine Auswahl getroffen, die den Anforderungen des Brennstoffzellen-Gesamtsystems entsprach.

AP 7200, Auswahl eines Herstellers für die Serienfertigung der Mikrosystemperipherie

Innerhalb des Arbeitspaketes 7200 wurden viele Kontakte mit Industrieunternehmen (u.a. zu Minco GmbH, Gardner Denver Thomas GmbH und Bartels GmbH) geknüpft. In Tabelle 4-5 sind die verhandelten Kosten der ausgewählten BoP-Komponenten (luftfördernde Pumpe, brennstofffördernde Pumpe und Heizelement) für unterschiedliche Stückzahlen aufgelistet.

Komponente	bis 10	bis 100	bis 1.000
Mikropumpe			
Bartels MP5	-	-	30,00 €
Luftfördernde Pumpe			
Thomas BLG 085	230,00 €	150,00 €	70,00 €
Thomas G04	110,00 €	75,00 €	40,00 €
Heizelement			
Minco 6807	42,00 €	16,00 €	12,00 €
Minco Sonderfertigung	55,00 €	20,00 €	15,00 €

Tabelle 4-5 Kostenaufstellung der ausgewählten BoP-Komponenten für unterschiedliche Stückzahlen

Es ist zu erkennen, dass sich die Gesamtkosten pro Komponente bei einer Abnahme von 1.000 Stück im Vergleich zum Einzelkauf deutlich verringern. So ermittelt sich die Gesamtsumme der benötigten BoP-Komponenten bestehend aus einer luftfördernden Pumpe, zwei brennstofffördernden Pumpen und zwei Heizelementen zu insgesamt ca. 70,00 € bis 100,00 €. Hinsichtlich des Gesamtziels, eine Mikrobrennstoffzelle anzubie-

ten, die bei einer Gesamtleistung von 100 W 4 €/W kostet, würden die BoP-Komponenten ein Viertel der Gesamtkosten betragen.

4.3.4. Fertigungskonzept und Aufbau eines Gesamtsystems

Aufgrund des sehr kompakten Designs und der zum Projektende erreichten hohen Integrationstiefe wurde für die Hauptkomponente, das Mikrobrennstoffzellensystem, ein Konzept zur Handfertigung entworfen. Dabei wurden ausgehend von der Grundplatte die Brennstoffzelle und die Reformereinheit montiert und anschließend verspannt. In Abbildung 4-16 sind der Ablauf der Montage und die verschiedenen Schritte dargestellt.

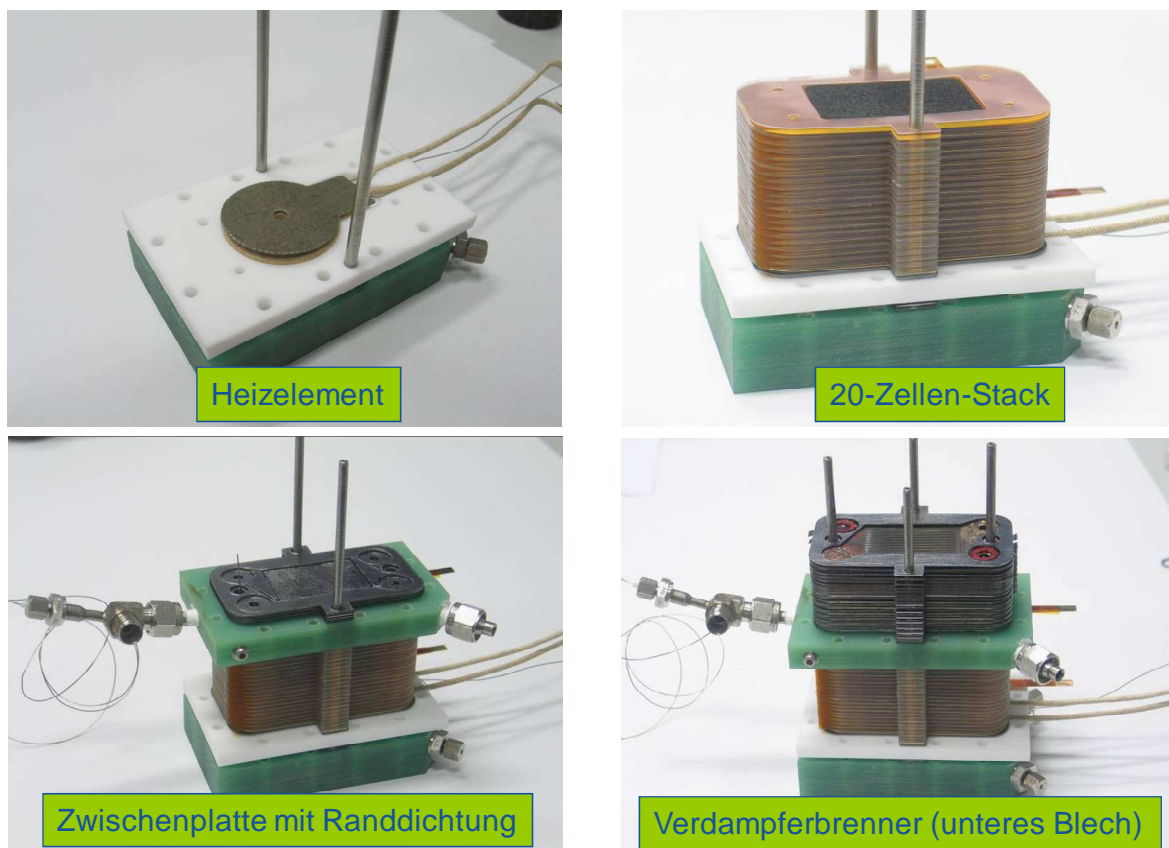


Abbildung 4-16 Montage des Gesamtsystems

Zur Montage wird aufbauend auf der Grundplatte wird zunächst die Halterung für die elektrische Heizung und die Heizung selber aufgelegt. Anschließend erfolgt die Stapelung des Stacks abwechselnd Bipolarplatte, Dichtungen, MEA, Dichtung und die nächst Bipolarplatte bis ein Stack abhängig von der angestrebten Leistung mit 20 bis 30 Zellen aufgebaut ist. Der Stapel wird durch die Stromabnehmer eingefasst. Als Trennung zur Reformereinheit wird eine Zwischenplatte eingelegt. Hier sind zudem Anschlüsse zur

4. Systemintegration und Aufbau eines Gesamtsystems

Temperaturüberwachung und zur Kathodenluftzuführung vorgesehen. Der Reformer wird nun durch weitere Stapelung der funktionalisierten Bleche (Verdampfer, Brenner, Reformer, Wärmeübertrager) aufgebaut. Durch Einlegen von Dichtungen auf die Bleche kann die Strömungsführung eingestellt werden. Abschließend wird eine weitere Endplatte mit Heizelement aufgelegt und das Gesamtsystem (wie in Abbildung 4-17 dargestellt) über Federn verspannt. Anschließend werden die erforderlichen Medienanschlüsse montiert. Der gesamte Montageprozess kann an einem Arbeitsplatz erfolgen und von einer entsprechend geschulten Person durchgeführt werden. Die erforderlichen Materialien können vorkonfektioniert für ein System über Sortierkästen bereitgestellt werden.

Die fertigen Systeme müssen anschließend für eine Funktionskontrolle auf dem Prüfstand getestet werden. Für eine Qualitätskontrolle bei höheren Stückzahlen wäre hier die Entwicklung einer speziellen Prüfapparatur, die ein einfaches Austauschen der zu prüfenden Bauteile ermöglicht, erforderlich.

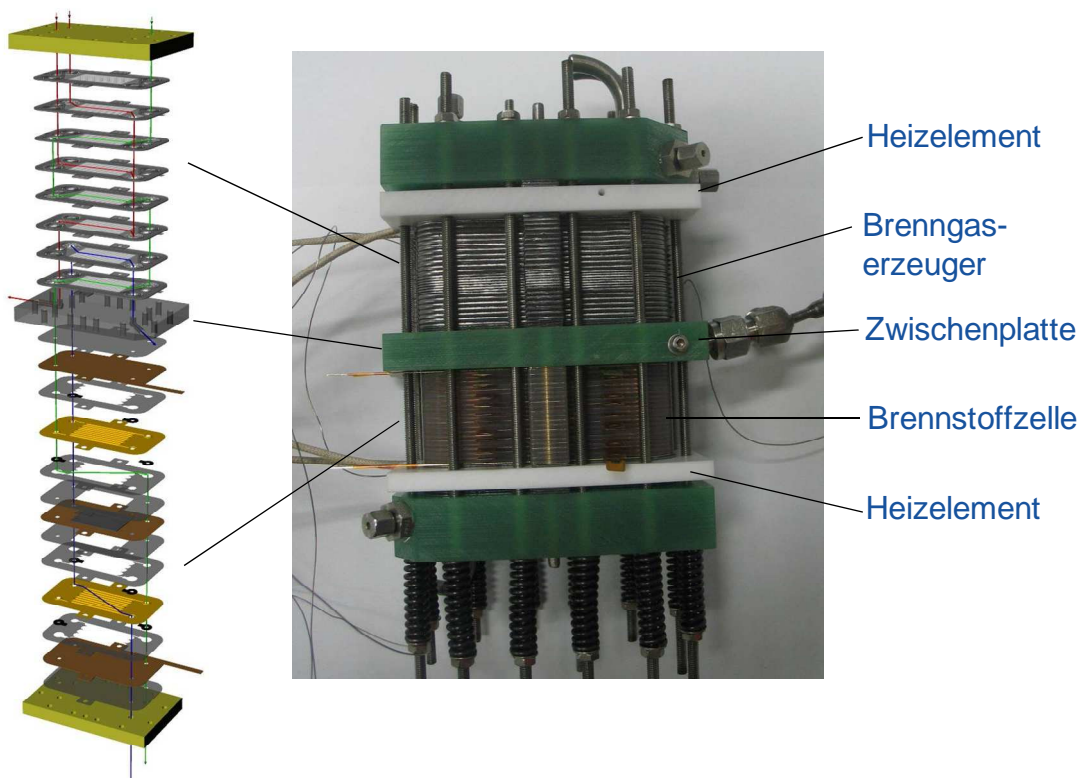


Abbildung 4-17 Montiertes Reformer-Brennstoffzellen-System

Neben dem Stapeln der Bauteile ist insbesondere die Fertigung der Dichtungen ein wichtiger Arbeitsschritt. Der händisch durchgeführte Fertigungsvorgang ist in Abbildung 4-18 dargestellt. Die Dichtung wird durch Ausstanzen mit einem spezifischen Schneidwerkzeug auf einer Handpresse hergestellt. Im dargestellten Fall werden Dichtungen für

den Reformer aus Graphit gestanzt, wobei gleichzeitig die Konturdichtung und die Ringdichtungen in einem Arbeitsschritt produziert werden können. Ein ähnliches Vorgehen ist auch für die Dichtungen der Brennstoffzelle möglich.

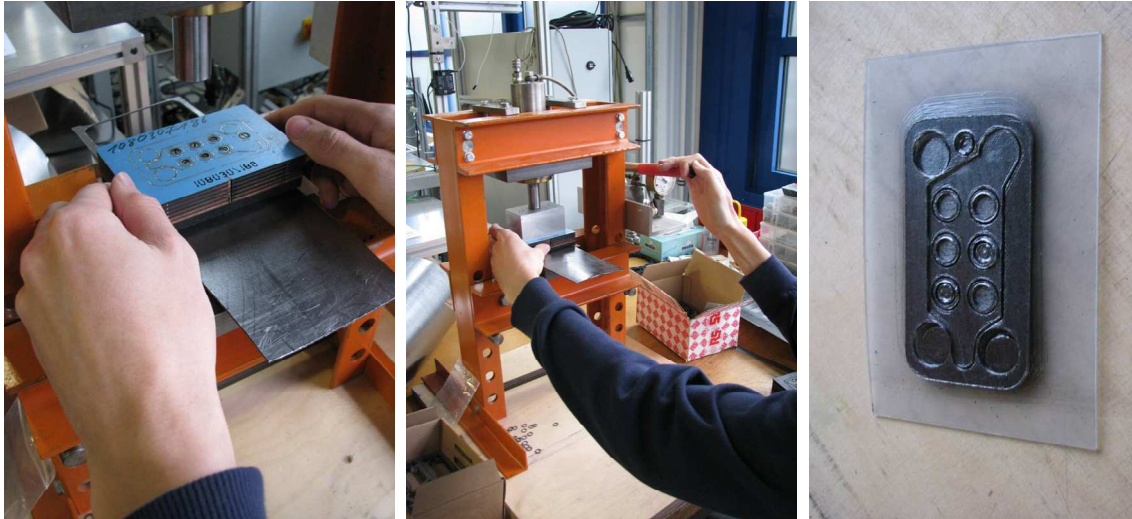


Abbildung 4-18 **Fertigung von Dichtungen für das Reformer-Brennstoffzellen-System**

Abschließend wird das Brennstoffzellen-Reformer-System zusammen mit der Mikrocontrollersteuerung und den peripheren Systemkomponenten in ein Gehäuse eingesetzt. Der in Abbildung 4-19 dargestellte Prototyp des Brennstoffzellensystems stellt einen Kompromiss aus Kompaktheit und Funktionalität dar. Insbesondere der System-Stack weist die angestrebte kompakte Bauweise auf. Die restliche Peripherie wurde noch nicht hinsichtlich des Bauraums optimiert.

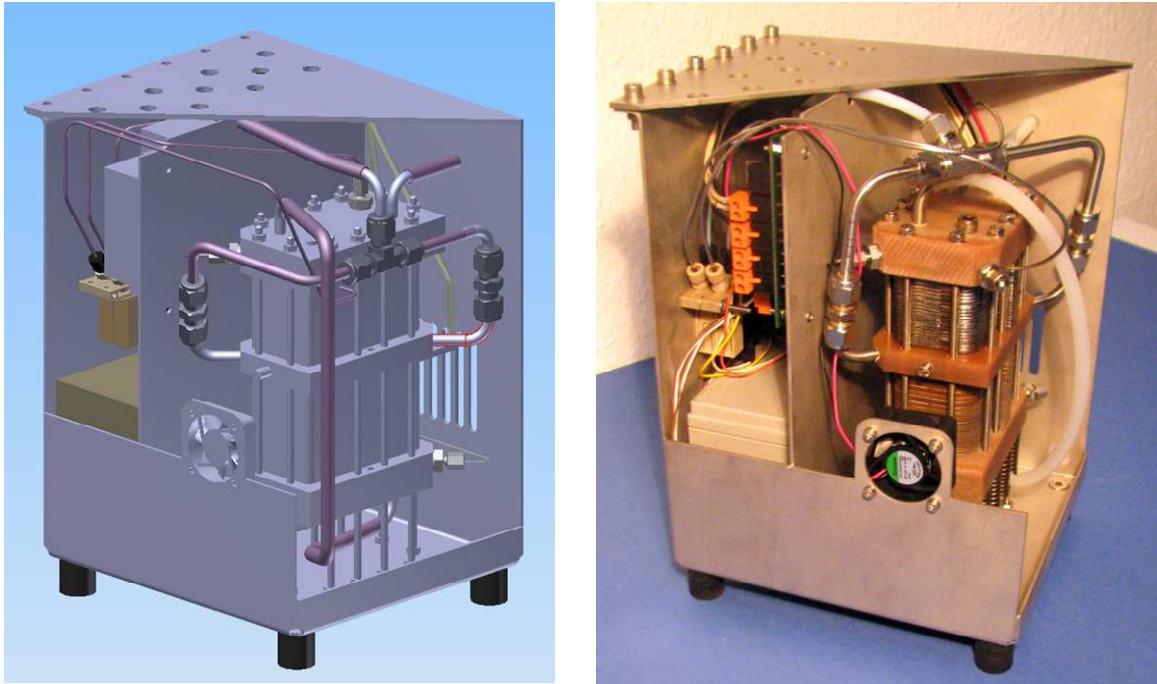


Abbildung 4-19 Prototyp des komplett montierten Brennstoffzellensystems

Insgesamt wurden zwei Systeme für den Laborbetrieb aufgebaut und zahlreiche Versuche der Inbetriebnahme und zur Entwicklung einer Regelungsstrategie durchgeführt. Im Zuge der Untersuchungen kam es anfangs zur thermischen Überlastung der Brennstoffzelle. Dies konnte durch Weiterentwicklung der Strategie und durch kleine konstruktive Verbesserungen im Laufe der Versuche vermieden werden. Im Labor konnte abschließend ein System mit 12 Betriebszyklen gezeigt werden. Dabei wurde die Luftversorgung allerdings mit einem Mass Flow Controller sichergestellt.

4.4. Zusammenfassung

Das MIMEMIZ-System wird sich aufgrund innovativer und materialsparender Fertigungskonzepte vor allem hinsichtlich der Kompaktheit und der Kosten von anderen Systemen abgrenzen können. Als Basismaterial werden Edelstahlfolien verwendet und sowohl für die Bipolarplatten der Brennstoffzelle als auch für den Mikroreformer durch die wirkmedienbasierte, hydrostatische Streckumformung (Hydroforming) umgeformt. Dieses Hydroformverfahren der borit Leichtbau-Technik erlaubt sehr kurze Taktzeiten und eine verzugsfreie Herstellung von Bipolarplatten und der Wärmeübertrager für die Reaktoren. Das zuvor vorgestellte Konzept besitzt eine geringe Komplexität und somit wenig unterschiedliche Einzelkomponenten. Daraus ergibt sich eine einfache Montage und geringe Kosten. Die Fertigung ist im Rahmen einer Handfertigungslinie darstellbar,

kann bei Bedarf aber auch auf große Stückzahlen angepasst werden. Eine deutliche Erhöhung des Standes der Technik ist durch das integrierte Reformdesign erzielt worden, durch das sämtliche Prozessstufen eines Brenngaserzeugersystems für flüssige Brennstoffe (Verdampfung / Reformierung / katalytische Verbrennung / reine Wärmeübertragung) in eine Komponente integriert werden konnten. Durch die auf die Brennstoffzelle abgestimmte Schnittstelle ist auch das Zusammenfügen von Brenngaserzeuger und Brennstoffzelle möglich, so dass sich letztlich für das Gesamtsystem eine integrierte Komponente ergibt. Zudem lässt sich das System einfach skalieren, so dass im Vergleich zu Mitbewerbern ein deutlich breiteres Leistungsspektrum abgebildet werden kann.

5. Projektbezogene Veröffentlichungen, Vorträge und Referate

Die zuvor dargestellten Berechnungen und Konzeptionen trugen zur Anmeldung eines Patentes mit dem Titel „Verfahren zur thermischen Integration eines Brennstoffzellensystems und Brennstoffzellensystem“ bei (Offenlegungsschrift vom 30.07.2009, Patent DE 10 2008 005 839 A1).

Des Weiteren wurden zahlreiche Veröffentlichungen gemacht bzw. Tagungsbeiträge angefertigt, die in der folgenden Tabelle zusammengefasst sind.

Zusammenstellung aller Veröffentlichungen und Tagungsbeiträge mit Inhalten aus dem Projekt MIMEMIZ

Publikationen	D. Wichmann, P. Engelhardt, K. Lucka, H. Köhne, M. Konrad, S. Köhne, <i>Design of a HT-PEM fuel cell system based on methanol steam reforming in a microstructure device</i> ; Konferenz der American Society of Engineers (ASME): European Fuel Cell Technology & Applications in Rom	11.-14. Dezember 2007
	Daniel Wichmann, Martin Konrad, Heinrich Köhne, <i>Dampfreformierung von Methanol in einem kompakten Wärmeübertrager für eine HT-Brennstoffzelle mit einer Leistung von 30 W</i> ; Der 4. Deutsche Wasserstoff Congress 2008 "Energie, Technik und Wirtschaft" in Essen, ISBN: 978-3-18-092036-8	20.-21. Februar 2008
	Daniel Wichmann, Andreas Klausmann, Dirk Bohmann, Stephan Köhne, Klaus Lucka, Heinrich Köhne, <i>Charakterisierung einer Mini-HT-PEM Brennstoffzelle im Leistungsbe- reich 2–30 W_{el}</i> ; VDI: 6. Fachtagung Brennstoffzelle "Forschung-Demonstration-Anwendung" in Braunschweig, S. 397-402, ISBN:978-3-18-092036-8	27.-28. Mai 2008
	Daniel Wichmann, Roland Wruck, Philip Engelhardt, Klaus Lucka, Heinrich Köhne, <i>Methanolbetriebene Brennstoffzelle für einen</i>	16.-17. September 2009

5. Projektbezogene Veröffentlichungen, Vorträge und Referate

<i>Golf-Caddy</i> , 6. Aachener Ölwärmekolloquium, Hamburg, ISBN: 978-3-8322-8484-8	
D. Wichmann, R. Wruck, A. Klausmann, K. Lucka, H. Köhne, <i>Entwicklung eines methanolbasierten Brennstoffzellensystems für Golf-Caddies</i> , Ingenieurspiegel, 4/2008, Public Verlagsgesellschaft und Anzeigenagentur	April 2008
A. Klausmann, D. Wichmann, K. Lucka, H. Köhne, <i>Development of a compact control system for innovative methanol driven hybrid power packs</i> , Embedded World 2009, Nürnberg, ISBN: 978-3-7723-3798-7	März 2009
Daniel Wichmann, Roland Wruck, Philip Engelhardt, Klaus Lucka, Heinrich Köhne, <i>Development of a Highly Integrated Micro Fuel Processor Based on Methanol Steam Reforming for a HT-PEM Fuel Cell with an Electric Power of 30 W</i> , Fuel Cell Seminar and Exposition, Palm Springs, CA, USA	November 2009
Daniel Wichmann, Roland Wruck, Philip Engelhardt, Klaus Lucka, Heinrich Köhne, <i>Development of a Highly Integrated Micro Fuel Processor Based on Methanol Steam Reforming for a HT-PEM Fuel Cell with an Electric Power of 30 W</i> , ECS Transactions, Band 26, Ausgabe 1, Seiten 505 - 515	November 2009
Daniel Wichmann, <i>Untersuchungen zur Entwicklung eines Mikrobrennstoffzellensystems basierend auf Dampfreformierung von Methanol und einer HT-PEM Brennstoffzelle</i> , Dissertation RWTH-Aachen, Shaker Verlag, ISBN: 978-3-8322-9059-7	April 2010

6. Literatur

- [Casio 06] Internetauftritt Fuel Cell Market Japan, 22ml Cell Stack Generates 19.4W - Micro Fuel Cell, 2006
- [Heinze. 06a] Heinzl, A.; Mahlendorf, F.; Roes, J.; „Brennstoffzellen – Entwicklung, Technologie, Anwendung“, C.F. Müller Verlag, ISBN 3-7880-7741-7, Heidelberg 2006
- [Heinze. 06b] Heinzl, A.; Burfeind, J.; Bandlamudi, G. ;Kundler, I.; „Betriebserfahrungen mit Hochtemperatur-PEM von PEMEAS“, Riesaer Brennstoffzellen-Workshop TGZ Technologieorientierten Gründerzentrum, Glaubitz, 24. Januar 2006
- [Kurzwe. 03] Kurzweil, P.; „Brennstoffzellentechnik – Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen“, Vieweg Verlag, 2003, ISBN 3-528-03965-5
- [Motoro. 05] High Temperature PEM, Fuel Cell and Stack performance, Allison M. Fisher, Ph.D. Principal Staff Scientist-Motorola Labs, Stephen Samms, Saurabh Vyas, Tho Van Nguyen, Jerry Hallmark 2100 E. Elliot Rd., Tempe, AZ 85284, Fuel Cell Seminar, 2005
- [Wichma. 10] Wichmann, D.; „Untersuchungen zur Entwicklung eines Mikrobrennstoffzellensystems basierend auf der Dampfreformierung von Methanol und einer HT-PEM Brennstoffzelle“, Shaker Verlag, ISBN 978-3-8322-9059, Aachen 2010