

EASYCELL

Designoptimierung von PEM Brennstoffzellen

T. Schlauf, C. Kukla

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

87/2006

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

EASYCELL

Designoptimierung von PEM Brennstoffzellen

Thomas Schlauf, Dr. Christian Kukla
FOTEC Forschungs- und Technologietransfer GmbH

Wiener Neustadt, April 2006

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT. Sie wurde im Jahr 2000 vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie im Rahmen des Impulsprogramms Nachhaltig Wirtschaften als mehrjährige Forschungs- und Technologieinitiative gestartet. Mit der Programmlinie FABRIK DER ZUKUNFT sollen durch Forschung und Technologieentwicklung innovative Technologiesprünge mit hohem Marktpotential initiiert und realisiert werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements und der großen Kooperationsbereitschaft der beteiligten Forschungseinrichtungen und Betriebe konnten bereits richtungsweisende und auch international anerkannte Ergebnisse erzielt werden. Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt über den hohen Erwartungen und ist eine gute Grundlage für erfolgreiche Umsetzungsstrategien. Anfragen bezüglich internationaler Kooperationen bestätigen die in FABRIK DER ZUKUNFT verfolgte Strategie.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse – seien es Grundlagenarbeiten, Konzepte oder Technologieentwicklungen – erfolgreich umzusetzen und zu verbreiten. Dies soll nach Möglichkeit durch konkrete Demonstrationsprojekte unterstützt werden. Deshalb ist es auch ein spezielles Anliegen die aktuellen Ergebnisse der interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Homepage www.FABRIKderZukunft.at und die Schriftenreihe gewährleistet wird.

Dipl. Ing. Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Kurzfassung	9
1.1 Kurzfassung 1 Seite	9
1.2 Abstract 1 page	10
1.3 Kurzfassung 5 Seiten	11
1.4 Abstract 5 pages	16
2 Einleitung	20
2.1 Allgemeine Einleitung in die Thematik.....	20
2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zu diesem Thema	22
2.3 Fokus/Schwerpunkte der Arbeit.....	22
2.4 Einpassung in die Programmlinie ‚Fabrik der Zukunft‘.....	22
2.5 Kurzbeschreibung des Aufbaus des Endberichts.....	24
3 Ziele des Projektes	25
4 Inhalte und Ergebnisse des Projektes	26
4.1 Verwendete Methoden und Daten.....	26
4.2 Beschreibung des Standes der Technik	26
4.3 Beschreibung der Neuerungen und der Vorteile gegenüber dem Ist-Stand	28
4.4 Projektergebnisse Arbeitspaket 1 Wassermanagement bei PEM-Brennstoffzellen	29
4.5 Projektergebnisse Arbeitspaket 2 Strukturierte Katalysatoraufbringung	32
4.6 Projektergebnisse Arbeitspaket 3 Herstellung der EasyCell	35
4.6.1 Konstruktion der EasyCell.....	35
4.6.2 Herstellung der Einzelkomponenten	37
4.6.3 Bau einer Versuchsanordnung	55
4.6.4 Zusammenbau der EasyCell.....	65
4.7 Projektergebnisse Arbeitspaket 4 Test der EasyCell.....	76
4.7.1 Fertigungstechnische Evaluierung	76
4.7.2 Ermittlung der Leistungsdaten der EasyCell	77

Inhaltsverzeichnis

Seite

5	Detailangaben zu den Zielen der ‚Fabrik der Zukunft‘	87
5.1	Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ und den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung	87
5.2	Einbeziehung der Zielgruppen in das Projekt und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt	88
5.3	Beschreibung der Potenziale für das Projekt	89
6	Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen	90
6.1	Was sind die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse für das Projektteam? (fachliche Einschätzung)	90
6.2	Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?	91
6.3	Für welche anderen Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?	92
7	Diskussion über die Nachhaltigkeit von Brennstoffzellen	93
7.1	Allgemeine Betrachtungen	93
7.2	Treibstoff für Brennstoffzellen	94
7.3	Die Leistungsdichte von Brennstoffzellen	96
7.4	Werkstoffe und Fertigungsverfahren	97
7.5	Ausblick	98
8	Ausblick und Empfehlungen	99
9	Verzeichnisse	100
9.1	Literaturverzeichnis	100
9.2	Abbildungsverzeichnis	101
9.3	Tabellenverzeichnis	103

1 Kurzfassung

1.1 Kurzfassung 1 Seite

Ziel des Projektes war die Entwicklung einer optimierten Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle) sowie eines Herstellverfahrens für Prototypen, wobei besonderes Augenmerk auf eine Vereinfachung des Stoffmanagements, auf die Reduzierung der Nebenaggregate und auf die Massenfertigungstauglichkeit gerichtet war.

Die Fragestellungen im Projekt befassten sich mit der Verbesserung der Struktur von PEM-Brennstoffzellen, im besonderen mit der Realisierung einer lateral betriebenen PEM-Brennstoffzelle (EasyCell).

Durch den lateralen Betrieb der EasyCell war es möglich, die üblicherweise erforderliche Befeuchtungseinheit bei Zellen konventioneller Bauart gänzlich wegzulassen, was das Stoffmanagement wesentlich vereinfacht. Darüber hinaus konnte aufgrund dieser Einsparung neben dem Kostenvorteil auch die Baugröße und somit das Baugewicht der EasyCell im Vergleich zu Zellen konventioneller Bauart deutlich verringert werden. Dies ist speziell für den Einsatz in mobilen Anwendungen von besonderer Bedeutung.

Die Entwicklung von lateralen Brennstoffzellen steht erst am Beginn. In diesem Projekt wurde die weltweit erste laterale PEM-Brennstoffzelle dieser Art gebaut. Nach einer Vorstudie zum Wassermanagement der Membran wurde ein Konzept zur Herstellung lateral betriebener PEM-Brennstoffzellen entwickelt und vom Projektkonsortium zum Patent angemeldet. Zur Herstellung der Grundkörper einer EasyCell wurde auf das kostengünstige Massenfertigungsverfahren Spritzgießen zurückgegriffen.

Die einzelnen Verfahrensschritte zur Herstellung einer solchen lateralen PEM-Brennstoffzelle wurden im Rahmen des Projektes soweit entwickelt, dass es möglich war unterschiedliche Prototypserien zu bauen und zu testen. Es konnte erfolgreich demonstriert werden, dass ein lateraler Betrieb von PEM-Brennstoffzellen möglich ist. Verschiedene Variationen im Aufbau der EasyCell wurden miteinander verglichen, um Erfahrungswerte für lateral betriebene Brennstoffzellen zu generieren.

Die Leistungsdaten der realisierten Prototypserien der EasyCell konnten durch Optimierungsarbeiten zwar sukzessive verbessert werden, jedoch liegen diese noch unter denen bereits existierender PEM-Brennstoffzellen konventioneller Bauart.

In Anbetracht der Vorteile der EasyCell verglichen mit Zellen konventioneller Bauart und des noch existierenden Optimierungspotentials ist es sinnvoll, die Forschungsarbeiten an der EasyCell fortzuführen.

1.2 Abstract 1 page

The aim of the project was to develop an optimized polymer-electrolyte-membrane-fuel-cell (PEM-fuel cell) and to develop a production procedure for the production of prototypes of this optimized fuel cell. The main attention was put on the simplification of the management of the reactants, the reduction of the supporting devices and the possibility of mass production of this fuel cell.

The questions in the project were about enhancing the structure of conventional PEM-fuel cells and the realisation of a lateral operating PEM-fuel cell (EasyCell).

By realizing a lateral operating PEM-fuel cell it was possible to leave out the conventionally used humidification unit for a PEM-fuel cell. So it was possible to simplify the reactant-management significantly. Compared to conventional fuel cells this means a reduction of costs, overall size and weight. This is very important for mobile applications.

The development of lateral operating fuel cells is just at the beginning. In this project the worldwide first lateral PEM-fuel cell was realized. After a preliminary survey on the water-management of membranes a concept to produce a lateral operating PEM-fuel cell was developed and patented. To manufacture the EasyCell the cost-effective injection moulding process was taken into account.

The single process steps for the production of the EasyCell were developed so far, that it was possible to built up and test different prototype series. It was successfully proved that the lateral operation modus of the EasyCell works. Different assemblies (prototype series) of the EasyCell were tested and compared to gain extensive experience in the lateral operating modus of the EasyCell.

The performance characteristics of the prototype series were enhanced through optimization of the components, but they are still beneath performance characteristics of conventional PEM-fuel cells.

Considering the optimization capability and the advantages of the EasyCell compared to conventional PEM-fuel cells it is necessary to continue research and development work on the EasyCell.

1.3 Kurzfassung 5 Seiten

Motivation

Brennstoffzellen sind ein ressourcenschonender Weg zur Energieumwandlung. Fortschritte bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen bedeuten daher einen Schritt in eine schadstoffärmere und saubere Zukunft. Da Brennstoffzellensystemen erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit die gebührende Bedeutung beigemessen wird, stehen Technologien zur Massenfertigung von Brennstoffzellenkomponenten noch nicht im erforderlichen Umfang zur Verfügung.

Heute werden Brennstoffzellen bzw. deren Komponenten großteils unter Verwendung teurer Einzelfertigungsprozesse und teilweise durch manuelle Montage realisiert, was sich nachteilig auf die Herstellkosten auswirkt. Ein breiter Einsatz von Brennstoffzellensystemen scheitert aufgrund des Fehlens von geeigneten Massenfertigungsverfahren, am hohen Preis.

Gelingt es, Massenfertigungsverfahren für die Herstellung von Komponenten für Brennstoffzellensysteme zu erschließen und eine Optimierung der Einzelkomponenten vorzunehmen, so stehen auch Brennstoffzellensysteme für den Einsatz in Artikeln des täglichen Bedarfs zur Verfügung.

Ziel des Projektes

Ziel des Projektes war es, die räumliche Struktur einer PEM-Brennstoffzelle durch eine planare Struktur zu substituieren. Damit sollte versucht werden, Strukturänderungen wie sie in der Halbleitertechnik vor 40 Jahren stattgefunden haben, analog auch für die Brennstoffzellentechnik zu erproben.

Primäres Ziel des Projektes war es demnach abzuklären, ob Komponenten von Polymer-Elektrolyt-Membran Brennstoffzellen (PEM-Brennstoffzellen) in Richtung Verringerung der Baugröße, Einsparung von Einzelkomponenten und Nebenaggregaten in kostengünstiger Massenfertigung herzustellen sind.

Um diese Ziele zu erfüllen sollte eine lateral betriebene Brennstoffzelle (EasyCell) realisiert werden, bei der die Befeuchtungseinheit für den Wasserstoffstrom zur Gänze weggelassen werden soll.

Inhalt des Projektes

Der Umsetzung des Projektes standen zu Projektbeginn aufgrund der Neuheit der EasyCell die folgenden Fragen entgegen, die im Rahmen des Projektes abgeklärt werden mussten:

- Ist ein lateraler Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle grundsätzlich möglich? (Untersuchung der Wasserausbreitung in Polymer-Elektrolyt-Membranen)

- Wie kann das Katalysatormaterial an geeigneten Stellen im Flow-field gezielt und strukturiert aufgebracht werden?
- Wie muss das mikrostrukturierte Flow-field ausgelegt sein, sodass eine brauchbare Befeuchtung der Membran gewährleistet werden kann?
- Ist der Grundkörper der EasyCell mit der notwendigen Mikrostrukturierung (Mikrostrukturen im Bereich von 100 μm) mit einem geeigneten Massenfertigungsverfahren in der geforderten Qualität herstellbar?
- Lassen sich Prototypen der EasyCell in der geforderten Qualität bauen?
- Sind die typischen Leistungsdaten der ‚EasyCell‘ erfassbar?

Methoden der Bearbeitung

Die im Projekt verwendete bzw. zum Einsatz gelangte Methodik kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Literaturrecherche (inkl. Internet)
- Expertenbefragung
- Praktische Untersuchung der Wasserausbreitung an einem Prüfstand
- Konstruktive Arbeiten und Überlegungen zur Entwicklung eines Konzeptes für die strukturierte Katalysatoraufbringung
- Konstruktive Arbeiten und Überlegungen zur Auslegung des Grundkörpers der ‚EasyCell‘
- Praktische Spritzversuche und Auswertung
- Herstellung von Prototypserien der EasyCell
- Charakterisierung der hergestellten Prototypserien der EasyCell

Seitens Fotec Forschungs- und Technologietransfer GmbH wurde auf Know-how im Bereich der Fertigungstechnik von Komponenten für Brennstoffzellen mit Schwerpunkt auf das Mikrospritzgießen zurückgegriffen.

Im Themenbereich Brennstoffzellen-Technologie bzw. Elektrochemie wurde auf das Know-how und die Erfahrungen des Forschungspartners EICHEM Kompetenzzentrum für Angewandte Elektrochemie GmbH zurückgegriffen.

Zur Herstellung der Grundplatten, wurde ein Mikrospritzgießwerkzeug vom Firmenpartner HTP High Tech Plastics AG verwendet, mit welchem auf einer Mikrospritzgießmaschine des Firmenpartners Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH Grundkörper für die EasyCell gefertigt wurden.

Projektergebnisse

Die Fragestellungen, die zugleich Inhalt des Projektes waren, können nach Beendigung des Projektes wie folgt beantwortet werden:

- Ist ein lateraler Betrieb grundsätzlich möglich? (Untersuchung der Wasserausbreitung in Polymer-Elektrolyt-Membranen)

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich ein auf eine typische Membran aufgetragener Wassertropfen 2 mm in der Membran ausbreitet. Dieser Wert ließ darauf schließen, dass die Befeuchtung einer EasyCell ohne Befeuchtungseinheit, sondern lediglich durch das in der EasyCell entstehende Reaktionswasser erfolgen kann.

- Wie kann das Katalysatormaterial an geeigneten Stellen im Flow-field gezielt und strukturiert aufgebracht werden?

Zur strukturierten Katalysatoraufbringung wurde ein spezielles Verfahren entwickelt, bei dem durch das Einbringen eines Trägermaterials in die Gaskanäle des Grundkörpers der EasyCell eine Katalysatorschicht aufgebracht werden konnte. Im Rahmen des Projektes wurde die Eignung des Verfahrens zur Herstellung von EasyCells erfolgreich demonstriert.

- Wie muss das mikrostrukturierte Flow-field ausgelegt sein, sodass eine brauchbare Befeuchtung der Membran gewährleistet werden kann?

Grundlage zur Beantwortung dieser Frage bildeten die durchgeführten Befeuchtungsversuche zur Wasserausbreitung in der Membran. Die Mikrostrukturen auf dem Grundkörper zur Trennung der Gaskanäle konnten in einem Bereich von 100 µm ausgelegt werden.

- Ist der Grundkörper der ‚EasyCell‘ mit der notwendigen Mikrostrukturierung (Mikrostrukturen im Bereich von 100 µm) mit einem geeigneten Massenfertigungsverfahren in der geforderten Qualität herstellbar?

Mit Hilfe des Mikrospritzgießverfahrens und der Unterstützung der beiden Firmenpartner HTP High Tech Plastics AG (Mikroformenbau) und Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH (Hersteller von Mikrospritzgießmaschinen) konnte die Herstellung der Grundkörper einer EasyCell unter den Gesichtspunkten einer Massenfertigung erfolgreich bewerkstelligt werden.

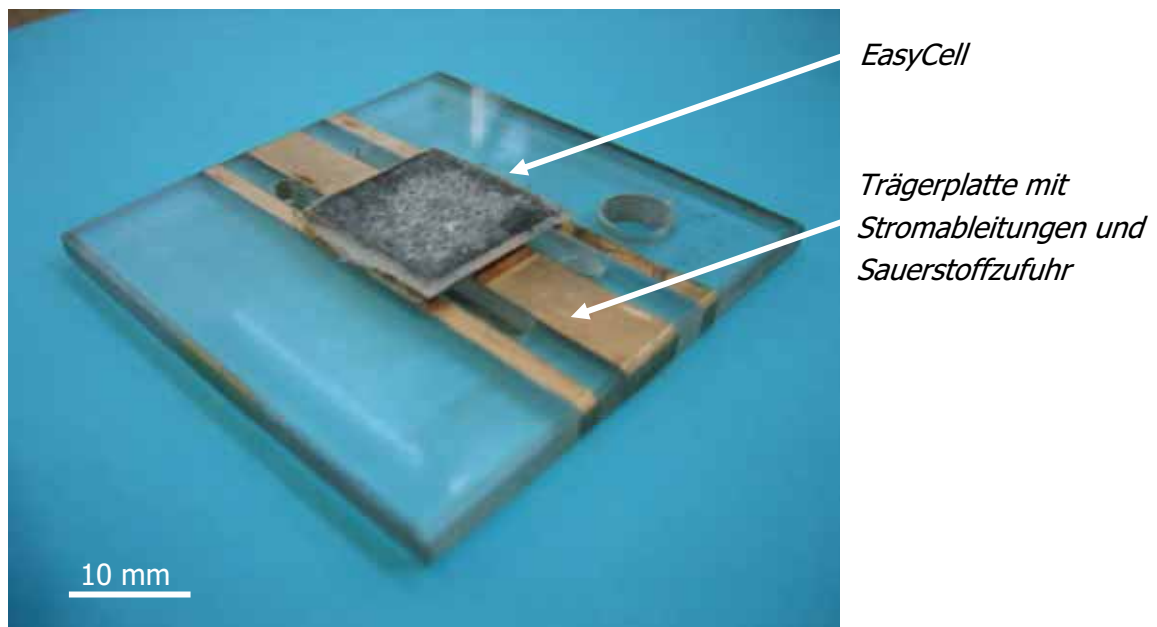
- Lassen sich Prototypen der ‚EasyCell‘ in der geforderten Qualität bauen?

Neben dem Grundkörper der EasyCell, welcher mittels Mikrospritzgießen hergestellt wurde, wurde E/K-Material und Membranmaterial bei Lieferanten zugekauft. Zum Bau der Prototypserien wurden umfangreiche Vorversuche zur Aufbringung von Membran- und E/K-Material durchgeführt. Der Zusammenbau der EasyCell konnte im Rahmen des Projektes erfolgreich demonstriert werden.

- Sind die typischen Leistungsdaten der ‚EasyCell‘ erfassbar?

Aufgrund der Neuheit aber auch der Kleinheit der EasyCell mussten die Vorrichtungen zur Erfassung der Leistungsdaten entsprechend angepasst werden. Die elektrotechnische Charakterisierung der EasyCell zeigte, dass die Leistungsdaten der EasyCell im Vergleich zu jenen konventioneller vertikaler Brennstoffzellen in weiteren Entwicklungsarbeiten noch verbessert werden müssen.

Die folgende Abbildung zeigt einen Prototyp der im Rahmen des Projektes entwickelten und realisierten EasyCell mit einer Hilfsträgerplatte zur Aufnahme der Stromableitungen und der Sauerstoffzufuhr.



EasyCell

*Trägerplatte mit
Stromableitungen und
Sauerstoffzufuhr*

EasyCell

Fazit

Im Zuge des Projekts hat das Projektteam eine neuartige und lateral betriebene Brennstoffzelle entwickelt (EasyCell), Prototypserien der EasyCell hergestellt und diese auf ihre Leistungsdaten untersucht. Dabei konnte zur Fertigung der Grundplatte das kostengünstige Massenfertigungsverfahren Spritzgießen herangezogen werden.

Die Membran- und die strukturierte Katalysatoraufbringung wurde durch die Entwicklung eines eigenen Verfahrens zur Herstellung der EasyCell bewerkstelligt, wobei in Hinblick auf eine Massenproduktion zahlreiche begleitende Versuche und Untersuchungen durchgeführt wurden.

Die Funktion der hergestellten Prototypserien konnte erfolgreich demonstriert werden, wobei bei der EasyCell die bei Zellen konventioneller Bauart notwendige Befeuchtungseinheit für den

Wasserstoffstrom komplett entfallen kann. Das bei der EasyCell entstehende Reaktionswasser kann nämlich direkt zur Befeuchtung des Wasserstoffstroms herangezogen werden. Daraus ergibt sich nicht nur eine Kosteneinsparung und eine Verringerung von Baugröße und –gewicht bei der EasyCell sondern auch eine starke Vereinfachung des Stoffmanagements.

Die Leistungsdaten der im Rahmen des Projektes hergestellten Prototypserien der EasyCell sehen sehr vielversprechend aus, sind jedoch vom Zielwert noch entfernt. Weitere Entwicklungs- und Optimierungsschritte sind erforderlich, die vor allem die Verfahren zur Herstellung des Elektroden-Membran-Verbundes der EasyCell verbessern müssen. Darüber hinaus müsste die volumetrische Leistungsdichte der lateralen Zelle durch konstruktive Maßnahmen im Bereich des Grundkörpers weiter gesteigert werden.

Die Projektergebnisse weisen für die folgenden Zielgruppen Relevanz auf:

- Produzenten, welche die EasyCell herstellen und vertreiben wollen
- Produzenten, welche die EasyCell als Energiewandler für ihre Produkte heranziehen wollen
- Endverbraucher (Konsumenten)

Durch die Berücksichtigung einer kostengünstigen Massenfertigung der EasyCell bei der Entwicklung des Fertigungskonzeptes wurden wichtige Bedürfnisse der beiden erstgenannten Zielgruppen frühzeitig berücksichtigt.

Für den Endverbraucher ergibt sich der potentielle Nutzen, mittelfristig Produkte erwerben zu können, in welchen die EasyCell als umweltschonender und störsicherer Energiewandler eingesetzt ist. Dies führt langfristig zu einer Kostenersparnis für diese Zielgruppe.

Ausblick

Um einen weiteren signifikanten Schritt in Richtung Steigerung der Leistungsdaten der EasyCell und somit in Richtung Anwendung anzustellen ist eine Optimierung der einzelnen Komponenten bzw. des Aufbaus der lateralen PEM-Brennstoffzelle erforderlich.

Das Projektteam bestehend aus den Forschungsinstitutionen Fotec Forschungs- und Technologietransfer GmbH und ECHEM Kompetenzzentrum für Angewandte Elektrochemie GmbH sowie den beiden Firmenpartnern HTP High Tech Plastics AG und Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH beabsichtigt, diese erforderlichen Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten in einem Anschlussprojekt im Rahmen der 4. Ausschreibung von Fabrik der Zukunft einzureichen.

1.4 Abstract 5 pages

Motivation

Fuel Cells are an efficient and resource-saving way to convert chemical energy directly into electrical energy. Technological progress in the area of fuel cells is an important step into a future with less environmental pollution. Since fuel cell technology gains in importance, technologies for mass production of fuel cell components are not yet available sufficiently.

Nowadays fuel cells, or components thereof, are manufactured in an expensive way of batch-production and by manually mounting the components to a fuel cell. This is a big cost disadvantage. A wide-spread use of fuel cells fails due to the high price, caused by the lack of mass production methods.

If mass production methods can be adopted and can be made available for the production of fuel cells components and if there can be realized an optimization of the components, fuel cell systems will be available for many products of the daily life.

Aim of the project

The aim of the project was to replace the steric structure of a PEM-fuel cell through a planar structure. Such structural modifications were done 40 years ago in the semiconductor technology. In the project this was tested for fuel cells as well.

Main aim of the project was to find out if a reduction in overall size, supporting devices and components of a polymer-electrolyte-membrane fuel cell is possible and to produce them with cost effective mass production.

To realize the aims above a lateral operating fuel cell (EasyCell) has been realized in the project, where the additional humidification unit for the hydrogen flow of conventional PEM-fuel cells was not necessary any more.

Content of the project

From the point of process engineering open questions confront with the industrial implementation. These open questions should be clarified by the project:

- Is the lateral operation modus of a PEM-fuel cell possible? (Investigation of the water-management in a polymer-electrolyte-membrane)
- Is it possible to adequately apply catalyst material in the relevant areas of the flow field?
- How has the micro-structured flow field to be designed to enable a suitable humidification of the polymer-electrolyte-membrane without a humidification unit?
- Is it possible to produce micro-structures (in the range of 100 μ m) with an appropriate mass production technology in the required quality?

- Can the prototypes of the EasyCell be assembled in the right quality?
- Can the typical performance characteristics of the EasyCell be measured?

Methods of work

The following methods of work were used in the project:

- Literature research (incl. internet)
- Interviews with experts
- Practical investigation on water-management with testing equipment
- Designing work and considerations about a concept for accurately applying catalyst in a structured way
- Designing work and considerations about the base plate design of the EasyCell
- Practical injection moulding tests and evaluation of the tests
- Assembling of prototype series of the EasyCell
- Characterisation of assembled prototypes of the EasyCell

The part of Fotec Forschungs- und Technologietransfer GmbH in the project was to bring in know-how about production engineering in general and micro injection moulding in special.

In the field of fuel cell-technology and electrochemistry know-how and experience of the research partner ECHEM Kompetenzzentrum für Angewandte Elektrochemie GmbH was used.

To produce the base plates a micro injection moulding tool of the project partner HTP High Tech Plastics AG was used. With this tool the base plates were manufactured on a micro injection moulding machine of the project partner Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH.

Project results

Answers to the questions forming the content of the project may now be given as follows:

- Is the lateral operation modus of a PEM-fuel cell possible? (Investigation of the water-management in a polymer-electrolyte-membrane)
The tests have shown that a water drop applied on a typical membrane spreads around 2mm in the membrane. This fact enables a humidification through reactant water produced in operation and additional humidification units can be avoided.
- Is it possible to adequately apply catalyst material in the relevant areas of the flow field?
To apply the catalyst a special method was developed. Through filling the channels with a carrier material the catalyst layer could be applied. During the project work this method was proofed successfully.
- How has the micro-structured flow field to be designed to enable a suitable humidification of the polymer-electrolyte-membrane without a humidification unit?

To solve this questions the humidification tests of the water spread in the membrane built the basis. It is possible to design the microstructures that separate the gas channels on the base plate in the range of 100 μm).

- Is it possible to produce microstructures (in the range of 100 μm) with an appropriate mass production technology in the required quality?

With the use of the injection moulding process and the support of the two company partner HTP High Tech Plastics AG (micro mould design and construction) and Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH (manufacturer of microinjectionmoulding machines) the manufacturing of the base plate of the EasyCell could be enabled.

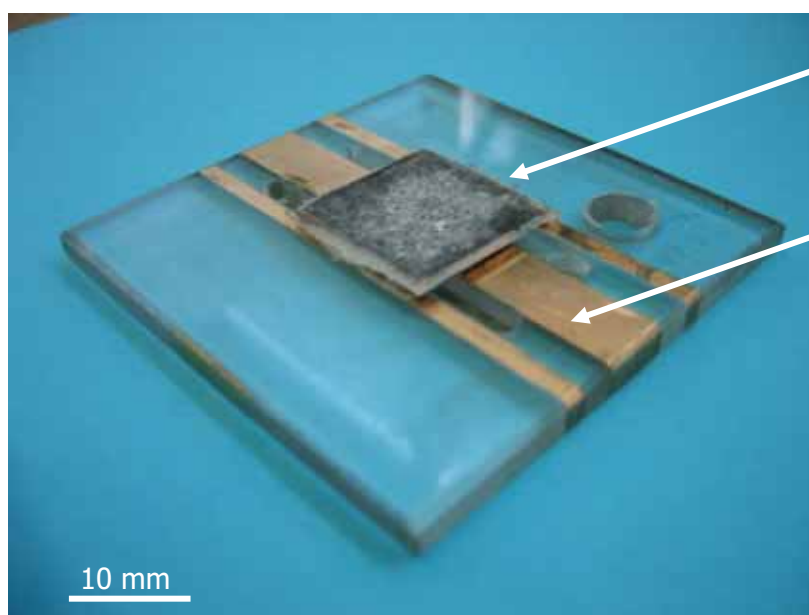
- Can the prototypes of the EasyCell be assembled in the right quality?

Beside the base plate of the EasyCell which was produced with the micro injection moulding process E/K-material and membrane material was ordered from suppliers. For assembling the prototypes substantial preliminary tests to apply membrane and E/K-material were done. The assembly of the EasyCell could be proofed successfully during the project.

- Can the typical performance characteristics of the EasyCell be measured?

According to the new innovation and the smallness of the EasyCell the devices to detect the performance characteristics had to be modified. The electrochemical characterization shows that the performance data of the EasyCell compared to conventional vertical operating fuel cells have to be developed further.

The following picture shows a prototype of the EasyCell on a carrier plate with current conductions and the mechanism for oxygen supply.



EasyCell

Carrier plate with current conductions and oxygen supply

EasyCell

Conclusion

During the project a novel lateral operating PEM-fuel cell was developed (EasyCell), prototypes of the EasyCell were assembled and the performance characteristics were tested. To manufacture the base plate the cost effective mass production process injection moulding was used.

The application of the membrane and the catalyst was realized through a special method. In terms of mass production numerous of accompanying tests were done.

The function of the produced prototype series was proved successfully. The additional humidification unit a conventional fuel cell needs can be avoided in an EasyCell. The reactant water through the reaction in the EasyCell can directly be used for the humidification for the hydrogen flow. This results in savings of costs, overall size and weight as well as in a simplification of the reactant-management.

The performance characteristics of the EasyCell are promising but they are still under the focused performance. Further development and optimization steps are necessary. Mainly the steps for electrode-membrane combination are important and have to be improved. Additionally the volumetric power density has to be improved by design modifications of the base plate.

The project results show relevance for the following target groups:

- Potential producer of the EasyCell
- Potential producer of products in which the EasyCell is used as energy
- End-user

Through consideration of cost effective mass production of the EasyCell during the development of a manufacturing concept it was possible to meet the requirements of the first two groups at an early stage.

The end-user will get a middle-term benefit in being able to purchase products which include the EasyCell as an environmentally sound and fail-save energy converter. In a long-term view this results in cost savings for this group.

Future prospect

For a further enhancement of the performance characteristics of the EasyCell toward applications, an optimization of the different components and the assembly of the lateral PEM-fuel cell is necessary.

The project team consisting of the research organisations Fotec Forschungs- und Technologietransfer GmbH and ECHEM Kompetenzzentrum für Angewandte Elektrochemie GmbH as well as the two companies HTP High Tech Plastics AG and Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH intend to propose a follow-up project covering the necessary development and optimization work to 'Fabrik der Zukunft'

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einleitung in die Thematik

Die Prinzipien der Brennstoffzelle sind seit 1839 bekannt. Erst in unserer heutigen Zeit hat dieses Prinzip technische Bedeutung erlangt und wird in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt.

Diese Anwendungen reichen von stationären Systemen in Kraftwerken über den Einsatz im Automobil bis zu Kleinsystemen in portablen Geräten wie Laptops oder Handys. Dabei kommen jeweils unterschiedliche Konstruktionsprinzipien einer Brennstoffzelle zu tragen. Z.B. wird die SOFC - Solid Oxide Fuel Cell aufgrund der hohen Arbeitstemperaturen von rd. 900°C vor allem in stationären Anwendungen ohne viele Ein-/Ausschaltzyklen eingesetzt.

Für Kleinsysteme, vom PKW bis zum Handy, erweist sich das Konzept einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle) mit einer Arbeitstemperatur von rund 80°C als das praktikabelste.

Eine PEM-Brennstoffzelle besteht aus einer protonenleitenden Polymermembran, auf der an beiden Seiten Elektroden bestehend aus Kohle gemischt mit Edelmetall (Platin), eine Gasdiffusionslage (GDL) und eine Bipolarplatte angebracht sind. Dieser allgemeine Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle kann der folgenden Abbildung 1 entnommen werden.

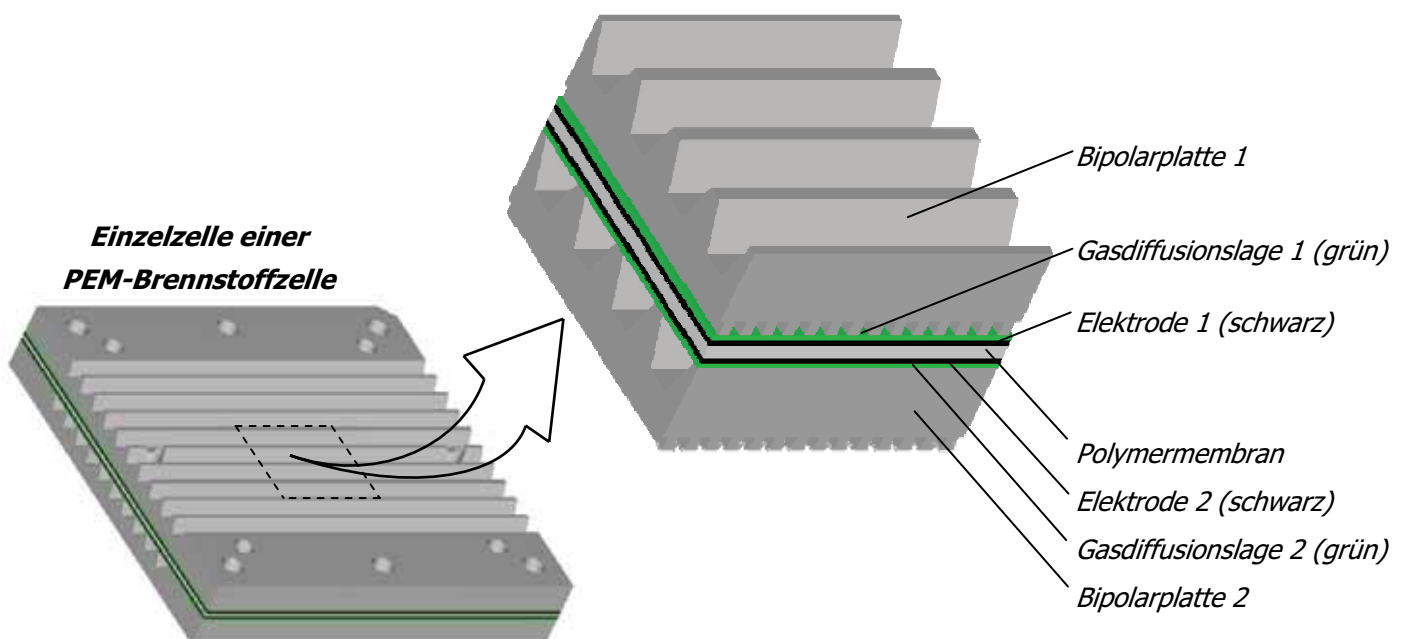


Abbildung 1: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle

Der an die Anode zugeführte Wasserstoff wird dort elektrochemisch oxidiert. Die dabei entstehenden freien Ladungsträger fließen über einen externen Stromkreis an die Kathode. Dort reduzieren sie den an die Kathode herangeführten Sauerstoff. Die an der Anode entstehenden Protonen wandern durch die protonenleitende Polymermembran und vereinigen sich an der Kathode mit dem reduzierten Luftsauerstoff zu Wasser. Das entstehende Wasser wird je nach Arbeitstemperatur aus der Zelle flüssig oder dampfförmig ausgebracht.

In einer Brennstoffzelle wird also eine chemische Reaktion durchgeführt, die räumlich getrennt an zwei Elektroden abläuft. So kann die chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt werden. Da dieser Prozess nicht dem Carnot Faktor der Verbrennungskraftmaschinen unterliegt, liegen die theoretisch erreichbaren Wirkungsgrade bei 90 bis 100%. Dieser hohe Wirkungsgrad macht im Zeichen weltweit knapper werdender Ressourcen den Reiz dieser Technologie aus.

Die unterschiedlichen Komponenten einer PEM Brennstoffzelle werden mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt und schließlich zu einer PEM Brennstoffzelle bzw. mehrere solcher PEM Brennstoffzellen zu einem sogenannten ‚Stack‘ assembliert. Die Hersteller von Brennstoffzellensystemen beziehen die notwendigen Einzelkomponenten von verschiedenen Lieferanten und fertigen ihre Module, in der Regel mit Methoden einer Prototypenfertigung, in Handarbeit.

Die derzeit für die Massenproduktion von Komponenten für PEM Brennstoffzellen eingesetzten Werkstoffe und Fertigungsverfahren sind in der folgenden Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Werkstoffe und Fertigungsverfahren der wichtigsten Komponenten einer PEM Brennstoffzelle

Komponente	Werkstoffe	Fertigungsverfahren
Bipolarplatte	Titan, Edelstahl, Gold, Graphit, Polymere (z.B. PVDF, Phenolharz Vinylester, Polypropylen)	Blechumformen, Beschichten, Fräsen, Druckgießen, Spritzgießen
Membran	Copolymer aus Tetrafluorethen und perfluoriertem Fluorsulfonyl-Vinylether (Nafion); Phosphorsäure-dotiertes Polybenzimidazol (PBI); sulfoniertes Polyetheretherketon (SPEEK)	Sprühen, Ziehen, Gießen, Pressen
Katalysator	Platingruppemetalle	Siebdruck, Sprühen, Pressen
Gasdiffusionslage (GDL)	Kohlenstoffgewebe, -papiere	Pressen

2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zu diesem Thema

Im Rahmen der 2. Ausschreibung von ‚Fabrik der Zukunft‘ wurde das Projekt ‚Entwicklung eines Massenfertigungsverfahrens für Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle (MASS-PEM)‘ durchgeführt. Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zur Massenfertigung der einzelnen Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle durchgeführt, die in weiterer Folge auch zur Entwicklung der Idee der ‚EasyCell‘ führten.

Das Projekt ‚MASS-PEM‘ wurde mit dem wissenschaftlichen Partner ECHEM Kompetenzzentrum für Angewandte Elektrochemie GmbH und dem Firmenpartner Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH durchgeführt. Am gegenständlichen Projekt ‚EasyCell‘ partizipieren diese beiden Partner erneut, zusätzlich wurde der Firmenpartner HTP High Tech Plastics AG hinzugezogen.

2.3 Fokus/Schwerpunkte der Arbeit

Die Schwerpunkte der Arbeit zu diesem Projekt lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Untersuchung der Wasserausbreitung in Polymer-Elektrolyt-Membranen.
- Entwicklung eines Konzeptes zur gezielten und strukturierten Aufbringung von Katalysatormaterial an geeigneten Stellen im ‚Flow field‘ des Grundkörpers.
- Auslegung der Mikrostrukturierung (‚Flow field‘) des Grundkörpers, sodass eine brauchbare Befeuchtung der Membran gewährleistet werden kann.
- Herstellung eines Grundkörpers der ‚EasyCell‘ mit der notwendigen Mikrostrukturierung in einem Massenfertigungsverfahren (Mikrostrukturen im Bereich von 100 µm).
- Herstellung eines Prototyps der ‚EasyCell‘.
- Bestimmung der typischen Leistungsdaten der ‚EasyCell‘.

2.4 Einpassung in die Programmlinie ‚Fabrik der Zukunft‘

Ziel der Programmlinie ‚Fabrik der Zukunft‘ ist die Entwicklung und Demonstration von Konzepten und Technologien zur Produktion und Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen in einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wirtschaft.

Die Einpassung des gegenständlichen Projektes in die Ziele der Programmlinie erfolgt in zweifacher Hinsicht. Erstens wird die ‚EasyCell‘ mit nachwachsenden Rohstoffen bzw. Brennstoffen (Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser, Methanol etc.) betrieben.

Andererseits weisen die Produkte, in welchen die ‚EasyCell‘ als Energieversorgung eingesetzt wird, kaum Emissionen und somit eine geringe Umweltbelastung auf. Brennstoffzellen sind eine äußerst effiziente und umweltfreundliche Schlüsseltechnologie mit äußerst niedrigen Schadstoffgehalten und könnten in allen Bereichen des täglichen Lebens Einzug finden.

Das Projekt liefert einen Beitrag zu den folgenden Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung:

Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzerorientierung:

Durch die Realisierung der EasyCell wird autarke, netzungebundene Energie zur Verfügung gestellt. Vergleichbare, konkurrierende Systeme weisen höhere Emissionen (Abgase, Abwässer, Abfälle, Abwärme und Lärm) auf.

Prinzip der Nutzung neuerbarer Ressourcen:

Die für den Betrieb der ‚EasyCell‘ eingesetzten Brennstoffe Wasserstoff und Sauerstoff können aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden.

Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit:

Eine Rezyklierung des Katalysatormaterials ist technisch möglich und ökonomisch insofern sinnvoll, als dass der eingesetzte Primärrohstoff sehr teuer ist (Edelmetalle).

Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionsfähigkeit und Lernfähigkeit:

Die Grundlagen, auf denen die ‚EasyCell‘ basiert sind zeitinvariant.

Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge:

Diesem Prinzip wird durch den einfachen Aufbau der ‚EasyCell‘ Rechnung getragen. Eine fehlerhafte ‚EasyCell‘ kann problemlos ausgetauscht werden. Bis zum Austausch unterbleibt die Energieversorgung des eigentlichen Gerätes und eine problemlose Wartung ist leicht möglich.

Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität:

Im Bereich der Brennstoffzellen ist absehbar, dass sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf fertigungstechnischer Ebene hochwertige Arbeitsplätze geschaffen werden können und andererseits die Lebensqualität durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen erhöht wird sowie eine Reduktion von Emissionen erzielt werden kann.

Beitrag des Projekts zu den ausgewählten Themenstellungen der 3. Ausschreibung:

Das Projekt liefert einen Beitrag zu dem ausgewählten Thema ‚Technologien und Systeme zur deutlichen (faktoriellen) Verbesserung der Ressourceneffizienz‘.

Die Ergebnisse des Projektes führen zu einer Kosteneinsparung durch die Reduktion der Nebenaggregate und die damit verbundene Steigerung des Systemwirkungsgrades. Darüber hinaus gelangen zur Herstellung der Komponenten Fertigungsverfahren zum Einsatz, die einen effizienten Ressourceneinsatz ermöglichen.

Zur Entlastung der Umwelt trägt in erster Linie der höhere Wirkungsgrad von Brennstoffzellen verglichen mit herkömmlichen Technologien wie Verbrennungskraft-

motoren bei. Dies bedeutet eine Treibstoffeinsparung und damit eine Verringerung der Emissionen verglichen mit den konkurrierenden Technologien.

2.5 Kurzbeschreibung des Aufbaus des Endberichts

Der vorliegende Endbericht ist wie folgt gegliedert:

- Ziele des Projektes (Kapitel 3)
- Inhalte und Ergebnisse des Projektes (Kapitel 4)
- Detailangaben zu den Zielen der Fabrik der Zukunft (Kapitel 5)
- Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen (Kapitel 6)
- Diskussion über die Nachhaltigkeit von Brennstoffzellen (Kapitel 7)
- Ausblick und Empfehlungen (Kapitel 8)

3 Ziele des Projektes

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines Herstellungsverfahrens für optimierte PEM-Brennstoffzellen wobei besonderes Augenmerk auf das Management der eingesetzten Medien, auf die Optimierung der Nebenaggregate und auf die Fertigungstauglichkeit gerichtet werden sollte. Eine derart hergestellte ‚EasyCell‘ ermöglicht aufgrund wesentlicher Preisersparnis in der Fertigung eine leichtere Marktdurchdringung.

Die Fragestellungen zur Zielerreichung sollten sich mit der Verbesserung der Struktur von Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle befassen, im besonderen der bipolaren Platte und der Membran mit Elektrode/Katalysator-Material (MEA – Membrane Electrode Assembly). Durch die beabsichtigte Optimierung der Komponenten der Brennstoffzelle sollte eine Erhöhung des Systemwirkungsgrades erzielt werden

Weiters sollte ein Subsystem eines PEM-Brennstoffzellensystems entwickelt werden, wodurch die derzeit notwendige Befeuchtungseinheit für das Brenngas (Wasserstoff) eingespart werden kann. Dadurch wird die Baugröße einer PEM-Brennstoffzelle deutlich verringert, was speziell für den Einsatz in mobilen Anwendungen einen wesentlichen Faktor darstellt, da PEM-Brennstoffzellen als Energieversorgungseinheit in kleinen Geräten zum Einsatz kommen können, wie beispielsweise in Mobiltelefonen oder Laptops.

Die Markteinführung der bis heute entwickelten PEM-Brennstoffzellensysteme scheitert auch am Preis, bedingt durch das Fehlen von geeigneten Massenfertigungsverfahren. Aus diesem Grund sollte im Rahmen des Projektes besonderes Augenmerk auf die Fertigungstauglichkeit und auf optimierte Fertigungsverfahren gerichtet werden. Die einzelnen Komponenten sollen mit Hilfe der Spritzgießtechnologie und deren Sonderverfahren (z.B. Mikrospritzgießen, Powder Injection Moulding etc.) in kostengünstiger Massenfertigung hergestellt werden können, um in weiterer Folge PEM-Brennstoffzellen marktkonform für breite Anwendungen verfügbar zu machen.

Als Ergebnis des Projektes soll ein Prototyp bzw. Prototypserien der EasyCell vorliegen, welche in Hinblick auf Wassermanagement, Nebenaggregate und Fertigungstauglichkeit Vorteile gegenüber konventionellen PEM-Brennstoffzellen in bipolarer Bauweise aufweisen.

4 Inhalte und Ergebnisse des Projektes

4.1 Verwendete Methoden und Daten

Die im Projekt zum Einsatz gelangende Methodik kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Literaturrecherche (inkl. Internet)
- Expertenbefragung
- Praktische Untersuchung der Wasserausbreitung an einem Prüfstand
- Konstruktive Arbeiten und Überlegungen zur Entwicklung eines Konzeptes für die strukturierte Katalysatoraufbringung
- Konstruktive Arbeiten und Überlegungen zur Auslegung des Grundkörpers der ‚EasyCell‘
- Praktische Spritzversuche und Auswertung
- Herstellung von Prototypserien der EasyCell
- Charakterisierung der hergestellten Prototypserien der EasyCell

Nachdem dieses spezielle Konstruktionsprinzip der lateralen Brennstoffzelle weitestgehend Neuland darstellt, kann nicht auf verfügbare Daten und Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.

Im Themenbereich Brennstoffzellen-Technologie bzw. Elektrochemie wurde auf das Know-how und die Erfahrungen des Forschungspartners ECHEM Kompetenzzentrum für Angewandte Elektrochemie GmbH zurückgegriffen.

Seitens Fotec wurde auf Know-how im Bereich des Spritzgießens mit Schwerpunkt auf Mikrospritzgießen zurückgegriffen.

4.2 Beschreibung des Standes der Technik

Traditionelle Brennstoffzellensysteme sind als sogenannter Stack in bipolarer Bauweise aufgebaut, wobei die sogenannte Polymer-Elektrolyt-Membrane (PEM) jeweils die Brennstoffseite von der Sauerstoffseite trennt. Das an der Sauerstoffseite entstehende Reaktionswasser kann nicht unmittelbar zur Befeuchtung des Wasserstoffstroms der nächsten Zelle verwendet werden. Vielmehr wird das entstandene Wasser über Nebenaggregate, sogenannte Befeuchter, der Wasserstoffseite zugeführt.

Die folgende Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines konventionellen PEM-Brennstoffzellenstacks.

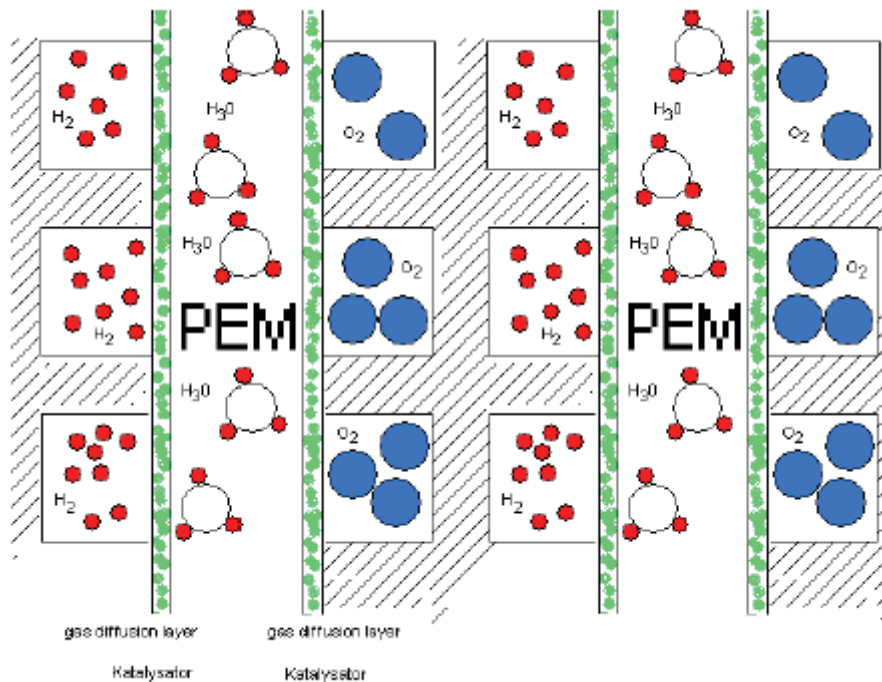


Abbildung 2: Konventionelle Struktur eines PEM-Brennstoffzellenstapels

Polymer-Elektrolyt-Membranen (PEM) benötigen Wasser zum Erreichen der gewünschten Ionenleitfähigkeit. Das Wassermanagement stellt generell ein Kernproblem bei PEM-Brennstoffzellen dar. Einerseits benötigt die PEM Wasser zur Aufrechterhaltung der Leitfähigkeit (ein Austrocknen der Membranen führt zum Totalversagen der PEM-Brennstoffzelle) und andererseits entsteht an der Sauerstoffseite Wasser. Dieses Wasser kann zwar für die wasserstoffseitige Befeuchtung verwendet werden, muss aber über zusätzliche Nebenaggregate abgeführt und an der richtigen Stelle wieder zugeführt werden.

Als Stand der Technik können Zellen in Filterpressenbauweise bezeichnet werden, bei welchen jeweils mehrere Membran-Elektroden-Einheiten, getrennt durch leitfähige bipolare Platten, zu Stapeln (sogenannte Stacks) zusammengebaut werden. Die Abdichtung der einzelnen Zellsegmente voneinander erfolgt bei dieser "vertikalen" Bauweise durch Zusammenpressen der Bipolarplatten mit der Polymermembran und Dichtungsringen. Die Presskraft wird üblicherweise durch Zusammenschrauben des Brennstoffzellenstapels aufgebracht. Alternativ dazu kann eine Abdichtung auch durch Verkleben oder Verschweißen der Polymermembran mit den Bipolarplatten erreicht werden.

4.3 Beschreibung der Neuerungen und der Vorteile gegenüber dem Ist-Stand

Die folgende Abbildung 3 zeigt schematisch die Struktur einer neuartigen Strategie für den Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle („EasyCell“), die im Projekt realisiert wurde. Bei einer „EasyCell“ wird das für den jeweiligen Wasserstoffstrom pro Zelle benötigte Befeuchtungswasser durch einen Diffusionsmechanismus aus dem Reaktionswasser der jeweils unmittelbar benachbarten Sauerstoffströme gewonnen.

Wesentliches Ziel des Projektes war es, eine speziell ausgeprägte Struktur eines mikrostrukturierten Grundkörpers zur Trennung von Wasserstoff- und Sauerstoffseite zu realisieren. Die notwendige Befeuchtung des Wasserstoffstroms sollte über die PEM selbst, durch Diffusion aufgrund des Dichtegradienten, sichergestellt werden. Dafür war ein mikrostrukturierte Grundkörper, bei welchem die Wasserstoffseite und die Sauerstoffseite innerhalb einer Diffusionslänge alternieren, von großer Bedeutung. Die konventionelle Bipolarplatte, die bei Brennstoffzellen beiderseits Reaktionsgase heranführt, ist bei der EasyCell in diesem Sinne nicht vorhanden, weshalb die verwendeten Platten als Grundkörper bezeichnet werden.

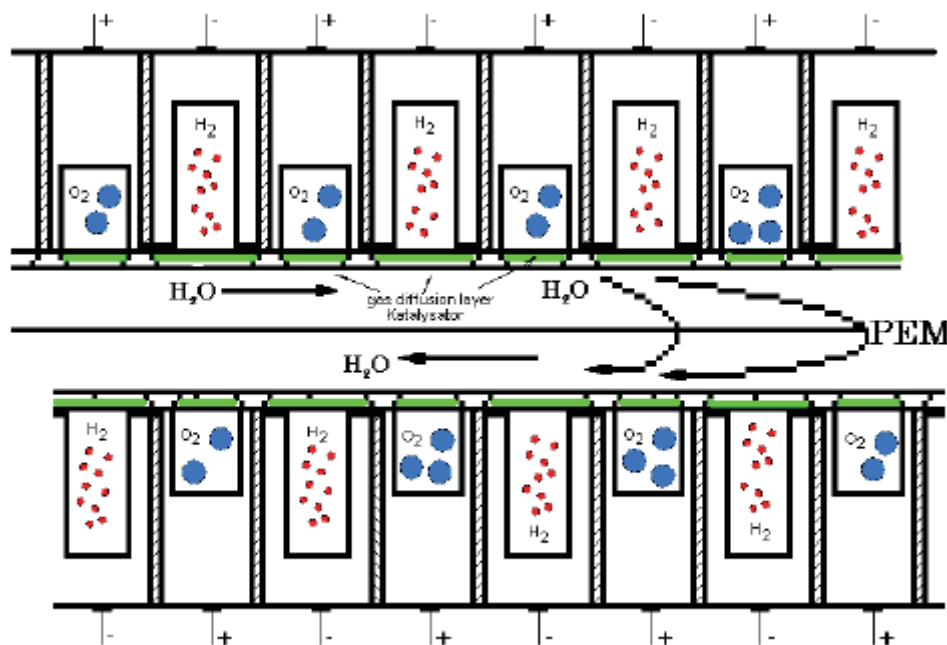


Abbildung 3: Struktur eines PEM-Brennstoffzellenelements der „EasyCell“

Während bei den konventionellen Brennstoffzellen der Ladungs- und Stofftransport senkrecht zur PEM verläuft, wobei eine Wasserstoffelektrode jeweils durch die PEM getrennt einer Sauerstoffelektrode gegenübersteht, sollen bei der „EasyCell“ Wasserstoff- und Sauerstoffelektroden benachbart angeordnet sein und mit der PEM als Ionenleiter betrieben werden. Die

Trennung der Reaktionsgase wird von einer für diesen Zweck speziell entwickelten und mit bereits etablierten Fertigungsverfahren realisierbaren Kunststoffstruktur sichergestellt. Die PEM sorgt in dieser Konstruktion für den Wassertransport von der Sauerstoffseite zur benachbarten Wasserstoffseite.

Zur Erleichterung der Massenfertigbarkeit der ‚EasyCell‘ soll zur Herstellung des Grundkörpers das etablierte und bekannte Spritzgießverfahren und dessen Sonderverfahren zum Einsatz gelangen.

Besonderheit der ‚EasyCell‘ ist die "laterale" Bauweise, die sich von der "vertikalen" Bauweise deutlich unterscheidet. Ebenso unterscheiden sich die Herstellungstechniken für die lateralen Bauweisen grundsätzlich von den Herstellungstechniken für Zellen in "vertikaler" Ausführung. Die in Abbildung 3 beschriebene Struktur begünstigt zwar den Wasserhaushalt, erfordert jedoch eine andere, völlig neuartige Strategie zur gezielten und strukturierten Katalysatoraufbringung, die ebenfalls im Rahmen des gegenständlichen Projektes entwickelt wurde.

Die Vorteile der im Rahmen des Projektes entwickelten und realisierten ‚EasyCell‘ lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das entstehende Reaktionswasser kann für die Befeuchtung des Wasserstoffstroms in der jeweils benachbarten Zelle genutzt werden. Das Wassermanagement wird dadurch stark vereinfacht und die bisher notwendigen Nebenaggregate (Befeuchtungseinheit) können eingespart werden. Dies verringert die Baugröße der PEM-Brennstoffzellen und führt zu einer Kostenreduktion. Zudem wird aufgrund des reduzierten Energiebedarfes der Systemwirkungsgrad verbessert.
- Bei geeigneter Verschaltung der Einzelzellen, kann eine verwertbare Ausgangsspannung ($> 1,5$ V) erzielt werden, ohne Einzelelemente zu einem größeren Stack montieren zu müssen.
- Die weitere Wandelbarkeit mit elektronischen Spannungswandlern wird ermöglicht, da die Minimalspannungen der heute gängigen Transistoren mit einem einzigen EasyCell-Element erreicht werden.

4.4 Projektergebnisse Arbeitspaket 1

Wassermanagement bei PEM-Brennstoffzellen

Die Strategie der EasyCell setzt voraus, dass sich die Wasserausbreitung innerhalb der Membran zufolge Diffusion über ausreichend größere Distanzen erstreckt. Dies muss zumindest so weit erfolgen, um die Distanz zwischen zwei lateralen Zellen auf der EasyCell zu überbrücken.

Um die Ausbreitung des Wassers durch Diffusion abschätzen zu können wurde zunächst eine kapazitive Messung erwogen. Erste Versuche haben aber gezeigt, dass zwar eine messbare Änderung der Kapazität vorliegt, dass aber die zur Bestimmung des lokalen Wassergehalts notwendigen Sonden über eine so kleine Auflagefläche verfügen, dass kein sicheres Ergebnis zu erwarten ist.

Zufolge dieser Erkenntnis wurde die Wasserverteilung sodann mit einem Sondenpaar mit festem Abstand bestimmt, wobei der ohmsche Widerstand gemessen wurde.

Zu diesem Zweck wurde zunächst ein Stück Nafion trocken und nach dem Quellen in destilliertem Wasser neuerlich gewogen. Der Massenunterschied repräsentiert den absoluten Wassergehalt.

Durch eine zusätzliche Messung des ohmschen Widerstandes mit einer Doppelsonde wurde schließlich der Zusammenhang des Widerstandes zum Wassergehalt bestimmt. Abbildung 4 zeigt die eingespannte Membran, sowie 2 Bohrungen im Versuchsaufbau für die Wasserzufuhr.

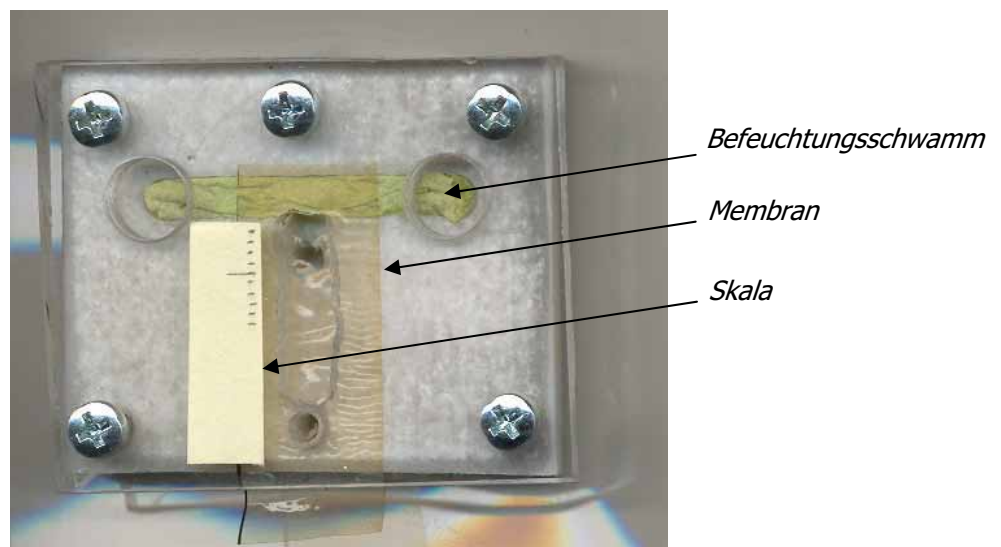


Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Wasserausbreitung

Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen. Aus dem Diagramm ist zu ersehen, dass die Diffusionslänge des Wassers in die Membran hinein durchaus im Bereich einiger weniger Millimeter liegt. Dies ist deutlich länger, als die Dimensionen der für eine Funktion der EasyCell notwendigen Mikrostrukturen betragen. Eine wichtige Voraussetzung für die Funktion der EasyCell ist demnach erfüllt.

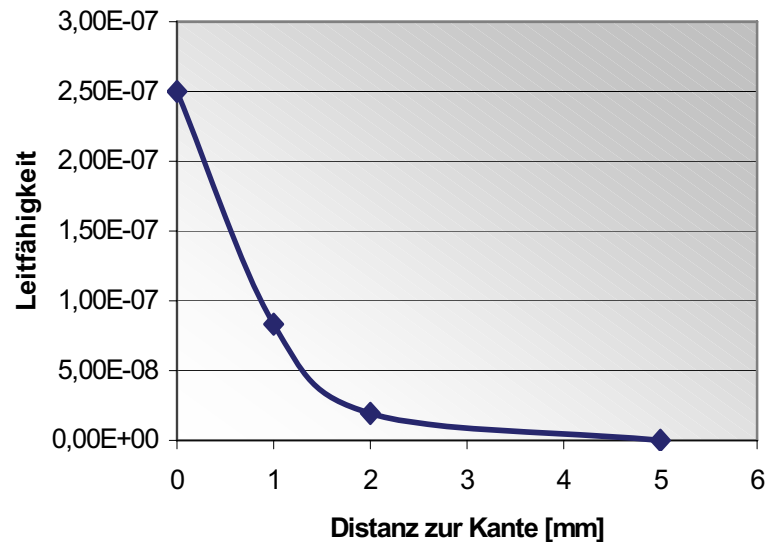


Abbildung 5: Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Diffusionslänge in die Membran

Zur Charakterisierung der Wasserausbreitung auf Nafion, einem typischen Membranmaterial, wurde ein Tropfen Wasser auf einer Nafion Probe aufgebracht, und die Ausbreitung des Wassers optisch beobachtet.

Abbildung 6 zeigt eine vergrößerte Aufnahme eines Wassertropfens auf Nafion. Die Ergebnisse stimmen ausreichend gut mit der oben beschriebenen Messung überein. Erneut tritt Wasser bis etwa 2 mm vor (siehe konzentrischen Kreis rund um den Wassertropfen).

Dieses Ergebnis zeigt erneut, dass durch Diffusion von Wasser in das Membranmaterial Strukturen im Bereich von 0,1 mm durchaus überbrückt werden können. Damit ist eine ausreichende Befeuchtung der Membran einer ‚EasyCell‘ zu erwarten.

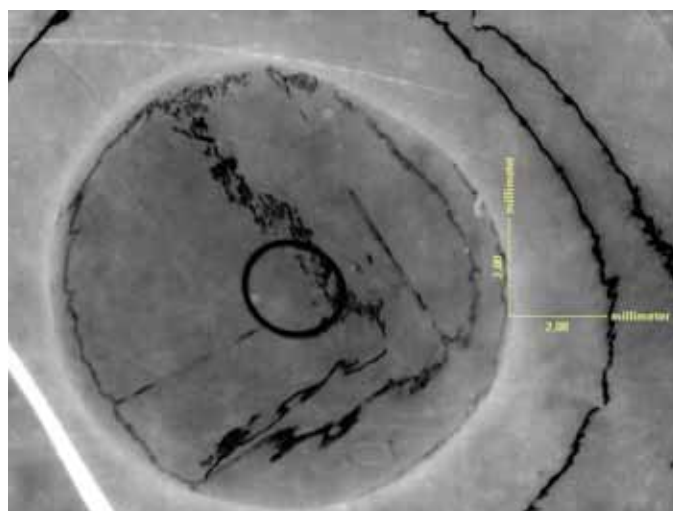


Abbildung 6: Ausbreitung von Wasser auf Nafion

4.5 Projektergebnisse Arbeitspaket 2 Strukturierte Katalysatoraufbringung

Nachdem davon ausgegangen werden konnte, dass eine ausreichende Befeuchtung der Membran einer ‚EasyCell‘ zu erwarten ist, wurde mit der Entwicklung eines Konzeptes zur strukturierten Katalysatoraufbringung begonnen.

Dazu wurde zunächst eine einfache Versuchszelle zum prinzipiellen Nachweis der Funktionalität der EasyCell gebaut. Abbildung 7a zeigt die Prinzipskizze der Versuchszelle.

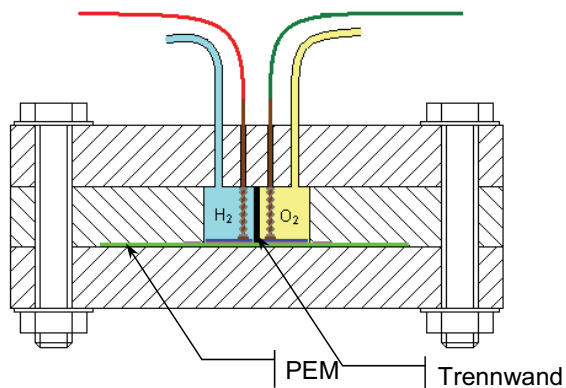


Abbildung 7a: Prinzipskizze der Versuchszelle

Die Versuchszelle weist zwei Gaskammern auf, eine für Wasserstoff und eine für Sauerstoff. Diese beiden Kammern sind mit einer Trennwand aus Kunststoff voneinander getrennt. Zwischen zwei Platten der Versuchszelle ist die Polymer-Elektrolyt-Membrane (PEM) geklemmt. Mit Hilfe von zwei Elektroden kann von der Membranoberfläche weg die Spannungsentwicklung gemessen werden. Die in der Skizze in Abbildung 7a dunkelblau eingezeichnete Schicht stellt das hier nun händisch aufgebraachte Katalysatormaterial dar.

Basierend auf diesem Design wurde eine Versuchszelle realisiert und getestet. Abbildung 7b zeigt die Versuchszelle.



Abbildung 7b: Realisierte Versuchszelle

Untersuchungen mit der Versuchszelle ergaben trotz nicht optimierter Membran eine Ausgangsspannung von 0,5 V. Damit konnte verifiziert werden, dass ein lateraler Betrieb der Membran möglich ist.

In weiterer Folge musste nun ein Konzept entwickelt werden, welches die geforderte großflächige und massentaugliche Strukturierung des Elektrodenmaterials ermöglicht.

Ursprünglich sollten 2 Verfahren (z.B. Siebdruck) ausgewählt werden, wobei das besser geeignete letztendlich zur Herstellung der EasyCell herangezogen werden sollte. In Abänderung dieser Strategie wurde ein völlig neuartiges Konzept erarbeitet, welches einige der Problematiken der ursprünglich geplanten Verfahren umgeht.

Die entwickelten Verfahrensschritte zur Herstellung der EasyCell unter dem Aspekt einer strukturierten Katalysatoraufbringung werden nachfolgend beschrieben. Hauptaugenmerk musste auf die Abdichtung der Kanäle gelegt werden, die Brennstoff und Oxidationsmittel führen. Darüber hinaus musste ein einfaches Assemblings und die Ermöglichung einer Massenfertigung berücksichtigt werden.

Beschreibung des entwickelten Herstellverfahrens für die ‚EasyCell‘:

Basis für die Herstellung einer ‚EasyCell‘ ist ein Grundkörper, der ein mikrostrukturiertes "Flow field" aus vielen nebeneinander liegenden Kanälen aufweist. Die Herstellung dieses mikrostrukturierten Grundkörpers aus Kunststoff erfolgt mittels Mikrospritzgießen. Der Kunststoff ist vorzugsweise ein "chemogalvanisch" metallisierbarer Thermoplast oder Elastomer.

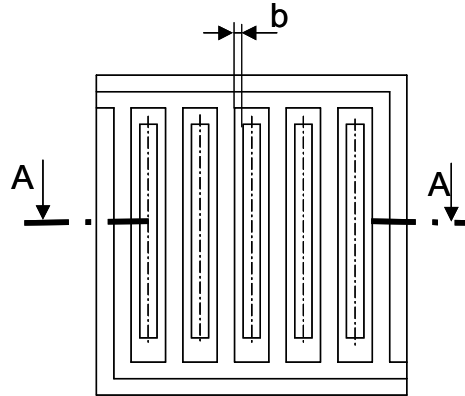
Abbildung 8 zeigt den Grundkörper sowie einen Schnitt durch den Grundkörper. Die vorhandenen Mikrokanäle im "Flow field" liegen in einem Abstand von 1 bis 1.000 μm , vorzugsweise zwischen 20 und 180 μm (mit b in Abbildung 8 bezeichnet) auseinander. Die Kanäle liegen darüber hinaus vorzugsweise parallel nebeneinander.

Auf der Oberseite des Grundkörpers bilden die Kanäle das "Flow field" für den Brennstoff und das Oxidationsmittel (Luft). An der Rückseite des Grundkörpers sind wie in Abbildung 9 gezeigt Öffnungen für den Oxidationsmitteleintritt angebracht. Um eine erhöhte Stabilität des Grundkörpers zu erhalten und um die Dichtflächen zwischen den Elektrodenräumen zu vergrößern, können die Kanäle z.B. mit einfachen Bohrungen auch unterbrochen sein.

Abbildung 10 zeigt einen Schnitt durch eine EasyCell. Zu erkennen sind die Elektroden (3, 4), die fest mit der Membran (2) verbunden sind. Die Elektrokatalysatoren bestehen typischerweise aus metallischen Edelmetallpartikeln ("metal blacks"), oder aus Edelmetallpartikel aufgebracht auf Katalysatorträgermaterial wie Ruß oder Carbon Nanotubes. Als Zusatzstoffe können leitfähige Polymere, Nafion oder Teflon zugesetzt werden.

Die elektrische Ableitung (5, 6) erfolgt über dünne Metallfilme an den Kanalwänden bzw. an der Unterseite des Grundkörpers (1). Diese Metallschichten bestehen aus Edelmetall, vorzugsweise

aus Gold- oder Goldlegierungsschichten. Die Aufbringung dieser Schichten erfolgt chemisch, galvanisch, mittels CVD oder PVD Techniken.



Schnitt A-A:

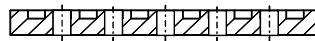


Abbildung 8: Grundkörper der EasyCell im Aufriss sowie Schnittansicht durch den Grundkörper

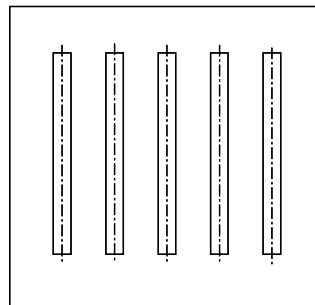
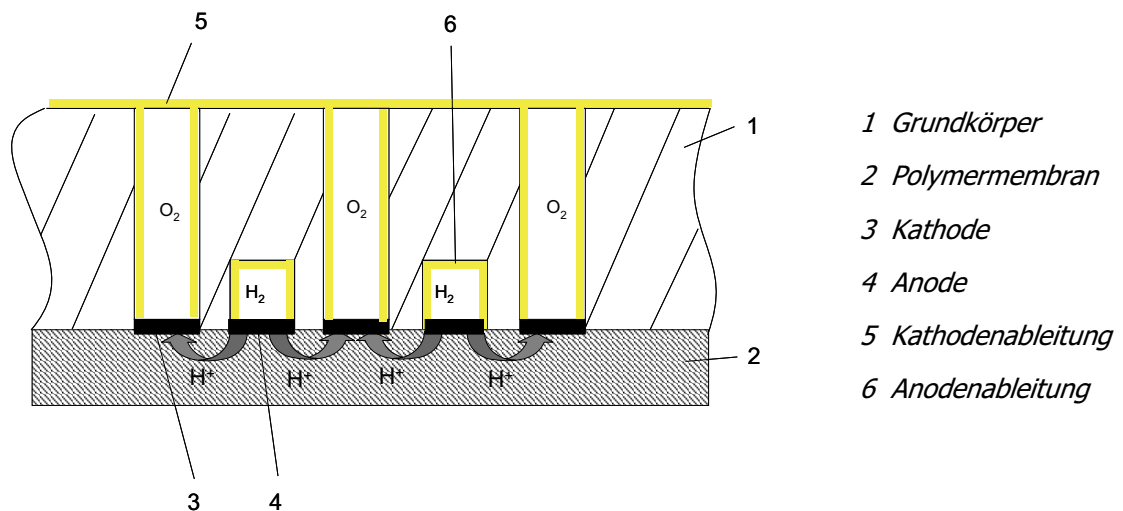


Abbildung 9: Rückansicht des Grundkörpers der EasyCell



- 1 Grundkörper
- 2 Polymermembran
- 3 Kathode
- 4 Anode
- 5 Kathodenableitung
- 6 Anodenableitung

Abbildung 10: Schematische Schnittansicht der EasyCell

Eine protonenleitende Polymer Membran (2) bedeckt die Unterseite des Grundkörpers (1). Die Herstellung dieser Elektroden-Membran-Grundkörpereinheit erfolgt mittels Aufgießen des Polymers in gelöster Form und anschließendem Abdampfen des Lösungsmittels. So wird einerseits ein inniger Kontakt der Membran mit den aktiven Elektrodenschichten hergestellt, und andererseits, durch innigen Verbund der Membran mit den Kanalstegen eine hervorragende Abdichtung der einzelnen Kanäle gewährleistet. Die Stärke der aufgetragenen Membran liegt bei ca. 500 μm . Als Brennstoff für den Betrieb der ‚EasyCell‘ wird vorzugsweise Wasserstoff verwendet, jedoch ist prinzipiell auch die Verwendung von Alkoholen, Zuckern oder anderen Brennstoffen möglich. Die ‚EasyCell‘ kann als Einzelzelle verwendet werden. In Sonderformen kann diese Einzelzelle auch zusammengerollt werden. Es ist auch möglich mehrere dieser Einzelzellen in planarem oder eingerolltem Zustand zum Zwecke der Leistungserhöhung zusammenzuschließen.

Vorteile der ‚EasyCell‘ bzw. des entwickelten Verfahrens zur Herstellung der ‚EasyCell‘ gegenüber herkömmlichen Zellen:

- Es werden keine zusätzlichen Dichtungsmaterialien benötigt.
- Es können mikrostrukturierte Kanäle gefertigt werden, da der Schritt des Assemblings von separat gefertigten Teilen entfällt.
- Es werden keine zusätzlichen Kompressoren für den Antransport des Sauerstoffes an die Kathode benötigt. Der Antransport des Sauerstoffs erfolgt über natürliche Konvektion und Diffusion von der Unterseite der lateralen Brennstoffzelle an die Kathoden.
- Es können dickere Membranen eingesetzt werden. Je dicker man die Membran aufgießt, desto größer wird der zur Protonenleitung verfügbare Querschnitt.

4.6 Projektergebnisse Arbeitspaket 3 Herstellung der EasyCell

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Herstellung von Prototypen einer ‚EasyCell‘ nach dem in Kapitel 4.5 beschriebenen neu entwickelten Verfahren.

4.6.1 Konstruktion der EasyCell

Den ersten Schritt zur Konstruktion der EasyCell stellte die Festlegung der Geometrie des Grundkörpers dar. Die Anforderungen an den Grundkörper der EasyCell, die im wesentlichen auf die Konstruktion und auf die Materialauswahl Einfluss nehmen, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Grundkörper muss eine möglichst gleichmäßige Versorgung mit Sauerstoff und Wasserstoff sicherstellen.
- Die Versorgungskanäle für Sauerstoff und Wasserstoff müssen zueinander gasdicht ausgeführt sein.

- Der Grundkörper muss elektrisch gut isolieren.
- Der Grundkörper muss eine gute chemische und elektrochemische Stabilität aufweisen.
- Der Grundkörper muss eine gute Säurebeständigkeit aufweisen.
- Der Grundkörper muss eine Temperaturbeständigkeit bis 100°C aufweisen.
- Der Grundkörper muss zur Herstellung von elektrischen Kontakten einfach metallisiert werden können.
- Der Grundkörper muss einen guten Haftuntergrund für das Membranmaterial Nafion bieten.
- Der Grundkörper muss eine geringe Wasseraufnahme ($< 0,4\%$) aufweisen.

Um nun auf Basis dieser Anforderungen die EasyCell konstruieren zu können, wurden die folgenden beiden Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Konstruktion des Grundkörpers
2. Detailkonzeption der Prozesse zur Herstellung der EasyCell

ad 1. Konstruktion des Grundkörpers

Die folgende Abbildung 11 zeigt den konstruierten Grundkörper mit einer Grundfläche von ca. $20 \times 20 \text{ mm}^2$.

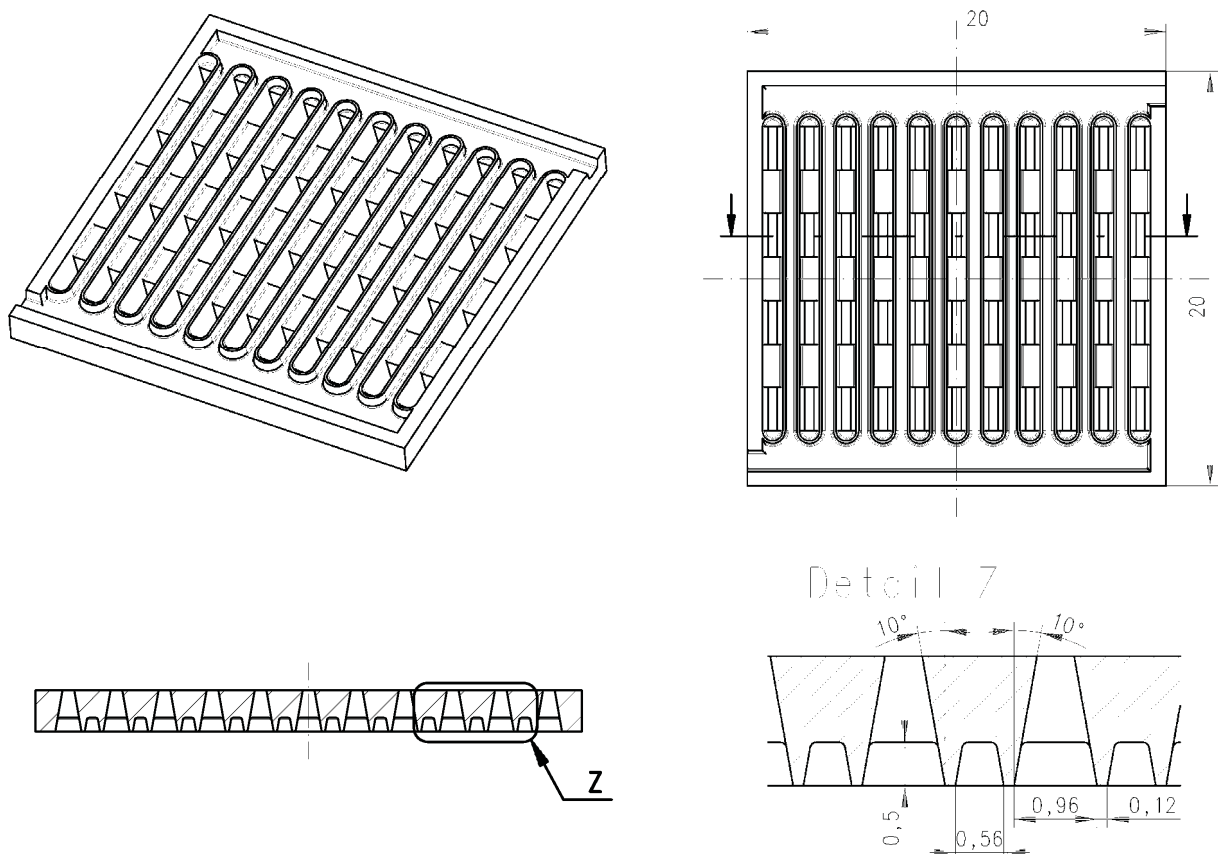


Abbildung 11: Grundkörper der EasyCell

Zu erkennen ist, dass die EasyCell eine luftatmende Brennstoffzelle ist. Für die Versorgung der EasyCell mit Sauerstoff aus der Luft wurden Durchbrüche zur Umgebungsluft vorgesehen. Für die Versorgung mit Wasserstoff wurde eine geschlossene Mäanderstruktur vorgesehen. So soll der Forderung nach möglichst gleichmäßiger Versorgung mit Sauerstoff und Wasserstoff nachgekommen werden. Die Realisierung der geforderten Gasdichtheit zwischen den Versorgungskanälen erfolgt über 0,12 mm breite Stege (siehe Detail Z). Alle weiteren Anforderungen an den Grundkörper müssen durch geeignete Wahl des Kunststoffes, aus dem der Grundkörper hergestellt wird, erfüllt werden.

ad 2. Detailkonzeption der Prozesse zur Herstellung der EasyCell

Die Detailkonzeption der Prozesse zur Herstellung der EasyCell sieht folgende Prozessschritte vor, die im Laufe des Projektes für eine Prototypfertigung entwickelt wurden:

- Prozessschritt 1: Herstellung des Grundkörpers durch Mikrospritzgießen
- Prozessschritt 2: Anbringen der elektrischen Ableitungen
- Prozessschritt 3: Einbringen von Füllmaterial
- Prozessschritt 4: Abziehen des Füllmaterials
- Prozessschritt 5: Kompaktierung des Füllmaterials
- Prozessschritt 6: Aufbringung der Elektrodenmasse
- Prozessschritt 7: Aufbringung von Membranlösung
- Prozessschritt 8: Herauslösen des Füllmaterials

4.6.2 Herstellung der Einzelkomponenten

Herstellung des Grundkörpers:

Der Grundkörper weist eine sehr komplexe Geometrie auf. Nicht nur die vorhandenen Mikrostrukturen stellen hohe Ansprüche an die Herstellung bzw. das Herstellverfahren. Die Anforderung, dass der Grundkörper elektrisch isolierend ist bedingt, dass dieser entweder aus Kunststoff oder Keramik gefertigt wird.

Die folgenden Punkte mussten für eine Fertigung des Grundkörpers geklärt werden:

1. Analyse der technischen Machbarkeit
2. Auswahl eines geeigneten Werkstoffes
3. Konstruktion und Fertigung eines Spritzgießwerkzeuges für den Grundkörper
4. Spritzgießfertigung des Grundkörpers

ad 1. Analyse der technischen Machbarkeit

Ausgangspunkt für die Betrachtung der technischen Machbarkeit der Fertigung des Grundkörpers ist die Forderung nach einer kostengünstigen Massenfertigung. Eine weitere Voraussetzung für die Wahl des Fertigungsverfahrens ist die Komplexität des Grundkörpers.

Um eine einfache und kostengünstige Massenfertigung des Grundkörpers zu realisieren, wurde auf das Spritzgießverfahren zurückgegriffen, das die Herstellung des Grundkörpers sowohl in Kunststoff als auch in Keramik ermöglicht.

Die Basisanforderungen beim Spritzgießen sind:

- Füllbarkeit der Mikrostrukturen auf dem Grundkörper
Die kritischen Strukturen liegen in einer Größenordnung von 120 µm bei einem Aspektverhältnis von 4. Dies ist je nach Werkstoff kritisch oder nicht. Im weiteren Projektverlauf muss untersucht werden, ob diese Mikrostrukturen konventionell gefüllt werden können oder ob eine variotherme Werkzeugtemperierung notwendig ist. Dieser Fragestellung wird nachgekommen, indem ein Werkzeug konventioneller Bauart vom Industriepartner HTP gefertigt wird und parallel dazu Untersuchungen auf einem Versuchsstand zur variothermen Werkzeugtemperierung durchgeführt werden.
- Entformbarkeit des Grundkörpers
Das Design des Grundkörpers wurde bereits unter dem Aspekt einer problemlosen Entformbarkeit beim Spritzgießverfahren erstellt.
- Geometrische Anforderungen (Schwindung, Verzug, Ebenheit, Toleranzen etc.)
Geometrische Anforderungen, wie z.B. enge Toleranzen spielen bei der Fertigung des Grundkörpers eine untergeordnete Rolle. Die groben Toleranzen sind einfach mit dem Spritzgießverfahren zu erreichen. Augenmerk ist jedoch auf die sehr genaue Abformung der Mikrostrukturen zu legen.

ad 2. Auswahl eines geeigneten Werkstoffes

Der Auswahl eines geeigneten Werkstoffes für den Grundkörper kam eine wichtige Bedeutung zu, da an den Grundkörper eine Vielzahl von Anforderungen gestellt werden, die materialseitig zu erfüllen sind (siehe auch Kapitel 3.3.1).

Mit dem Spritzgießverfahren können sowohl Kunststoffe als auch Keramiken (Pulverspritzgießen – PIM) verarbeitet werden. Das einfachere und kostengünstigere Verfahren ist jedoch das Spritzgießen von Kunststoffen. Daher wurde in erster Linie nach Kunststoffen für den Grundkörper gesucht.

Viele der geforderten Eigenschaften konnten in Materialdatenbanken für Kunststoffe und bei Materialherstellern recherchiert werden. Ob der jeweilige Kunststoff jedoch einen guten

Haftuntergrund für das Membranmaterial Nafion bietet musste in Form von Haftversuchen im Vorfeld experimentell verifiziert werden.

Die in Tabelle 2 aufgelisteten Kunststoffe, die sich bei der Materialrecherche als vielversprechend herausstellten, wurden für die experimentellen Haftversuche herangezogen. Von den in Tabelle 2 aufgelisteten Kunststoffen wurden Versuchsmuster angefordert. Aus diesen Versuchsmustern wurden jeweils vier 20 x 20 mm² große Proben geschnitten. Die erste Probe blieb unbehandelt, während die restlichen 3 Proben jeweils aufgeraut wurden (schwach = Probe 2, mittel = Probe 3 und stark = Probe 4 aufgeraut).

Zur Erzeugung von Membranen wurde Membranlösung auf die Proben aufgebracht und gegen Abfließen mit einem Wall aus plastischer Knetmasse gesichert. Dazu mussten Materialien gefunden werden die geeignet formbar und bezüglich Anlösen durch die Membranlösung resistent waren. Silikonkautschuk erwies sich am geeignetsten.

Kriterien wie gute Verformbarkeit und Resistenz gegenüber der Membranlösung spielten bei der Auswahl eine entscheidende Rolle. Die längere Aushärtezeit des Silikonkautschuks wurde angesichts der sonstigen Vorzüge in Kauf genommen.

Umrandete Proben wurden mit der selben Menge Membranlösung von 1 ml benetzt und 24 Stunden im Abzug getrocknet. Durch verflüchtigen des Lösungsmittel bildete sich eine stabile Membrane aus. Anschließend wurden die Probeplättchen manuell aus dem Wall entformt.

Tabelle 2: Kunststoffe für den Grundkörper

Kunststoff
PES
PCT
Co-Polyester
PETG
PPSU
PEEK 1
PEEK 2
PSU
PPS 1
PPS 2
LCP
PS 1
PS 2
PS 3

Die folgenden beiden Membranlösungen wurden verwendet:

- 5%ige Membranlösung
- 10%ige Membranlösung

Bei fast allen Proben, die mit 5%iger Membranlösung befeuchtet wurden, zeigte sich schon beim Entformen eine Tendenz zum Ablösen der Membran. Die in den Abbildungen 12 bis 14 gezeigten Proben zeigten jedoch keine sofortige Ablösung beim Entformen.



Abbildung 12: PS 2



Abbildung 13: PS 1



Abbildung 14: PSU

Mit der 10%igen Membranlösung war nur bei PEEK, PPS und PS 3 sowie bei der am wenigsten aufgerauten Probe des LCP keine gute Haftung der Membran zu verzeichnen. Bei allen anderen mit 10%iger Membranlösung befeuchteten Proben war festzustellen, dass die Membran gut darauf haftete. Dies zeigte sich auch daran, dass die Proben mit zunehmender Rauheit der Oberfläche auch leichter entformbar waren.

Die nicht aufgerauten Proben des PSU, PPSU und LCP zeigten hingegen keine Haftung der Membran. Die Membran war hier zwar ausgeprägt aber sie haftete nicht an der Oberfläche und verrutschte beim Entformen. Die Abbildungen 15 bis 23 zeigen die Ergebnisse (links jeweils unbehandelte Proben, rechts jeweils stark aufgeraute Proben).



Abbildung 15: PCT



Abbildung 16: Co-Polyester



Abbildung 17: PPSU



Abbildung 18: PSU



Abbildung 19: LCP



Abbildung 20: PPS



Abbildung 21: PEEK



Abbildung 22: PES



Abbildung 23: PETG

Die folgenden Tabellen zeigen die Auswertung der Auftragungseffizienz, wobei m_{trocken} die Masse der Probe, $m_{\text{aufgeraut}}$ die Masse der aufgerauten Probe, m_{Nafion} die Masse der Probe mit Membran (sofern Haftung erzielt wurde) und Δm die Masse der Membran.

Tabelle 3: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PPS 2

PPS 2					
Membranlösung	Proben Nr.	m_{trocken} [g]	$m_{\text{aufgeraut}}$ [g]	m_{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	2,703	nicht	-	-
	2	2,746	2,719	-	-
	3	2,741	2,720	-	-
	4	2,750	2,716	-	-
10%	1	2,765	nicht	-	-
	2	2,783	2,775	-	-
	3	2,761	2,751	-	-
	4	2,746	2,727	-	-

Tabelle 4: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PS 3

PS 3					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	1,481	nicht	-	-
	2	1,514	1,490	-	-
	3	1,452	1,425	-	-
	4	1,484	1,444	-	-
10%	1	1,501	nicht	-	-
	2	1,510	1,494	-	-
	3	1,252	1,233	-	-
	4	1,295	1,263	-	-

Tabelle 5: Auftragungseffizienz beim Kunststoff LCP

LCP					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	1,948	nicht	-	-
	2	1,803	1,797	-	-
	3	1,976	1,970	-	-
	4	1,813	1,781	-	-
10%	1	1,909	nicht	-	-
	2	1,969	1,944	1,952	0,008
	3	2,075	2,041	2,062	0,021
	4	1,946	1,927	1,957	0,030

Tabelle 6: Auftragungseffizienz beim Kunststoff Co-Polyester

Co-Polyester					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	1,456	nicht	-	-
	2	1,446	1,433	-	-
	3	1,428	1,421	-	-
	4	1,390	1,382	-	-
10%	1	1,440	nicht	-	-
	2	1,408	1,404	1,429	0,025
	3	1,468	1,464	1,531	0,067
	4	1,411	1,400	1,459	0,059

Tabelle 7: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PS 2

PS 2					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	0,420	nicht	-	-
	2	0,424	0,412	0,423	0,011
	3	0,423	0,401	0,410	0,009
	4	0,430	0,406	0,424	0,018
10%	1	0,418	nicht	-	-
	2	0,423	0,417	-	-
	3	0,431	0,401	-	-
	4	0,419	0,406	-	-

Tabelle 8: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PSU

PSU					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	1,176	nicht	-	-
	2	1,181	1,172	1,172	0,000
	3			-	-
	4			-	-
10%	1	1,189	nicht	-	-
	2	1,182	1,176	1,182	0,006
	3	1,180	1,175	1,204	0,029
	4	1,182	1,176	1,218	0,042

Tabelle 9: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PEEK

PEEK					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	3,467	nicht	-	-
	2	3,348	3,335	-	-
	3	3,480	3,472	-	-
	4	3,403	3,387	-	-
10%	1	3,437	nicht	-	-
	2	3,296	3,288	-	-
	3	3,460	3,450	3,460	0,010
	4	3,299	3,290	3,295	0,005

Tabelle 10: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PCT

PCT					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	1,706	nicht	-	-
	2	1,639	1,633	-	-
	3	1,704	1,697	-	-
	4	1,702	1,696	-	-
10%	1	1,640	nicht	-	-
	2	1,717	1,711	1,764	0,053
	3	1,624	1,620	1,677	0,057
	4	1,711	1,705	1,754	0,049

Tabelle 11: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PPSU

PPSU					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	1,222	nicht	-	-
	2	0,935	0,933	-	-
	3	0,924	0,920	-	-
	4	1,045	1,035	-	-
10%	1	1,136	nicht	-	-
	2	1,161	1,158	1,177	0,019
	3	1,214	1,206	1,258	0,052
	4	1,134	1,124	1,166	0,042

Tabelle 12: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PS 1

PS 1					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	0,728	nicht	0,744	0,016
	2	0,717	0,707	0,741	0,034
	3	0,705	0,689	0,724	0,035
	4	0,720	0,696	0,728	0,032
10%	1	0,720	nicht	-	-
	2	0,724	0,716	0,821	0,105
	3	0,728	0,715	0,812	0,097
	4	0,705	0,689	0,774	0,085

Tabelle 13: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PPS 1

PPS 1					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
10%	1	2,952	nicht	-	-
	2	-	3,096	3,128	0,032
	3	-	3,233	3,251	0,018
	4	-	3,118	3,128	0,010

Tabelle 14: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PES

PES					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
10%	1	1,275	nicht	-	-
	2	-	1,282	1,363	0,081
	3	-	1,227	1,313	0,086
	4	-	1,250	1,349	0,099

Tabelle 15: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PEEK

PEEK					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
10%	1	0,886	nicht	-	-
	2	-	0,918	0,948	0,030
	3	-	0,804	0,840	0,036
	4	-	0,788	0,812	0,024

Tabelle 16: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PETG

PETG					
Membranlösung	Proben Nr.	m _{trocken} [g]	m _{aufgerauht} [g]	m _{nafion} [g]	Δm [g]
5%	1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-
	3	-	-	-	-
	4	-	-	-	-
10%	1	1,637	-	-	-
	2	-	1,648	1,683	0,035
	3	-	1,654	1,697	0,043
	4	-	1,671	1,723	0,052

Legende zu den Tabellen 3 bis 16	
Proben Nr. 1	unbehandelt
Proben Nr. 2	aufgeraut mit Schleifpapier Körnung 240
Proben Nr. 3	aufgeraut mit Schleifpapier Körnung 180
Proben Nr. 4	aufgeraut mit Schleifpapier Körnung 120
-	keine Nafion-Membran verblieben

Aufgrund der Resultate der Haftversuche mit der 10%igen Membranlösung und ergab sich die in Tabelle 17 gezeigte, vorläufige Reihung der Kunststoffe.

Tabelle 17: Vorläufige Reihung der Kunststoffe nach den Abziehversuchen

Vorl. Reihung	Kunststoff
1	PS 1
2	PES
3	PCT
4	Co-Polyester
5	PETG
6	PPSU
7	PEEK
8	PPS 1
9	PSU
10	LCP
11	PEEK
12	PS 2
13	PPS 2
14	PS 3

Zur endgültigen Auswahl der 5 bestgeeigneten Kunststoffe wurde zusätzlich zu den Ergebnissen der durchgeführten Abziehversuche die Ergebnisse der Materialrecherchen bzw. die Ergebnisse der Befragungen der Materiallieferanten berücksichtigt.

PS 1 und PS 2 bildet zwar sowohl mit der 5%igen als auch der 10%igen Membranlösung sehr gut haftende Membranen, weist allerdings keine ausreichende Chemikalienbeständigkeit auf und muss daher von der Liste der möglichen Kunststoffe für den Grundkörper genommen werden.

Co-Polyester und PETG stellten sich als vergleichbar heraus, wobei die Wahl aufgrund der leichteren Beschaffung auf den Kunststoff PETG fiel.

Die in Tabelle 18 aufgelisteten Kunststoffe haben sich als die Favoriten für die Materialauswahl herausgestellt. Der Grundkörper wird in weiterer Folge aus diesen 5 Kunststoffen hergestellt werden.

Tabelle 18: Auswahl der Kunststoffe für den Grundkörper

Reihung	Kunststoff
1	PES
2	PCT
3	PETG
4	PPSU
5	PEEK

ad 3. Konstruktion und Fertigung eines Spritzgießwerkzeuges für den Grundkörper

Konstruktion und Fertigung des Spritzgießwerkzeuges für den Grundkörper wurde vom Industriepartner HTP High Tech Plastics AG durchgeführt. Die folgende Abbildung 24 zeigt den Konstruktionsentwurf für die auswerferseitige Formplatte unter Berücksichtigung der vorhandenen Fertigungsmöglichkeiten bei HTP.

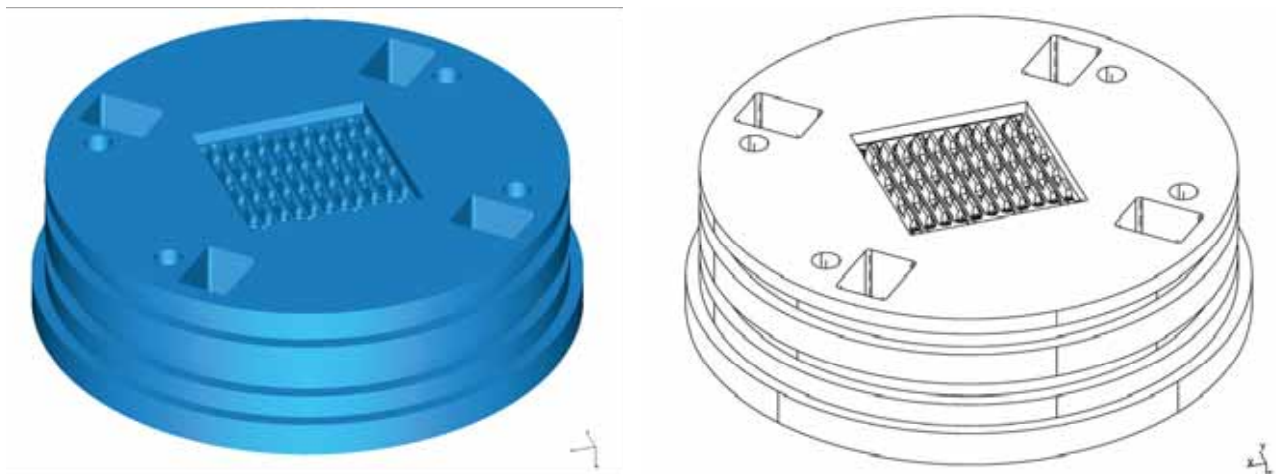


Abbildung 24: Konstruktionszeichnung der auswerferseitigen Formplatte des Spritzgießwerkzeuges

Um Aussagen treffen zu können, inwiefern Abform- und Füllprobleme mit dem Werkzeug bei den 5 ausgewählten Kunststoffen auftreten können, wurden Formfüllsimulationen mit dem Simulationsprogramm Sigma der Fa. Sigmasoft durchgeführt.

Die folgende Abbildung 25 zeigt 6 Aufnahmen der Formfüllsimulation am Beispiel des Kunststoffes PPSU. Zu erkennen ist, dass der Grundkörper über 4 Anschnitte angespritzt werden soll (Modellbasis für die Simulation). Darüber hinaus ist zu erkennen, dass eine Formfüllung theoretisch möglich erscheint. Dieses Simulationsergebnis wurde auch mit den restlichen Kunststoffen erzielt.

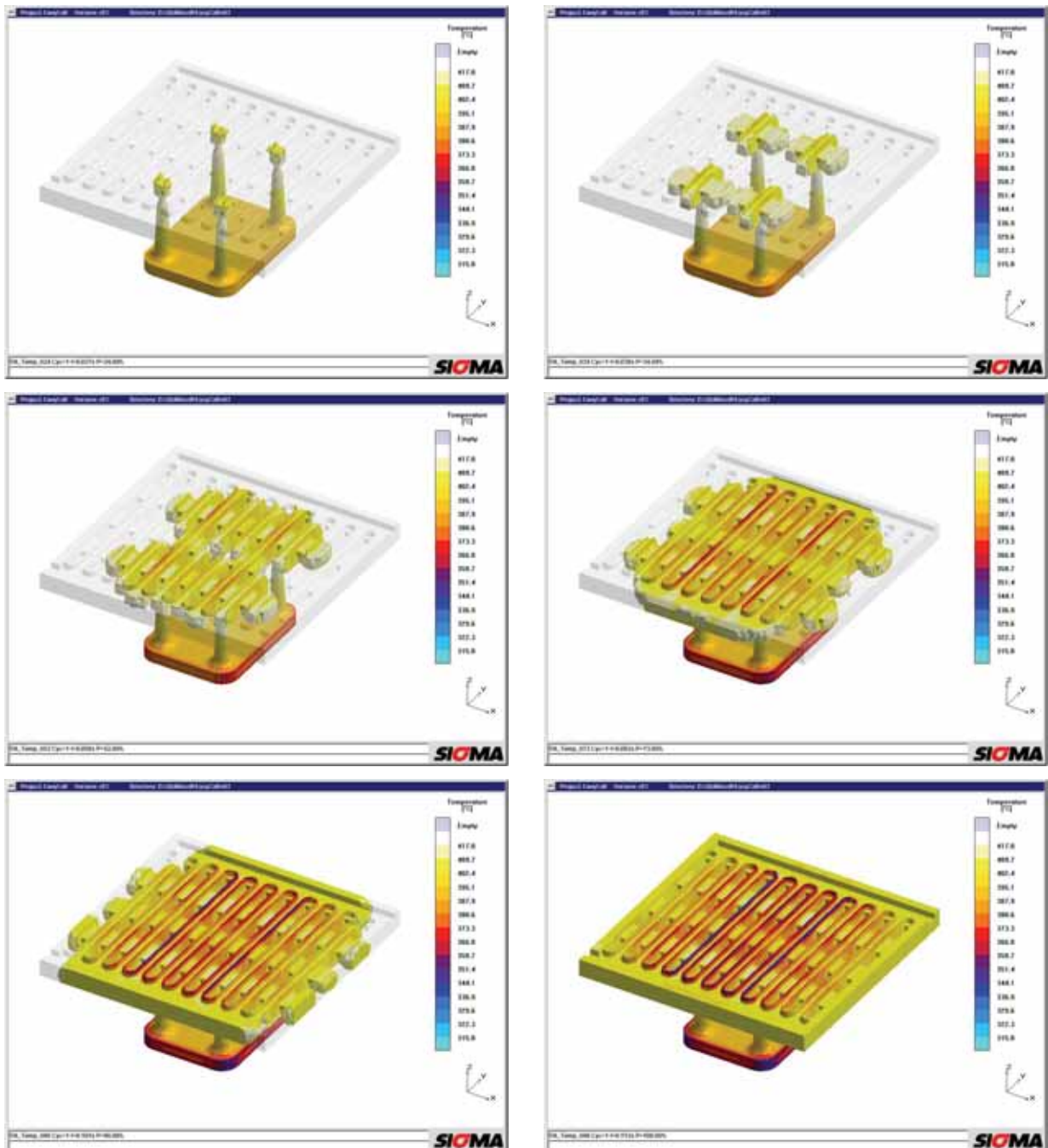


Abbildung 25: Formfüllsimulation am Beispiel PPSU

Die folgenden Abbildungen 26 und 27 zeigen jeweils weitere Resultate der Simulation anhand des Kunststoffes PPSU.

Abbildung 26 zeigt, dass der maximale Fließweg 25 mm beträgt. Dieser Fließweg erscheint ausreichend kurz um bei einem gut temperierten Werkzeug eine vollständige Formfüllung zu gewährleisten.

Abbildung 27 zeigt, dass aufgrund der 4 Anschnittpunkte mehrere Bindestellen bzw. -nähte zu erwarten sind, die unter Umständen zu lokalen Fehl- oder Problemstellen führen können.



Abbildung 26: Simulation der Fließweglängen
am Beispiel PPSU



Abbildung 27: Simulation der Bindenähte
am Beispiel PPSU

Nachdem die Simulationsergebnisse eine theoretische Formfüllung bestätigten, erfolgte die Fertigung des Spritzgießwerkzeuges bei HTP High Tech Plastics AG. Die folgenden Abbildungen 28 und 29 zeigen Aufnahmen der auswerferseitigen Formplatte des Spritzgießwerkzeuges mit dem Formbild des Grundkörpers.

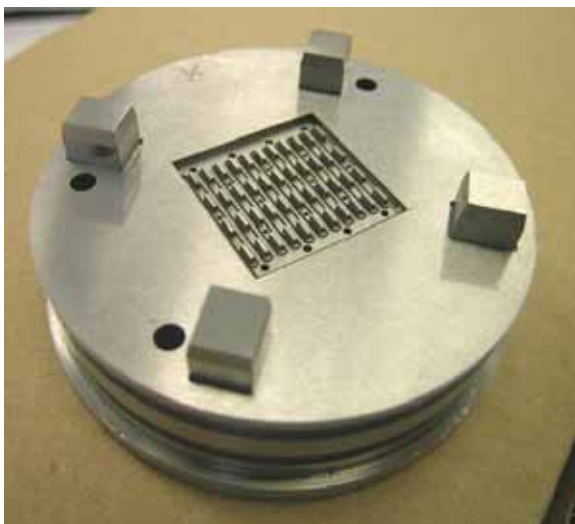


Abbildung 28: Auswerferseitige Formplatte des
Spritzgießwerkzeuges

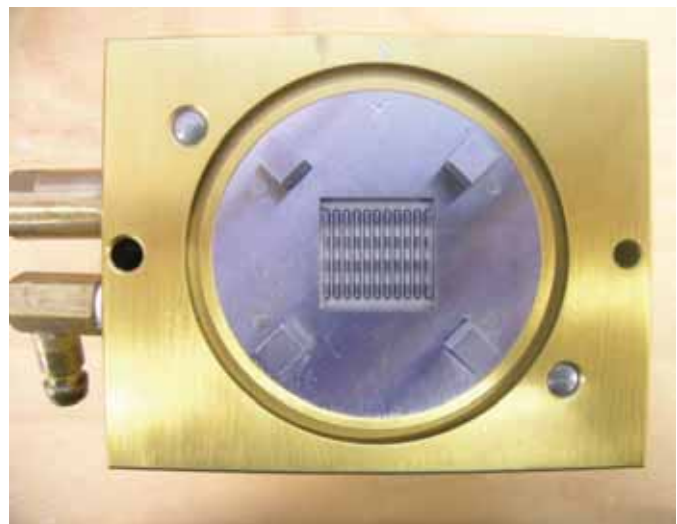


Abbildung 29: Auswerferseite des Spritzgießwerk-
zeuges mit eingebauter Formplatte

Abbildung 30 zeigt die Kavität der auswerferseitigen Formplatte, das Formbild des Grundkörpers der EasyCell. Abbildung 31 zeigt ein Detail aus der Kavität, aus dem hervorgeht, dass in

Anbetracht der feinen Strukturen, der Fertigung des Formeinsatzes besonderes Augenmerk geschenkt werden musste.

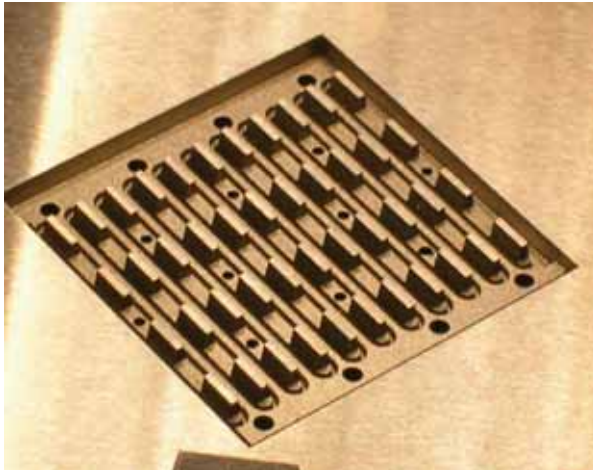


Abbildung 30: Kavität der auswerferseitigen Formplatte

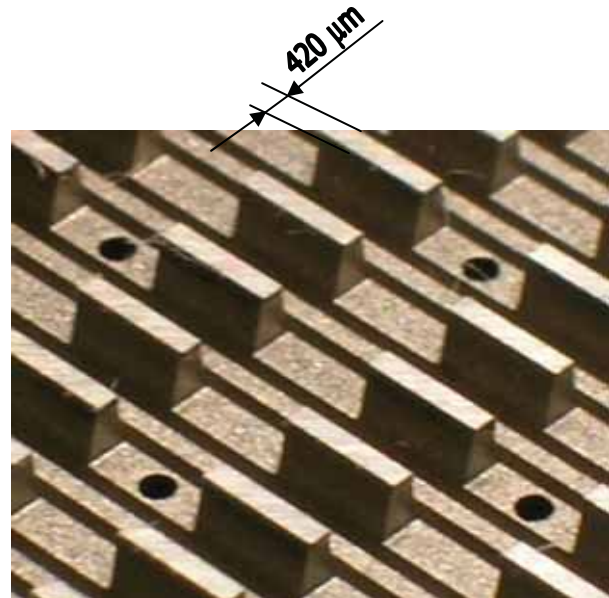


Abbildung 31: Detail aus der Kavität der auswerferseitigen Formplatte

ad 4. Spritzgießfertigung des Grundkörpers

Die Spritzgießfertigung des Grundkörpers aus den 5 ausgewählten Kunststoffen (siehe Tabelle 18) erfolgte auf einer Spritzgießmaschine vom Typ Microsystem 50 der Fa. Battenfeld Kunststoffmaschinen GmbH. Abbildung 32 zeigt die Mikrospritzgießmaschine.



Abbildung 32: Battenfeld Mikrospritzgießmaschine vom Typ Microsystem 50

Abbildung 33 zeigt die in der Spritzgießmaschine montierte auswerferseitige Werkzeughälfte sowie einen spritzgießtechnisch hergestellten Grundkörper der EasyCell. Abbildung 34 zeigt das gesamte Spritzgießwerkzeug in 3-Platten-Bauweise.

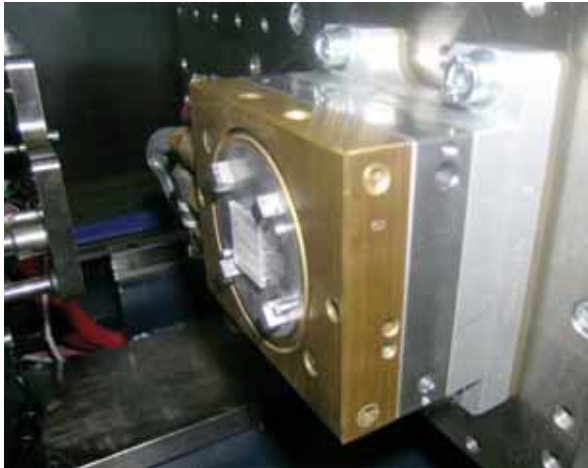


Abbildung 33: Auswerferseitige Werkzeughälfte in der Spritzgießmaschine

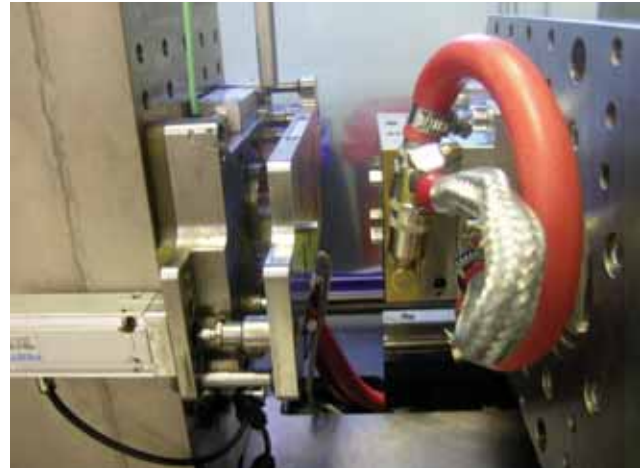


Abbildung 34: Spritzgießwerkzeug in der Spritzgießmaschine

In weiterer Folge wurde ein Kunststoff nach dem anderen zur Produktion der Grundkörper herangezogen. Mit Ausnahme des Kunststoffes PEEK, bei dem die sehr hohe Verarbeitungstemperatur zu Problemen führte, ließen sich mit den restlichen 4 Kunststoffen brauchbare Grundkörper herstellen. Zusätzlich zu den Grundkörpern aus den Kunststoffen wurden auch Grundkörper aus dem keramischen Werkstoff Aluminiumoxid mittels Pulverspritzgießverfahren hergestellt.

Besonderes Augenmerk bei der spritzgießtechnischen Herstellung der Grundkörper musste auf eine vollständige und saubere Abformung der umlaufenden Mikrostege gelegt werden. Um eine vollständige und saubere Abformung sicherzustellen, mussten hohe Werkzeugtemperaturen eingestellt werden. Dies wiederum erforderte lange Kühlzeiten weshalb sich Zykluszeiten von rund 20 s ergaben.

Derartig hohe Zykluszeiten wirken einer kostengünstigen Massenfertigung jedoch entgegen. Unter industriellen Gesichtspunkten müssten die erreichten Zykluszeiten mindestens halbiert, wenn nicht gedrittelt werden.

Um nun den Aspekt der einfacheren Massenfertigbarkeit weiterhin zu berücksichtigen, wurden umfangreiche und weiterführende Untersuchungen angestellt, die eine schnelle und dynamische Temperierung der Formeinsätze zum Ziel hatten. Ein rascher variothermer Prozess, der ein Aufheizen und ein Abkühlen der Formeinsätze in nur wenigen Sekunden ermöglicht, musste entwickelt und verifiziert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kapitel 4.6.3 ‚Bau einer Versuchsanordnung‘ zusammengefasst.

Die Abbildungen 35 bis 39 zeigen die hergestellten Grundkörper aus den einzelnen Werkstoffen sowie den jeweiligen Anfluß. Abbildung 40 zeigt ein Grünteil und ein Sinterteil des Grundkörpers aus Aluminiumoxid.

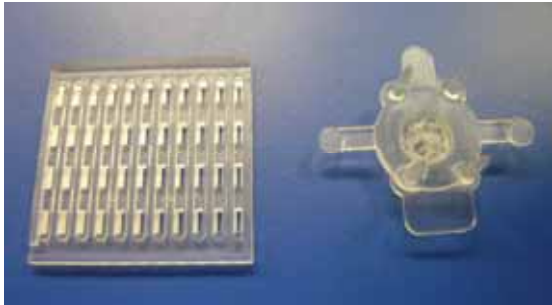


Abbildung 35: PCT

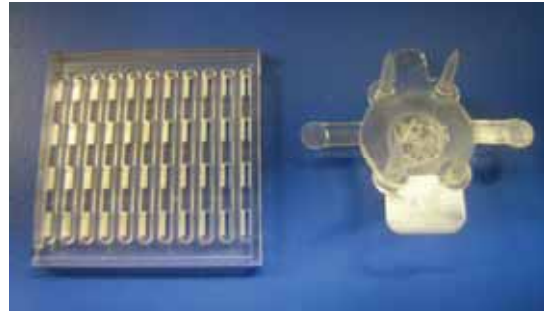


Abbildung 36: PETG

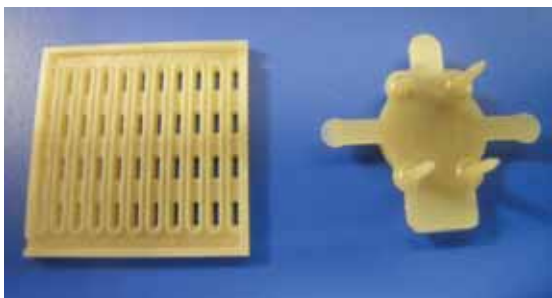


Abbildung 37: PES

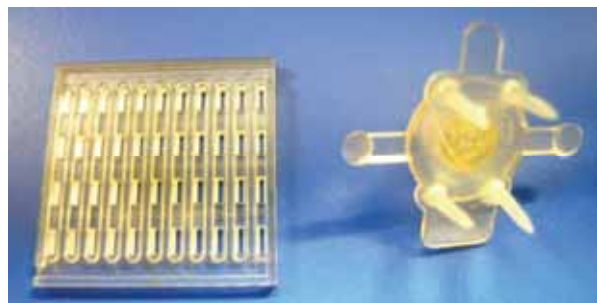


Abbildung 38: PPSU

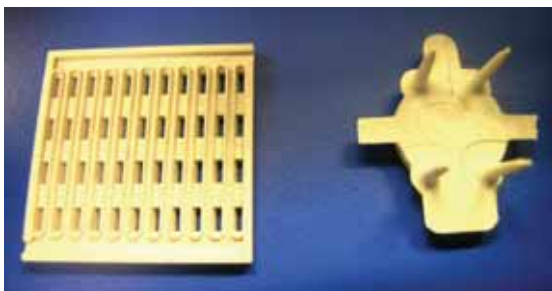


Abbildung 39: Aluminiumoxid (Keramik)

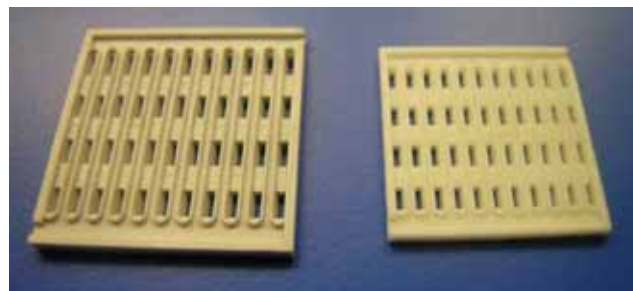


Abbildung 40: Grünteil (links) und Sinterteil (rechts)
aus Aluminiumoxid

Bereits während der Produktion der Basisplatten wurde eine Qualitätssicherung durchgeführt, bei der speziell die umlaufenden Mikrostege unter dem Mikroskop in Hinblick auf eine vollständige und saubere Abformung inspiziert wurden. Sobald Probleme bzw. unvollständig abgeformte Bereiche entdeckt wurden, wurden die Spritzparameter an der Spritzgießmaschine nachjustiert.

Abbildung 41 zeigt beispielhaft einen Grundkörper mit unvollständig abgeformten Mikrostege, während Abbildung 42 beispielhaft einen Grundkörper mit vollständig abgeformten Mikrostege zeigt.

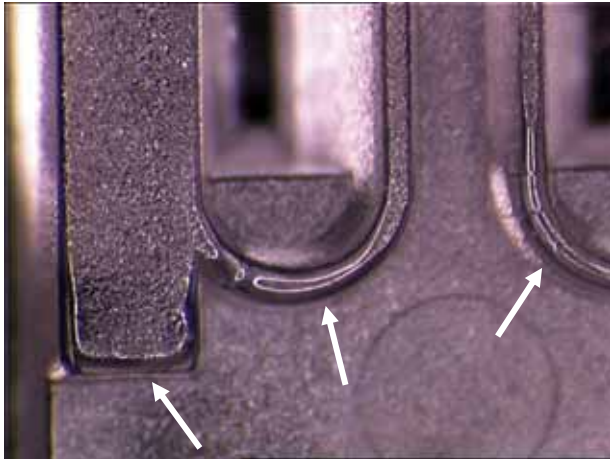


Abbildung 41: Unvollständig abgeformte Mikrostege (beispielhaft)

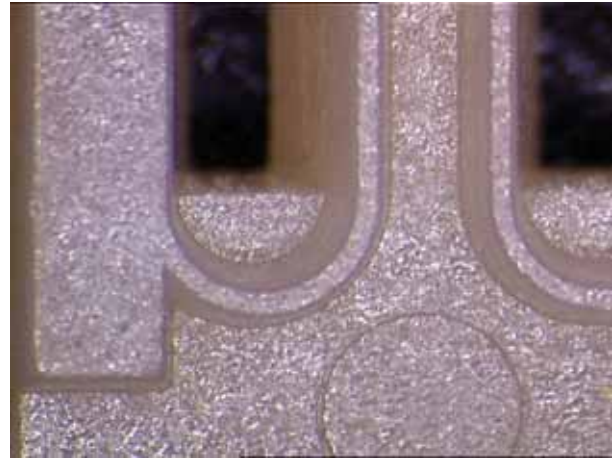


Abbildung 42: Vollständig abgeformte Mikrostege (beispielhaft)

Die spritzgießtechnische Herstellung der Grundkörper konnte unter Berücksichtigung einer vollständigen Abformung der Mikrostege mit 4 der 5 vorausgewählten Kunststoffe und mit 1 keramischen Werkstoff (Aluminiumoxid) erfolgreich bewerkstelligt werden

4.6.3 Bau einer Versuchsanordnung

Ziel war es, Versuchsanordnungen zu realisieren, mit Hilfe derer die folgenden Untersuchungen durchgeführt werden konnten:

1. Versuchsstand zur Simulation der in Kapitel 4.6.1 beschriebenen Prozessschritte zur Herstellung der EasyCell
2. Versuchsstand zur variothermen Prozessführung beim Spritzgießen

ad 1. Simulation der Prozessschritte zur Herstellung der EasyCell

Aus Versuchsmustern der 5 vorausgewählten Kunststoffe wurden jeweils 50 x 50 mm² große Versuchsplatten zugeschnitten und mit acht 5 mm breiten Fräsbahnen mit einer Tiefe von 500 µm versehen.

Im Rahmen von Vorversuchen wurden die Fräsbahnen bei den Versuchsplatten mit Füllmaterial versehen. Das über die Fräsbahnen stehende Füllmaterial wurde abgezogen und mit destilliertem Wasser befeuchtet.

Abbildung 43 zeigt die 5 Versuchsplatten mit dem in die Fräsbahnen eingebrachten Füllmaterial.

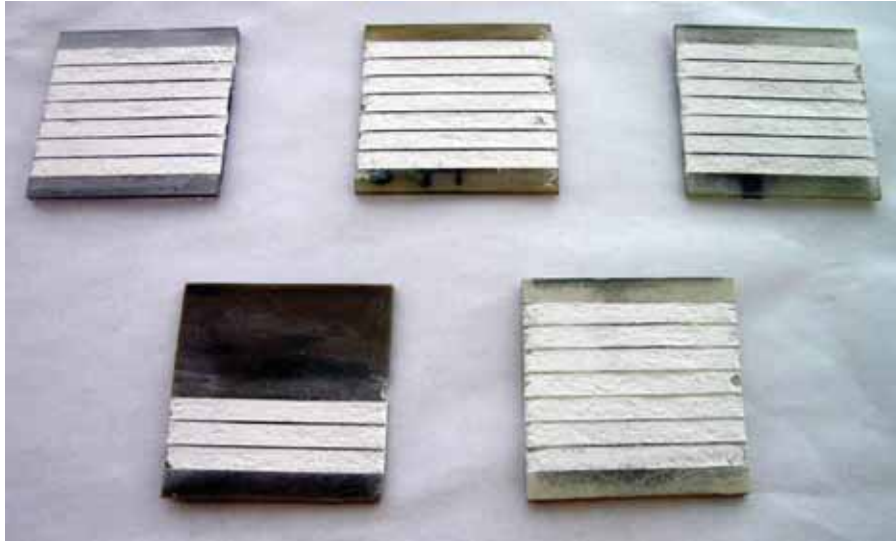


Abbildung 43: Gefräste Versuchsplatten mit Füllmaterial in den Fräsbahnen

Bei den Proben wurde vor Aufbringung der Membranlösung der Füllkörper mit dest. Wasser benetzt, um das Salz zu sättigen. So sollte eine Anziehung der Membranlösung durch die Kapillarwirkung des Füllkörpers verhindert werden.

Doch trotz der vorangegangenen Benetzung mit destilliertem Wasser löste sich das Füllsalz in der Membranlösung auf und kristallisiert gegen Ende der Trocknung aus. Aus Abbildung 44 ist zu erkennen, dass sich die Oberfläche der Membranlösung nach einiger Zeit zu verfestigen beginnt.



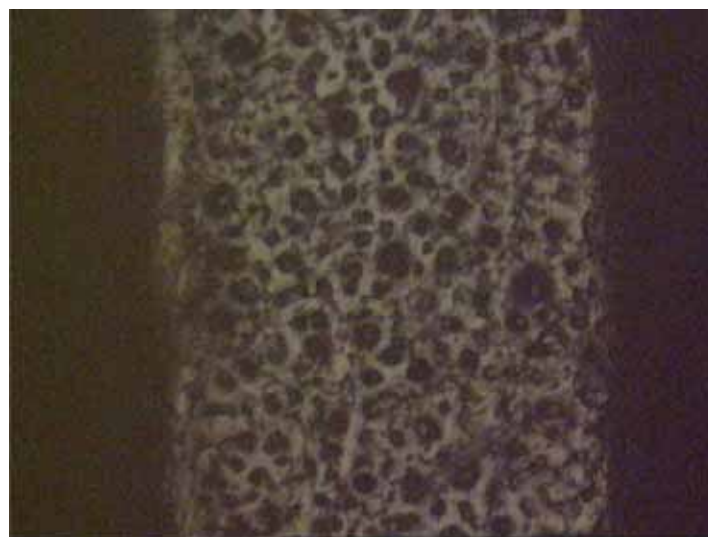
Abbildung 44: Versuchsplatte mit aufgebrachtter Membranlösung nach dreistündiger Trocknungszeit

Nach dem endgültigem Verdunsten der Lösung und Bildung der Membran, entstehen die Kristalle, wie in Abbildung 45 zu sehen ist.



*Abbildung 45: Rekrystallisationserscheinung des Füllmaterials
bei Verwendung von wasserhaltiger Membranlösung*

Der Grund für dieses Verhalten scheint im zu hohen Wassergehalt der verwendeten Nafion-Lösung zu liegen. Erste Versuche, bei denen dieses Phänomen nicht auftrat, wurden mit einer rein alkoholischen Membranlösung durchgeführt. Abbildung 46 zeigt, dass bei Verwendung dieser Nafion-Lösung keine Probleme auftraten.



*Abbildung 46: 200-fache Vergrößerung eines Kanalsteiges
mit Nafion-Membran aus rein alkoholischer Lösung*

Mit Hilfe des Versuchsstandes gelang es, die notwendigen Prozessschritte zur Herstellung einer EasyCell zu simulieren. Diese Versuche, mussten jedoch als zeitsparende Vorversuche gewertet

werden, da die geometrieabhängige Feinabstimmung der Einzelprozesse naturgemäß erst an den mikrostrukturierten Original-Grundkörpern der EasyCell erfolgen konnte.

ad 2. Versuchsstand zur variothermen Prozessführung beim Spritzgießen

Wie bereits erwähnt traten bei der spritzgießtechnischen Herstellung der Grundkörper lange Zykluszeiten auf, die einer industriellen Massenfertigung entgegenstehen. Unter industriellen Gesichtspunkten müssten die erreichten Zykluszeiten mindestens halbiert, wenn nicht gedrittelt werden.

Aus diesem Grund wurden Überlegungen angestellt, wie die Zykluszeit mit Hilfe einer schnellen und dynamischen Temperierung der Formeinsätze reduziert werden kann. Ein rascher variothermer Prozess, der ein Aufheizen und ein Abkühlen der Formeinsätze in nur wenigen Sekunden ermöglicht, sollte entwickelt und mit Hilfe eines Versuchsstandes getestet werden.

Das ausgewählte Konzept zur Temperierung basiert auf dem Prinzip der Induktionsheizung. Durch ein elektromagnetisches Wechselfeld werden Wirbelströme direkt im Werkzeug induziert. Diese Wirbelströme werden durch den elektrischen Widerstand des Werkzeugstahles in Wärme umgesetzt.

Die Erwärmung erfolgt somit direkt im Werkzeug, Wärme muss nicht von einer Heizpatrone oder einem anderen Heizmedium zum Werkzeug geleitet werden. Die aufzuheizende Masse wird dadurch minimiert, das Aufheizen des Werkzeuges kann mit geringeren Energiemengen schnell durchgeführt werden.

Die Kühlung erfolgt durch einen klassischen Kühlkreislauf mit Wasser oder Öl. Durch die Minimierung der aufzuheizenden Masse ist die gesamte Wärmemenge gering, das Abkühlen kann somit ebenfalls schnell erfolgen.

Basierend auf diesen konzeptionellen Überlegungen wurde ein Versuchsstand konstruiert, mit Hilfe dessen der Zusammenhang zwischen der Dimensionierung der einzelnen Bauteile und der Funktion der Wirbelströme untersucht werden konnte. Abbildung 47 zeigt eine 3D-Ansicht des konstruierten Versuchsstandes mit Endabmessungen von rund 60 mm x 100 mm x 40 mm.

Ein Formeinsatz mit einem Durchmesser von 23 mm und einer Dicke von 4,5 mm befindet sich genau über einer Spule, welche in einem Schalenkern aus ferritischem Material eingebettet ist. Dieser Schalenkern dient einerseits zur elektrischen Isolierung der Spule, andererseits leitet er das magnetische Feld zum Formeinsatz.

Bei der Dimensionierung der einzelnen Bauteile wurde darauf geachtet, dass verschieden große Schalenkerne und Spulen getestet werden können um den Zusammenhang zwischen der Erregerfrequenz und der Windungsanzahl ermitteln zu können.

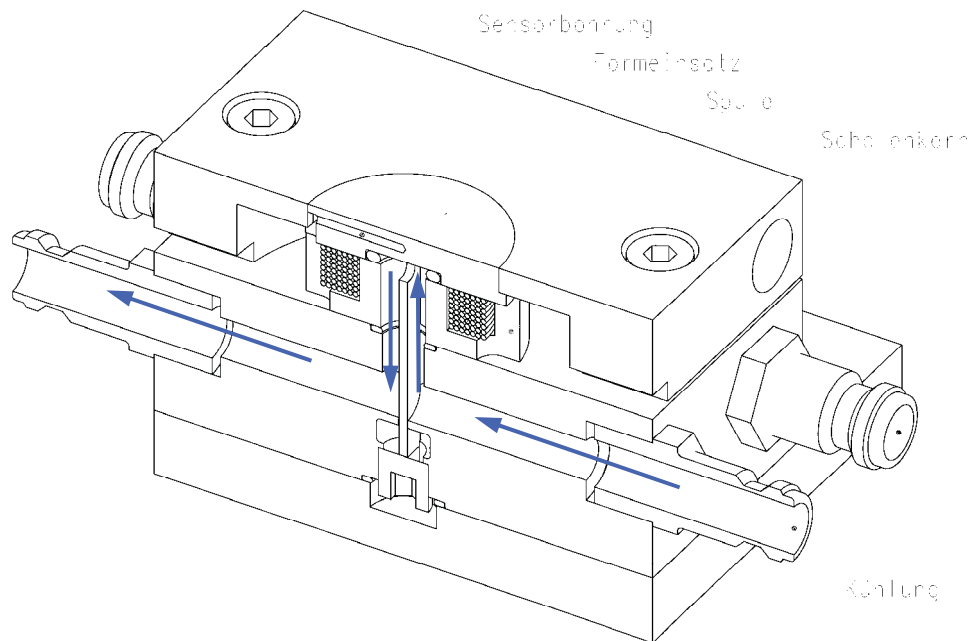


Abbildung 47: Schnitt durch den konstruierten Versuchsstand zur variothermen Prozessführung

Abbildung 47 zeigt, dass der Versuchsstand zur variothermen Prozessführung aus drei Platten besteht. Die unterste Platte dient zur Fixierung des Aufbaues. In der mittleren Platte ist neben den durchgängigen äußeren Kühlbohrungen auch eine mittige Fingerkühlung ausgeführt. Durch diese Fingerkühlung ist es möglich, ein Kühlmedium direkt an den dynamisch zu temperierenden Formeinsatz heranzuführen (siehe blaue Pfeile in Abbildung 47). Die oberste Platte ist auch mit durchgehenden Kühlbohrungen ausgeführt und dient zur Fixierung des Schalenkernes und des Formeinsatzes, welcher zur Temperaturregelung eine Sensorbohrung aufweist. Dieser Aufbau des Versuchsstandes ermöglicht das schnelle Wechseln von Spule und Schalenkern.

Abbildung 48 zeigt den realisierten und aufgebauten Versuchsstand.



Abbildung 48: Versuchsaufbau des variothermen Versuchsstandes

Aus Abbildung 48 ist zu ersehen, dass weitere Temperatursensoren radial verteilt angebracht wurden, um Aussagen über die Homogenität der Temperierung liefern zu können.

Um nun einen variothermen Prozess simulieren und Messungen durchführen zu können mussten einige zusätzliche Geräte und Hilfskomponenten aufgebaut und in Betrieb genommen werden, welche in den Abbildungen 49 und 50 gezeigt sind.

Das elektromagnetische Wechselfeld wird mit einer Spule und einem Leistungsgenerator erzeugt. Zur Minimierung der Verlustleistung im Generator wird mit rechteckförmigen Signalen gearbeitet. Die Leistungselektronik besteht aus einer IGBT Halbbrücke und AC-Kopplung der Spule.

Die Endstufe wurde für einen Frequenzbereich von 5 kHz bis 100 kHz, einem Eingangsspannungsbereich von 20 V bis 1200 V, und einem Laststrom von maximal 60 A dimensioniert. Die Ansteuerung erfolgt mit einem Frequenzgenerator mit TTL Signal.

Die Energieversorgung wurde mit einem 3 kW Labornetzgerät mit einer Ausgangsspannung bis 100 V aufgebaut. Zur Dokumentation der elektrischen Eigenschaften wurde eine Strom-Spannungsmessung mit einem Oszilloskop implementiert.

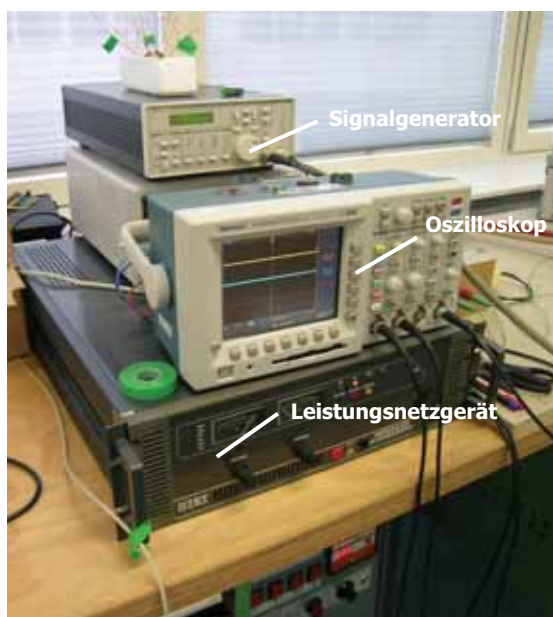


Abbildung 49: Elektronische Geräte für den Betrieb des Versuchsstandes

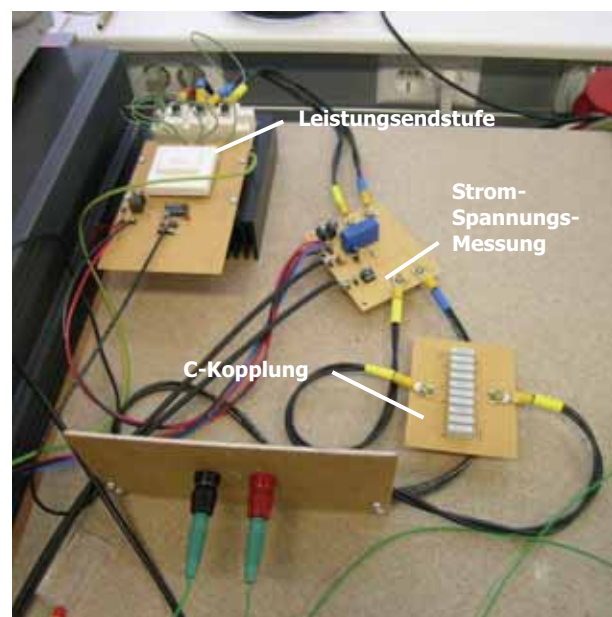


Abbildung 50: Elektronische Hilfskomponenten für den Betrieb des Versuchsstandes

Die Sensoren wurden durch Zuhilfenahme von einem wärmeleitenden Kleber an den Kontaktstellen galvanisch getrennt und fix verbaut. Diese galvanische Trennung ist notwendig, weil die von der Spule in den Formeinsatz induzierten Wirbelströme auch eine Spannung in den Temperatursensoren bewirken. Diese Spannung würde den Messwert der Sensoren so weit verändern, sodass das Ergebnis unbrauchbar ist.

Für die Messungen wurden verschieden große Schalenkerne verwendet, die in den Abbildungen 51 und 52 gezeigt sind. In diese Schalenkerne wurden Spulen mit unterschiedlicher Windungszahl gelegt und mit einer Spannung zwischen 80 und 100 Volt betrieben. In dem großen Schalenkern wurden Spulen mit 45, 35, 25, 2 x 15 und 4 x 15 Windungen eingebaut. Die Spulen mit den 2 x 15 und 4 x 15 Windungen waren deshalb notwendig, da bei einer einfachen Wicklung von 15 Windungen die Stromstärke im Draht zu hoch wäre. Durch diese hohe Strömstärke entsteht in der Spule eine sehr hohe Temperatur, welche zum Auflösen der Isolierschicht des Drahtes führt. Dieses Auflösen der Isolierschicht führt in der Praxis zum Auftreten eines Kurzschlusses und schlussendlich zur Zerstörung der Spule. In der Abbildung 51 sieht man die Schalenkerne samt Spulen mit 45, 35 25 und 2 x 15 Windungen von links nach rechts. In Abbildung 52 sieht man die Schalenkerne samt Spulen mit 35, 30, 25, 20, und 2 x 15 Windungen von links nach rechts.



Abbildung 51: Verwendete Spulen mit großen Schalenkernen

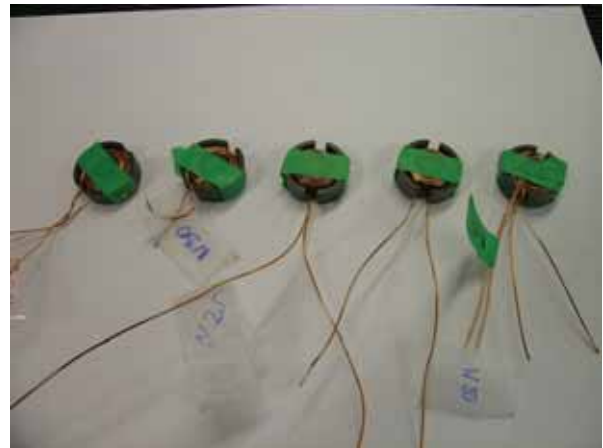


Abbildung 52: Verwendete Spulen mit kleinen Schalenkernen

Die Erfassung der einzelnen Signale erfolgte über das in Abbildung 53 gezeigte 8-fach Rack der Firma DEWETRON und über eine A/D-Karte zur weiteren Verarbeitung mit der Software DASylab.



Abbildung 53: 8-fach Rack zur Messdatenerfassung

Die Kanalbelegung des Racks ist von links nach rechts:

- Kanal 0: nicht verwendet
- Kanal 1-5: Temperatursensoren an der Oberfläche des Formeinsatzes
- Kanal 6: Zusätzlich geschirmter Temperatursensor für die Regelung
- Kanal 7: Schaltbarer Ausgang zum Ein- und Ausschalten des Frequenzgenerators

Abbildung 54 zeigt das Schaltbild zur Durchführung der Messung.

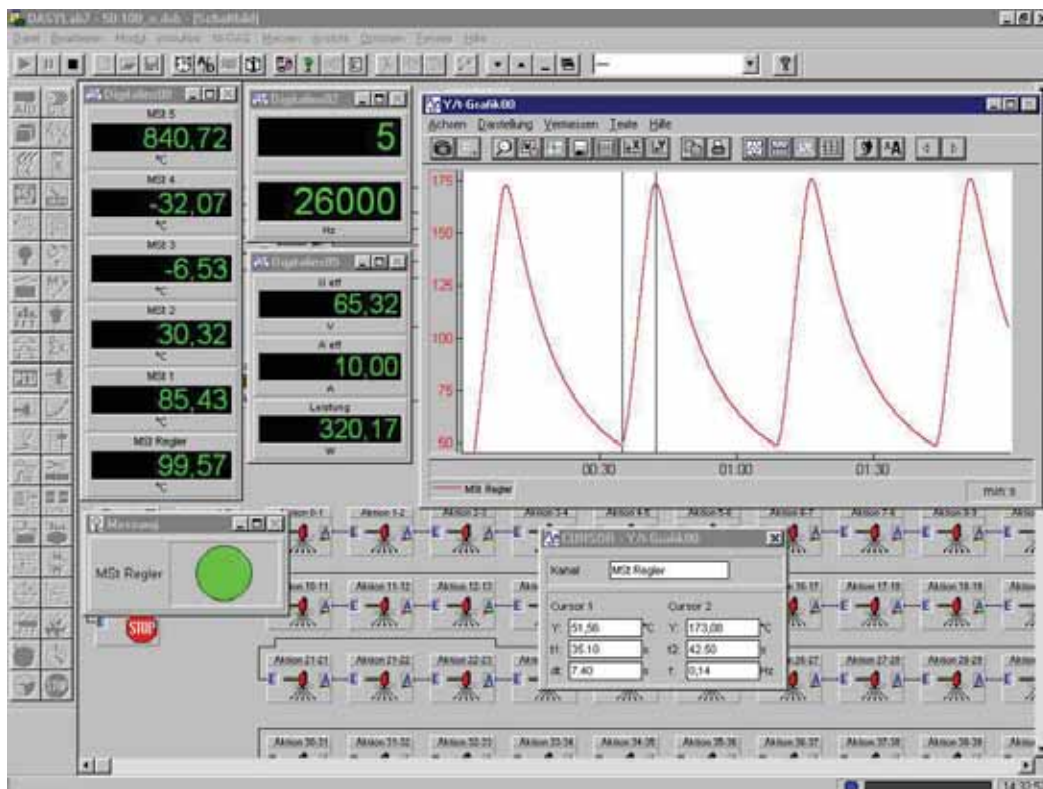


Abbildung 54: Schaltbild DASYlab

Abbildung 55 zeigt beispielhaft das Aufheizen bzw. das Abkühlen über drei Zyklen bei der Verwendung des kleinen Schalenkernes und einer Spule mit 15 Windungen. Die Temperaturregelung war so eingestellt, dass sich der Formeinsatz von Raumtemperatur auf ca. 250°C aufheizt, um dann in einem Bereich zwischen 150°C und 250°C abwechselnd zu heizen und zu kühlen.

Aus Abbildung 55 erkennt man auch recht deutlich, dass das Aufheizen schneller geschieht als das Abkühlen. Die maximal erreichbaren Werte liegen beim Aufheizen im Bereich von ca. 26-28°C/Sekunde und beim Abkühlen ca. bei 11°C/Sekunde.

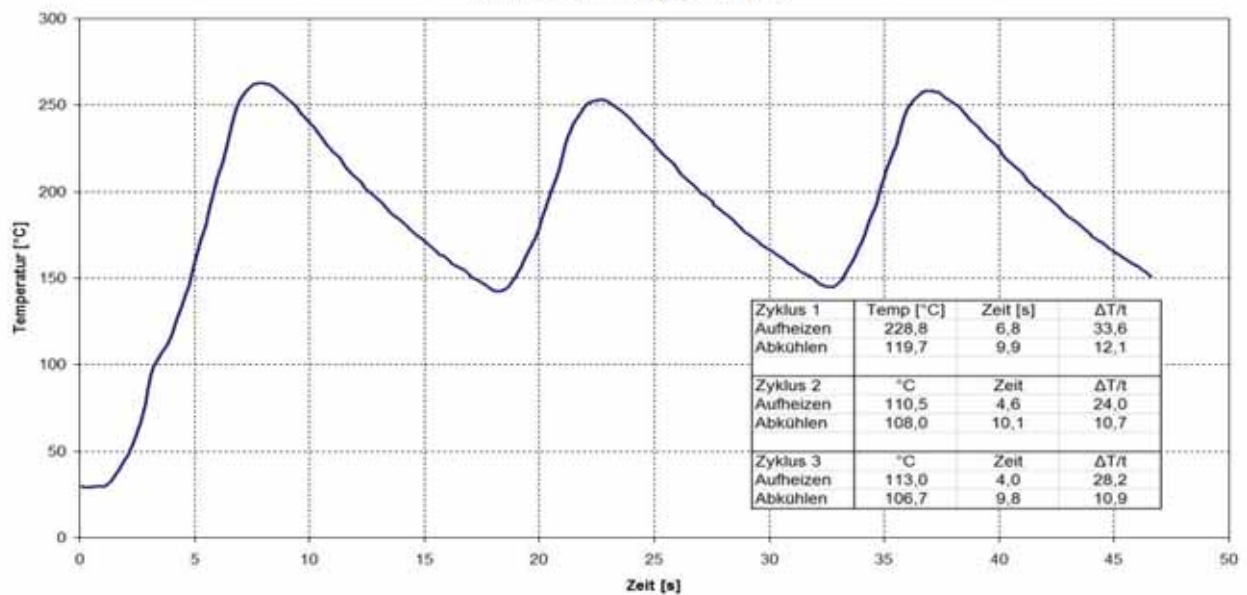


Abbildung 55: Beispielhaftes Ergebnis der Messungen mit 3 Aufheiz- und Abkühlzyklen

Die folgenden Tabellen 19 und 20 zeigen den Zusammenhang zwischen der angelegten Spannung und der erreichbaren Temperaturerhöhung $\Delta T/t$ in $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ bei der für die jeweilige Spule optimalen Frequenz. Spulen mit weniger Windungen erzielen höhere $\Delta T/t$ Werte, wobei sich jedoch der Arbeitspunkt der Frequenz nach oben verschiebt.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Messergebnisse mit dem kleinen Spulenkern

Windungszahl	Spannung	$\Delta T/t$ [$^{\circ}\text{C}/\text{s}$]	Frequenz [kHz]
N15	80V	25,7	32,6
N15	90V	30,9	34
N15	100V	39,7	35,6
N20	80V	16,3	21,6
N20	90V	22,3	22
N20	100V	28,8	32,4
N25	80V	13,9	17,8
N25	90V	18,8	19,6
N25	100V	26,6	20,4
N35	80V	11	11,8
N35	90V	15,2	12,8
N35	100V	20,2	13,8

Tabelle 20: Zusammenfassung der Messergebnisse mit dem großen Spulenkern

Windungszahl	Spannung	$\Delta T/t$ [°C/s]	Frequenz [kHz]
N15 - 2 fach	80V	11,7	26,4
N15 - 2 fach	90V	16,1	27
N15 - 2 fach	100V	20,4	28,2
N15 - 4 fach	80V	10	26,6
N15 - 4 fach	90V	14,5	27,4
N15 - 4 fach	100V	18,6	27,8
N25	80V	4,8	16,2
N25	90V	9	16,4
N25	100V	11,8	16,6
N35	80V	1	10,2
N35	90V	3,3	11,4
N35	100V	5,8	11,8
N45	80V	-	-
N45	90V	1,3	8,6
N45	100V	2,8	9

Zusammenfassend kann nun festgehalten werden, dass Spulen mit kleiner Wicklungszahl im kleinen Schalenkern mehr Leistung liefern, jedoch den Nachteil haben, dass ihre Lebensdauer aufgrund der hohen Stromstärke kurz ist.

Die Verwendung eines größeren Drahtquerschnittes ist nicht bedingt sinnvoll, weil aufgrund der hohen Frequenzen der so genannte Skin-Effekt auftritt. Dieser Effekt bewirkt, dass die Ladung nur mehr an der Oberfläche des Drahtes transportiert wird und sich eine Eindringtiefe von ca. 0,3 mm bei 35 kHz einstellt. Der bei den Versuchen verwendete Draht hatte einen Durchmesser von 0,71 mm und eine Isolation aus Klarlack.

Ein noch nicht gänzlich gelöstes Problem stellt der Ferritkern dar. Durch die Sprödigkeit des Ferritkerns handelt man sich bei einem zu großen oder einseitig wirkenden Druck Risse im Kern ein, welche bis zur Zerstörung des Ferritkernes gehen können. Bei diesem Druck handelt es sich beispielsweise um den Spritzdruck im Spritzgießwerkzeug.

Ein hinaufsetzen der angelegten Spannung würde vermutlich auch die Aufheizrate erhöhen, jedoch handelt man sich durch die Verschiebung des Arbeitspunktes der Frequenz zusätzlichen Aufwand in der Elektronik (wegen der hohen Frequenzen) und der Laborausstattung (höhere Leistungen) ein.

4.6.4 Zusammenbau der EasyCell

Ziel dieses Arbeitsschrittes war es, aus den hergestellten Grundkörpern Prototypen der EasyCell herzustellen. Dazu mussten Untersuchungen zu den folgenden Prozessschritten durchgeführt werden:

1. Aufbringung der elektrischen Ableitungen
2. Einbringung von Füllmaterial in die Kanäle
3. Aufbringung des Katalysatormaterials
4. Aufbringung des Membranmaterials
5. Ausbringung des Füllmaterials

ad 1. Aufbringung der elektrischen Ableitungen

Zur Aufbringung der elektrischen Ableitungen können verschiedene Methoden zum Einsatz gelangen. Es sind chemische, chemogalvanische und physikalische Methoden denkbar. Um eine möglichst gleichmäßige Schicht auf den mikrostrukturierten Grundkörper aufbringen zu können wurde das Sputterverfahren ausgewählt. Aus Gründen der Korrosionsstabilität wurde als Material für die Ableitungen hochreines Gold definiert, prinzipiell sind aber auch andere Edelmetalle denkbar.

Beim Sputtern wird das zu beschichtende Teil in eine Sputterkammer gelegt, welche mittels einer Membranpumpen evakuiert wird. Anschließend werden mittels Elektronenbeschuss Goldatome aus einem Goldtarget herausgeschlagen. Der Elektronenstrom kann variiert werden, ebenso die Aufbringungszeit und der Innendruck der Kammer. Vor Beginn der Besputterung wird die Kammer noch mit Argon gespült.

Vor der Besputterung wurden die einzelnen Grundkörper abgewogen. Danach wurden die Grundkörper bei einem Strom von 10 mA und einer Temperatur von 24°C, 10 Minuten lang besputtert. Danach wurden die Grundkörper entnommen, gewogen und anschließend erneut 10 Minuten lang von der Hinterseite besputtert und wieder gewogen.

Die aufgetragene Goldmenge nach der beidseitigen Beschichtung lag zwischen 0,0002 und 0,0005 g.

Die Bestimmung des Durchgangswiderstand erfolgte mittels 4-Punktmessung. Es wurde sowohl die Leitfähigkeit über die Diagonale, den Seiten, als auch von jedem einzelnen Steg untersucht. Es musste besonders darauf geachtet werden, ob unter Umständen auch nicht leitende Bereiche auftreten. Diese könnten in weiterer Folge zu einem partiellen Versagen der lateralen Zelle führen.

Die Abbildungen 56 und 57 zeigen beispielhaft Vorderseite und Rückseite eines Grundkörpers mit aufgebracht Goldschicht, die in weiterer Folge als elektrische Ableitung dient.

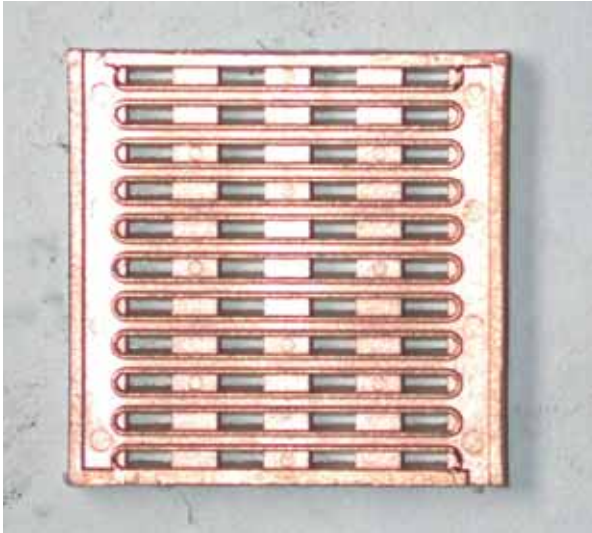


Abbildung 56: Mit Gold besputterte Vorderseite eines Grundkörpers (beispielhaft)

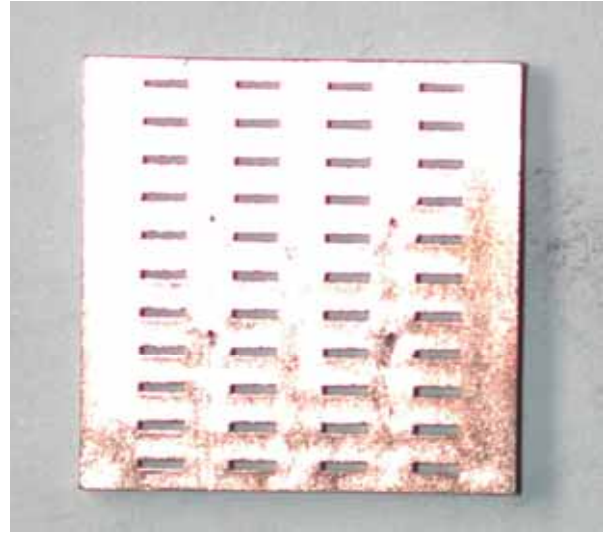


Abbildung 57: Mit Gold besputterte Rückseite eines Grundkörpers (beispielhaft)

Damit die elektrische Ableitung funktioniert, muss sichergestellt sein, dass sowohl die Seitenwände der Wasserstoff- und Sauerstoffkanäle als auch der Kanalgrund der Wasserstoffkanäle mit Gold beschichtet sind. Andererseits darf keine leitende Verbindung zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoffkanälen bestehen.

Abbildung 58 zeigt, dass auch auf den Kanalstegen Gold aufgesputtert wurde und somit eine leitende Verbindung zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoffkanälen besteht. Diese musste in einem Nachbearbeitungsschritt wieder abgetragen werden.

Abbildung 59 zeigt, dass auch am Kanalgrund der Wasserstoffkanäle Gold aufgebracht wurde.

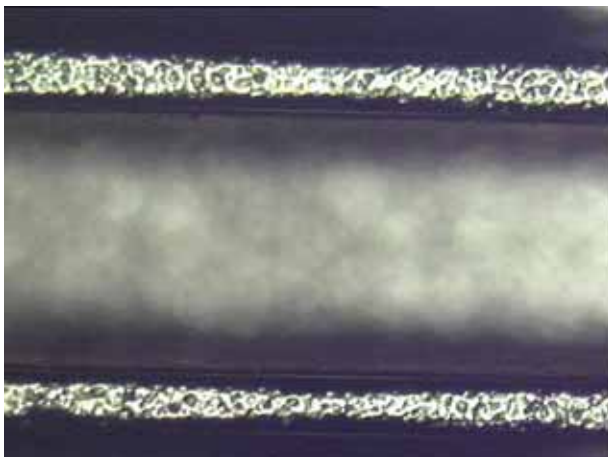


Abbildung 58: Gold auf den Kanalstegen eines Grundkörpers (beispielhaft)

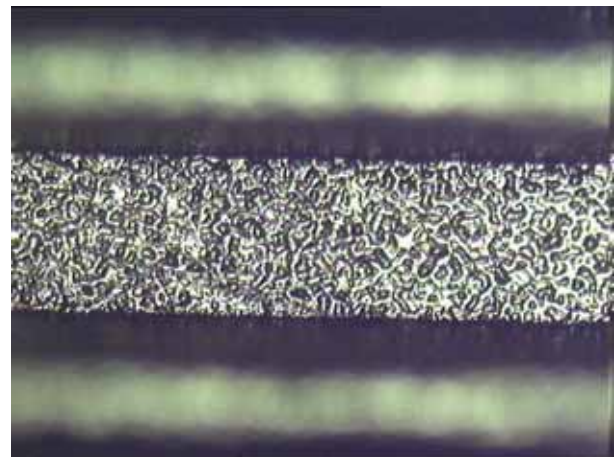


Abbildung 59: Gold am Kanalgrund eines Grundkörpers (beispielhaft)

Das Besputtern stellt somit eine brauchbare Möglichkeit der Anbringung der elektrischen Ableitungen auf den Grundkörpern der EasyCell dar. Besonders gut haften die Schichten auf den keramischen Grundkörpern.

Die Leitfähigkeit der aufgetragenen Schichten war bei allen Materialien und Grundkörpern in ausreichender Weise vorhanden. Die Flanken der Kanalstege hatten immer eine durchgehende leitende Verbindung zur Hinterseite der Platte. Dies stellt durchaus keine Selbstverständlichkeit dar, da erwartet werden konnte, dass beim Übergang von Vorder- auf Hinterseite eventuell Beschichtungslücken auftreten.

ad 2. Einbringung von Füllmaterial in die Kanäle

Die Untersuchungen zur Einbringung von Füllmaterial wurden durchgeführt, in dem 6 verschiedene Füllmaterialien getestet wurden. Dazu wurden die folgenden Materialien ausgewählt:

Mit den ausgewählten Materialien wurde versucht, die Kanäle des Grundkörpers zu befüllen, um eine Trägerschicht für das Katalysatormaterial zu schaffen.

Zunächst wurde versucht, die Füllmaterialien in eine möglichst verarbeitbare Form zu bringen. In den meisten Fällen gelang dies durch Lösen in Wasser. Nur bei Füllmaterial 1 war dies nicht erforderlich.

Danach wurden die einzelnen Füllmaterialien mit einer Spachtel in die Kanäle von Grundkörpern eingebracht, sodass sich mittels optischer Sichtkontrolle die Kanäle möglichst vollständig mit den Füllmaterialien füllten.

Die Abbildungen 60 bis 65 zeigen die Ergebnisse dieser Versuche, wobei sich herausstellte, dass 1 Füllmaterial überhaupt nicht geeignet war. Mit den anderen Füllmaterialien konnten zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden.

Mit den 5 übriggebliebenen Füllmaterialien wurden in weiterer Folge Versuche angestellt, die auf die Aufbringung einer Membran abzielten. Der tatsächliche Prozessverlauf sieht allerdings noch die Einbringung von Katalysatormaterial vor.

Nachdem dieses Katalysatormaterial sehr teuer ist, wurde zunächst vollständig auf eine Katalysatorschicht verzichtet. In einem weiteren Schritt wurde mit einer Schicht aus reinem Russ als Ersatzschicht und erst in einem letzten Schritt mit dem tatsächlichen Katalysatormaterial gearbeitet.



Abbildung 60: Füllmaterial 1



Abbildung 61: Füllmaterial 2



Abbildung 62: Füllmaterial 3



Abbildung 63: Füllmaterial 4

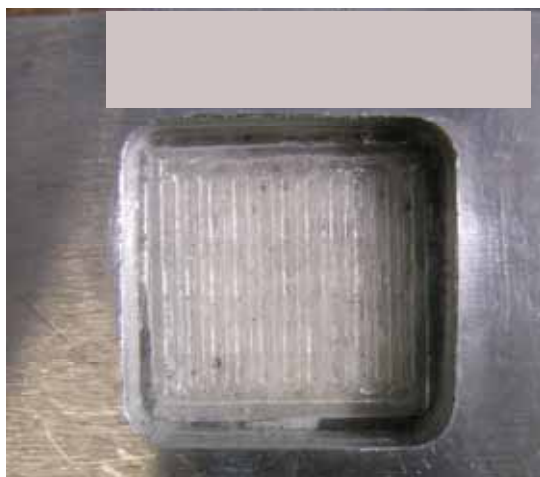


Abbildung 64: Füllmaterial 5

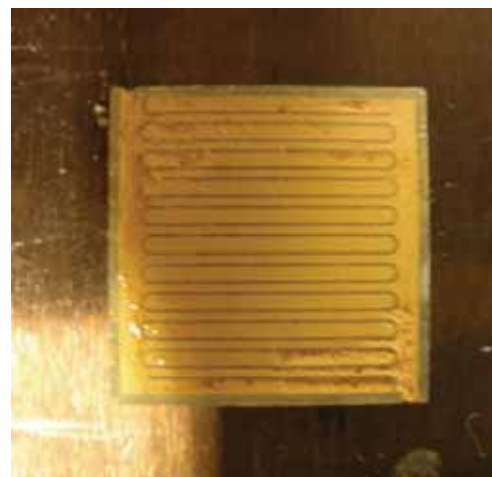


Abbildung 65: Füllmaterial 6

ad 4 Aufbringung des Membranmaterials

Zur Aufbringung des Membranmaterials wurden die folgenden Strategien verfolgt:

- Membran ohne Zwischenschicht aus Russ aus der Lösung aufbringen
- Membran mit Zwischenschicht aus Russ aus der Lösung und aus der eingedickten Lösung aufbringen
- Glasfasermatte mit eingedickter Lösung aus Membranmaterial tränken und auflegen

Bei der Aufbringung von Membranmaterial aus der Lösung wurden Untersuchungen mit 10 und 20 %iger Membranlösung durchgeführt. Die Abbildungen 66 bis 69 zeigen beispielhaft die Ergebnisse dieser Untersuchungen mit dem Füllmaterial 1.



Abbildung 66: Benetzt mit 0,1ml 10%iger Lösung



Abbildung 67: 10%ige Lösung trocken



Abbildung 68: Benetzt mit 0,1ml 20%iger Lösung



Abbildung 69: 20%ige Lösung trocken

Bei der Anwendung der 10 %igen Lösung trat eine Kristallisation des Füllstoffes auf, die sich ungünstig auf die Ausbildung der Membran auswirkte. Es wurden daher in weiterer Folge nur noch mit der 20 %igen Lösung Untersuchungen durchgeführt.

Abbildung 70 zeigt nun das Ergebnis bei Auftragung einer Vollständigen Membran auf das Füllmaterial 1. Zu erkennen sind kristallisierte Bereiche, die aufgrund des Wassergehalts der Lösung entstehen.



Abbildung 70: Füllstoff 1 mit Kristallisation an der Oberfläche

Die Versuche mit dem Füllmaterial 2 zeigten, dass ebenfalls eine Membran entstand, jedoch aber ein Teil des Füllmaterials gelöst wurde und in das Membranmaterial aufgenommen wurde, was sich sehr negativ auf die Eigenschaften der Membran auswirken könnte.



Abbildung 71: Füllstoff 2

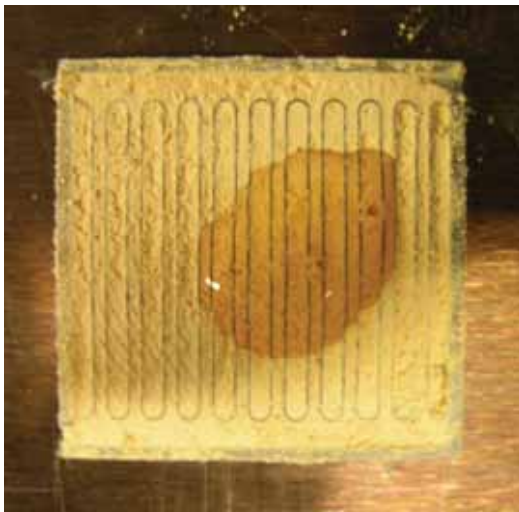
Bei Verwendung des Füllmaterials 3 konnte ebenfalls eine Membran ausgebildet werden, allerdings war erneut negativ zu bemerken, dass Füllmaterial gelöst wurde und in das Membranmaterial übergang, wie Abbildung 72 zeigt.



Abbildung 72: Füllstoff 3

Bei der Verwendung von Füllmaterial 6 zeigte sich, dass die Lösung nur leicht eine Membran ausbildete, jedoch sehr stark in den Füllstoff eindrang, was allerdings keinesfalls erwünscht ist.

Abbildung 73 zeigt einen mit Füllmaterial 6 gefüllten Grundkörper mit aufgebrachtem Tropfen der Membranlösung. Abbildung 74 zeigt dieselbe Probe nach der Trocknung des Tropfens.



*Abbildung 73: Füllmaterial 6 mit Membranlösung
benetzt*



*Abbildung 74: Füllmaterial 6 mit Membranlösung
trocken*

Die Versuche bei denen Füllmaterial 4 verwendet wurde zeigten ein Herauslösen von einzelnen Partikeln des Füllmaterials, die in weiterer Folge in der Membran zu erkennen waren.

Abbildung 75 zeigt einen mit Füllmaterial 4 gefüllten Grundkörper, bei dem eine Membran gut ausgeprägt werden konnte, jedoch vereinzelt Partikel in der Membran eingeschlossen sind, was

ebenfalls zu einer negativen Beeinflussung der Funktion der Membran führen würde. Allerdings wurden die Partikeln nicht gelöst.



Abbildung 75: Füllstoff 4

Aus den bisherigen Untersuchungen zur Aufbringung einer Membran aus der Lösung zeigte sich, dass die Füllmaterialien 1 und 4 am besten geeignet sind.

In einem nächsten Schritt wurde zwischen Füllmaterial und Membran eine Zwischenschicht aus Russ eingebracht, weil in der endgültigen Prozessabfolge Katalysatormaterial (platinbeladener Russ) eingebracht werden muss. Nachdem das Katalysatormaterial sehr teuer ist, wurden die folgenden Untersuchungen mit reinem Russ durchgeführt.

Der Russ wurde mit Hilfe eines Schleifpapiers aufgebracht, wobei sich herausstellte, dass diese Art der Aufbringung nur für Füllmaterial 4 gut geeignet ist. Abbildung 76 zeigt einen Grundkörper mit dem Füllmaterial 4 und aufgebrachtener Zwischenschicht aus Russ.

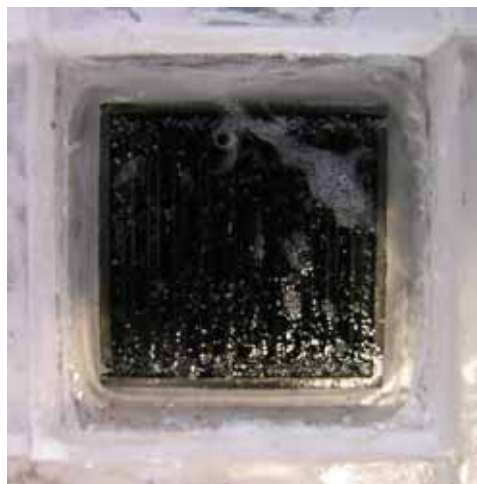


Abbildung 76: Vollständig ausgeprägte Membran auf der Zwischenschicht aus Russ

Abbildung 77 zeigt einen Schnitt durch die in Abbildung 76 gezeigte Probe. Zu erkennen sind der Grundkörper, die mit dem Füllmaterial 4 ausgefüllten Kanäle, die aufgebrauchte Zwischenschicht aus Russ sowie die aufgebrauchte Membran. Da der Russ schwarz und die aufgebrauchte Membran durchsichtig ist, kann diese in Abbildung 77 nur schwer erkannt werden. Abbildung 78 zeigt jedoch, dass kein Russ auf den Stegen haftet und eine vollständig ausgeprägte Membran vorhanden ist.

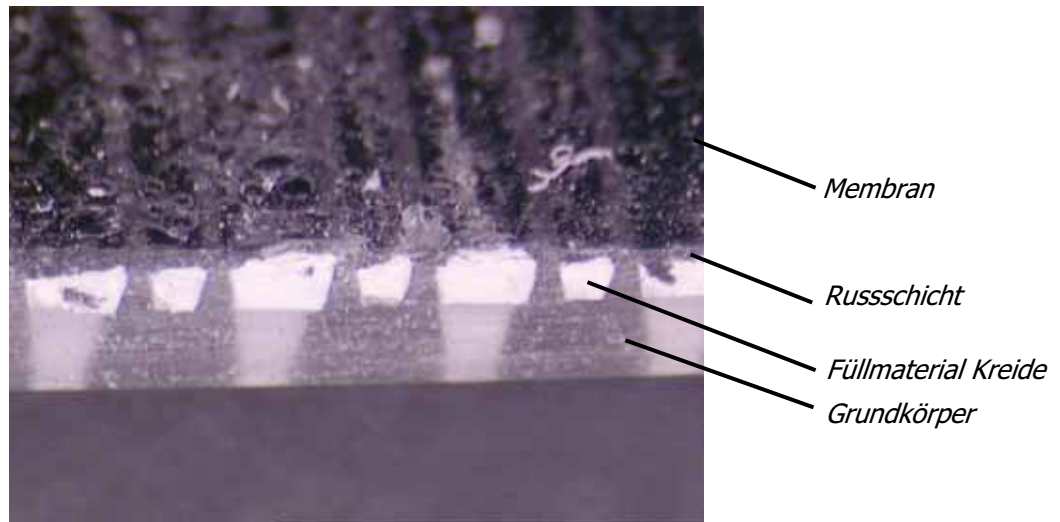


Abbildung 77: Schnitt durch die Probe



Abbildung 78: Draufsicht auf die Probe (kein Russ auf den Stegen)

Um nun das Aufbringen des Membranmaterials zu erleichtern und um zu verhindern, dass Membranmaterial durch die Russschicht in das Füllmaterial dringt wurden Versuche mit eingedickter Lösung durchgeführt. Das Eindicken der Lösung erfolgte durch Erhitzen und

Verdampfen des Lösungsmittels, bis die Zähigkeit des Membranmaterials deutlich höher und ein Fließen gerade noch möglich war.

Abbildung 79 zeigt zum einen eine Membran die aus eingedickter Lösung direkt auf das Füllmaterial 4 aufgebracht wurde (links) und zum anderen auf die Zwischenschicht aus Russ aufgebracht wurde (rechts).

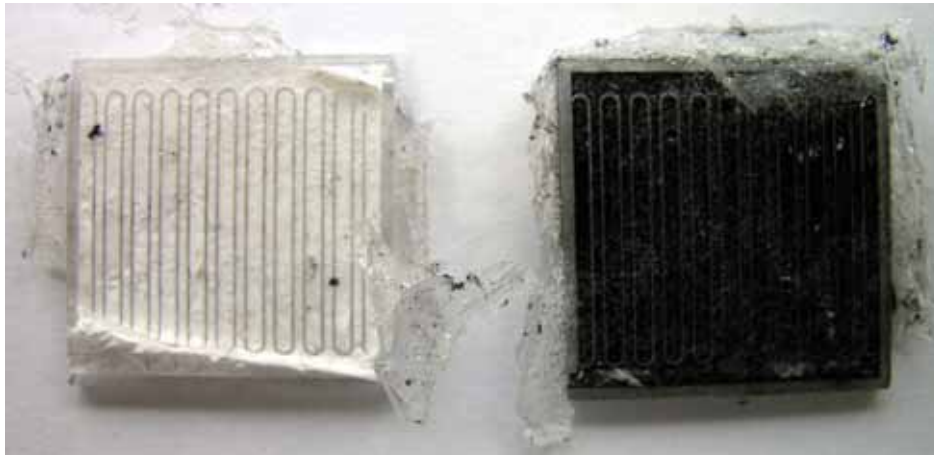


Abbildung 79: Membranen aus eingedickter Lösung ohne (links) und mit (rechts) Zwischenschicht aus Russ

Die Untersuchungen zeigten, dass sich eine gut ausgeprägte Membran herstellen lassen, welche sowohl auf Füllmaterial 4 als auch auf Russ gut haftete ohne aber in das Füllmaterial einzudringen. Das heißt, die Strategie mit eingedickter Lösung zu arbeiten, erwies sich als erfolgreich.

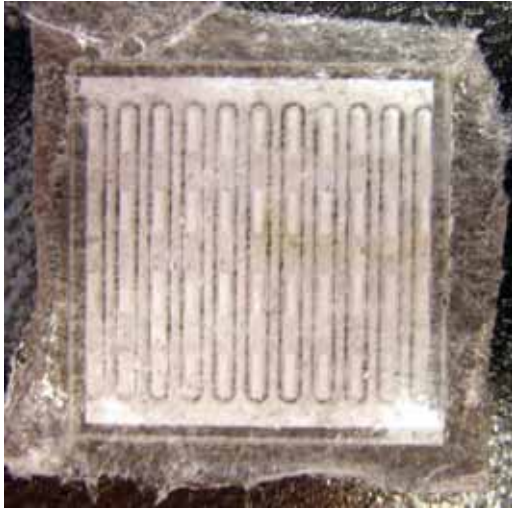
Nachdem jedoch nur mit dem Füllmaterial 4 erfolversprechende Versuche zur Aufbringung einer Membran durchgeführt werden konnten, wurden Überlegungen angestellt, wie man auch weitere Füllmaterialien einsetzen kann. Vor allem die schwere Lösbarkeit von Füllmaterial 4 ließ auf Probleme schließen, die in nachfolgenden Prozessschritten auftreten könnten.

Daher wurde versucht, eine dünne Glasfasermatte mit eingedickter Lösung zu tränken und in weiterer Folge direkt auf das Füllmaterial und auf die Zwischenschicht aus Russ aufzulegen.

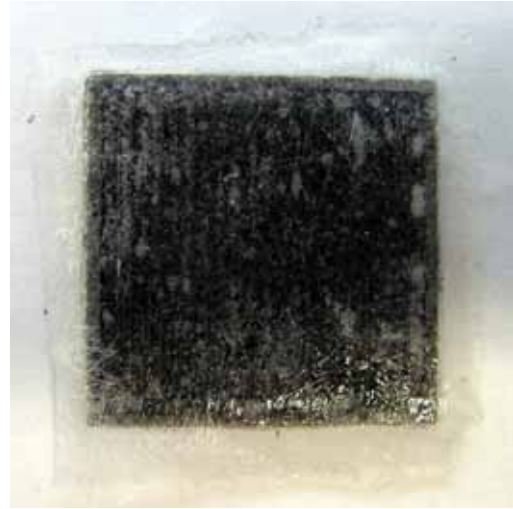
Die Ergebnisse waren durchwegs positiv, alle weiteren Füllmaterialien lassen sich durch die Verwendung einer dünnen Glasfasermatte auch weiterhin als Füllmaterial einsetzen.

Abbildung 80 zeigt einen Grundkörper mit dem Füllstoff 3 und der getränkten Glasfasermatte, welche über die Ränder des Grundkörpers übersteht.

Abbildung 81 zeigt ebenfalls einen Grundkörper mit dem Füllstoff 3, zusätzlich jedoch mit aufgebracht Zwischenschicht aus Russ. Erneut ist die getränkte Glasfasermatte als Überstand über den Grundkörper zu erkennen.



*Abbildung 80: Getränkte Glasfasermatte
direkt auf Füllmaterial*



*Abbildung 81: Getränkte Glasfasermatte auf
Zwischenschicht aus Russ*

Schließlich konnte im Zuge der Untersuchungen ein Weg gefunden werden, der sowohl die Verwendung mehrerer Füllmaterialien, als auch eine erfolgreiche Aufbringung einer sauber ausgeprägten Membran zulässt.

ad 4 Aufbringung des Katalysatormaterials

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit der eingedickten Lösung wurden nun unter Verwendung des tatsächlichen Katalysatormaterials, eines platinbeladenen Russes wiederholt und verifiziert.

Es zeigte sich erwartungsgemäß, dass die Ergebnisse erfolgreich waren. Lediglich die Aufbringung des Katalysatormaterials musste unter anderen Aspekten erfolgen, wie jene des reinen Russes.

ad 3. Ausbringung des Füllmaterials

Im Rahmen der Untersuchungen zur Ausbringung des Füllmaterials wurde versucht, die mit Füllmaterial aufgefüllten Kanäle wieder frei zu bekommen. Nachdem die meisten Füllmaterialien wasserlöslich sind, wurden im wesentlichen Lösungsversuche mit Wasser durchgeführt.

Besonders schwierig erwies sich diese Aufgabe aufgrund der Kleinheit der Kanäle, speziell jener für den Wasserstoff.

Dennoch konnten mit Ausnahme bei dem Füllmaterial 4, der nicht mit Wasser und auch nicht mit verdünnter Schwefelsäure gelöst werden konnte, bei den beiden anderen Füllmaterialien 1 und 3 positive Ergebnisse erzielt werden.

Abbildung 82 zeigt beispielhaft einen Grundkörper mit Membran und freien Kanälen, das heißt das Füllmaterial konnte erfolgreich ausgebracht werden.

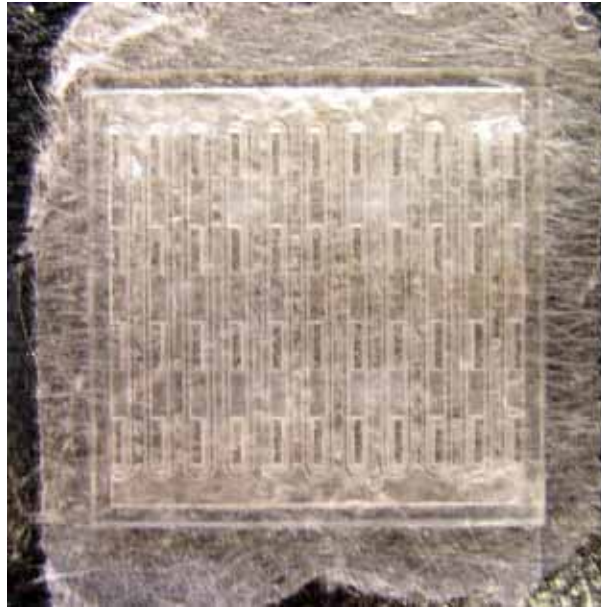


Abbildung 82: Grundkörper mit freien Kanälen

4.7 Projektergebnisse Arbeitspaket 4

Test der EasyCell

4.7.1 Fertigungstechnische Evaluierung

Die fertigungstechnische Evaluierung erfolgte anhand der folgenden Kriterien:

1. Mikroskopische Untersuchungen an den spritzgießtechnisch hergestellten Grundkörpern in Hinblick auf eine saubere Abformung der Dichtkanten
2. Prüfung der Dichtheit der hergestellten Prototypen der EasyCell

ad 1 Mikroskopische Untersuchungen:

Die mikroskopischen Untersuchungen an den Grundkörpern sollten Aufschluss darüber geben, inwieweit die spritzgießtechnisch hergestellten Grundkörper die Anforderung an Gasdichtheit erfüllen werden.

Ergebnisse dieser Untersuchungen sind beispielhaft in den Abbildungen 41 und 42 dargestellt.

ad 2 Prüfung der Gasdichtheit:

Die eigentliche fertigungstechnische Evaluierung erfolgte mit der Prüfung der Gasdichtheit der EasyCell. Die Prüfung der Dichtheit erfolgte, indem die EasyCell in Wasser eingelegt, die Einmündung der Wasserstoffkanäle eine Kanüle eingeführt und mit Silikonpaste abgedichtet wurde. Dabei musste gewährleistet sein, dass die Membran nicht durch die Kanülenspitze abgehoben wird. Die Kanüle wurde in weiterer Folge an eine Spritze mit aufgezogenem Kolben angesteckt. Anschließend wurde die gesamte EasyCell unter Wasser getaucht und der Kolben der Spritze händisch betätigt.

Abbildung 83 zeigt beispielhaft, dass Luftblasen nur bei der anderen Einmündung der Wasserstoffkanäle aufsteigen und die EasyCell somit dicht ist.



Abbildung 83: Dichtheitsprüfung der EasyCell unter Wasser

4.7.2 Ermittlung der Leistungsdaten der EasyCell

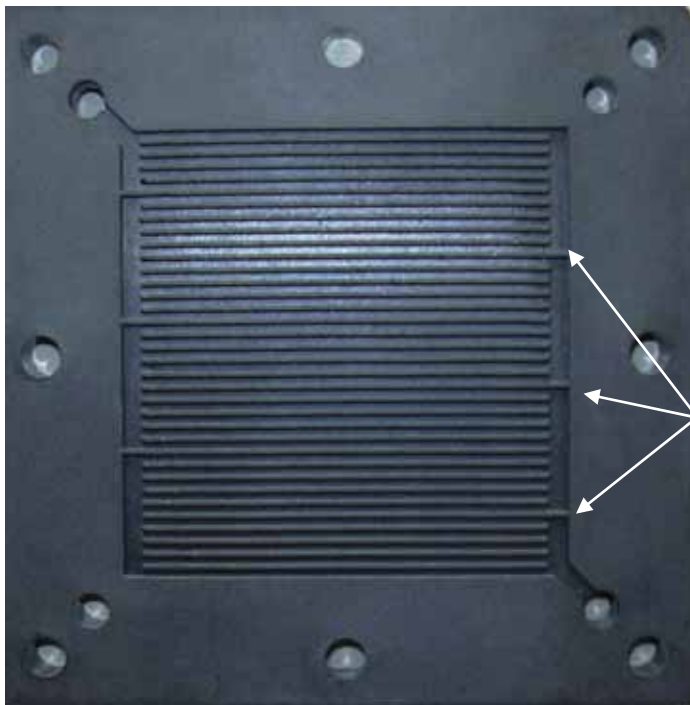
Die folgenden Untersuchungen zur Charakterisierung der EasyCell wurden durchgeführt:

1. Strömungsmessungen am Grundkörper der EasyCell und Vergleich zu einer konventionellen, spritzgegossenen Bipolarplatte
2. U/I Messungen bzw. Leistungsmessungen an den Prototypen der EasyCell

ad 1 Strömungsmessungen:

Die Strömungsmessungen wurden zunächst an einer konventionellen Bipolarplatte durchgeführt. Es wurde die Volumenstrom/Druckverlustcharakteristik des mäanderförmig mikrostrukturierten Flow-fields für eine bzw. zwei in Serie geschaltete Zellen erhoben.

Abbildung 84 zeigt eine der verwendeten Bipolarplatten, zu erkennen ist das mikrostrukturierte Flow-field.



obere Trennstege

Abbildung 84: Flow-field einer konventionellen Bipolarplatte einer PEMFC

Die Berechnung der Druck-Volumenstromcharakteristik erfolgte nach:

$$\Delta P_{Luft} = \zeta_E \frac{\rho_{Luft} (v_{ein})^2}{2} + \zeta_A \frac{\rho_{Luft} (v_{aus})^2}{2} + \zeta_K \frac{L_K}{d_{Hm}} \frac{\rho_{Luft} (v_m)^2}{2}$$

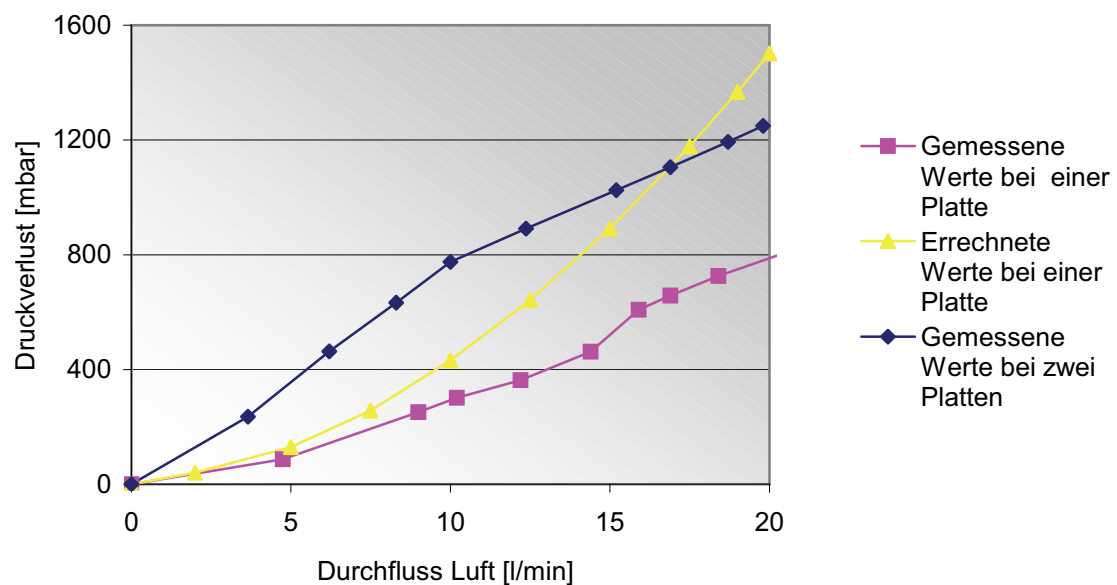


Abbildung 85: Strömungscharakteristik des Flow-fields aus Abbildung 91

Das Ergebnis zeigt einen der Theorie entsprechenden Kurvenverlauf bis zu einem Volumenstrom von ca. 10 l/min. Anschließend dürfte es zu einem sog. „gas shorting“, also einem Gaskurzschluß über die oberen Trennstege (siehe Pfeile Abbildung 84) kommen.

Die Charakteristik zeigt eine Eigenart der mikrostrukturierten mäanderförmigen Kanäle auf. Es ist nur mit sehr hohem Eingangsdruck ein ausreichend hoher Volumenstrom durch solch eine Zelle sicherzustellen.

Diese Messung bestätigt somit die Wahl bzw. die konstruktive Ausführung des anodenseitigen Flow-fields der EasyCell, bei der alle Kanäle parallel geschaltet wurden.

Zur Messung des Durchflusses und des Druckverlustes bei der EasyCell musste der Grundkörper und in weiterer Folge die laterale Brennstoffzelle mit Gasen durchspült werden. Dabei ist es unabdingbar, dass eine dichte Zu- und Ableitung des Wasserstoffstromes vorhanden ist. Klassische Anschlüsse über Schraub- und Steckverbindungen sind aufgrund des kleinen Maßstabes der Ein- und Auslassöffnungen nicht möglich.

Folglich wurde ein Grundkörper mit der Wasserstoffseite nach oben auf eine Stahlplatte geklebt. Anschließend wurden dünne Zu- und Ableitungskanäle aus Kunststoff mit Silikon eingeklebt. Der ganze Grundkörper wurde anschließend rundherum mit Silikonkautschuk abgedichtet und von oben mit einer Glasplatte verschlossen. Durch die Scheibe kann nun direkt Einsicht auf das Flow-field genommen werden.

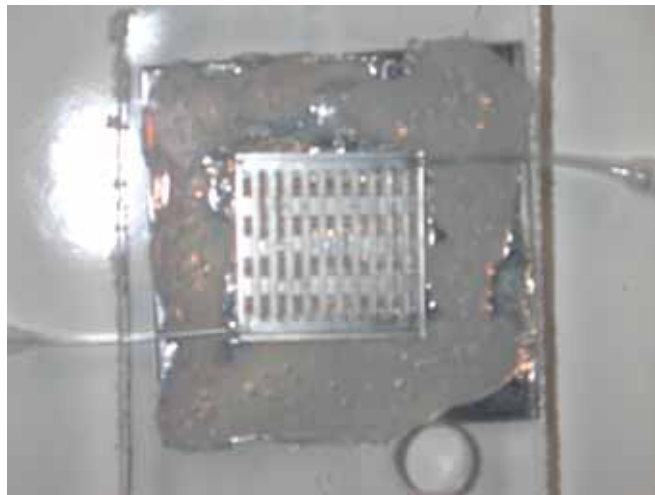


Abbildung 86: Grundkörper der EasyCell für Strömungsmessung präpariert

Es zeigte sich jedoch, dass die für eine einzelne EasyCell benötigten Volumenströme so gering sind, dass sie außerhalb des Messbereiches der vorhandenen Sensoren lagen. Jedoch wurde erkannt, dass der Volumenstrom von Wasserstoff nicht zu hoch sein darf, da sich die Membran durch den resultierenden hohen Druckabfall ablöst. Der Volumenstrom an H₂ wurde deshalb bei den nachfolgenden U/I Messungen an den lateralen Zellen eingestellt, indem eine

Zuleitungsnaedel in ein mit Wasser befülltes Becherglas gehalten und die entweichenden Gasblasen gezählt wurden. Der Volumenstrom wurde so eingestellt, dass ca. 2 - 5 Gasblasen pro Sekunde durchtraten.

ad 2 U/I Messungen bzw. Leistungsmessungen:

Die Einleitung des Wasserstoffes erfolgte über mit Gold besputterte Kanülen, die in die Wasserstoffkanäle eingeführt wurden. Zur Strom- und Spannungsmessung wurden anschließend ein Abgriff des Messgerätes mit der Kanüle und ein Abgriff mit der Unterseite der Basisplatte verbunden.

Spannung und Strom wurden bei den ersten Messungen nicht gleichzeitig gemessen. Das Messgerät wurde dafür immer zwischen Strom- und Spannungsmessung umgeschaltet. Es wurde auch keine Messdatenerfassung verwendet, sondern nur die höchsten erzielten Werte abgelesen und notiert.

Bei den ersten Messungen mit der EasyCell wurde keine katalysatorbeladene Rußschicht aufgetragen, sondern nur die Kanalwände mit Katalysator besetzt. Dies brachte die Sicherheit mit sich, dass zumindest ein Teil des Katalysators über die Stege mit der Membran in Verbindung sind. Jedoch nützte man damit nicht die gesamte Katalysatorfläche aus.

Die folgenden Abbildungen 87 und 88 zeigen den Messaufbau zur U/I Messung bzw. zur Leistungsmessung.



Abbildung 87: Messaufbau (Übersicht)

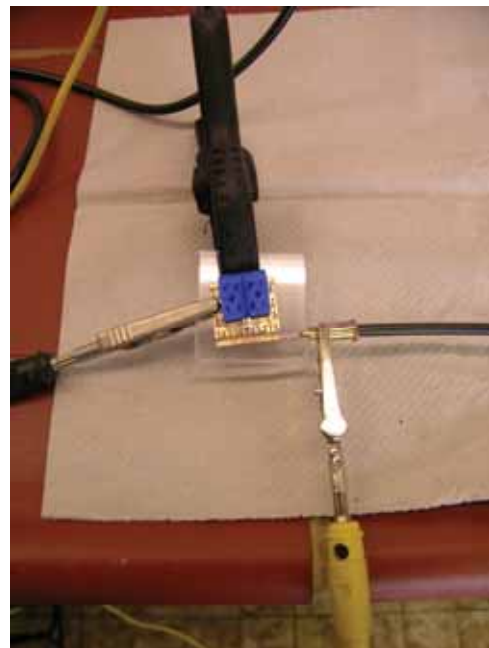


Abbildung 88: Messaufbau (Detail)

Um Unterschiede in der Aktivierung der Membran zu erkennen, wurde die Membran schrittweise mit Wasser und anschließend mit Schwefelsäure vorbehandelt. Die Abhängigkeit von Spannung und Strom von dem Sauerstoffstrom konnte mittels Belüftung durch einen Lüfter sichtbar gemacht werden.

Tabelle 21 fasst die Messergebnisse der U/I Messungen an der EasyCell ohne katalysatorbeladener Rußschicht zusammen.

Tabelle 21: Zusammenfassung der Messergebnisse ohne katalysatorbeladener Rußschicht

Versuch	Vorbehandlung	Belüftung	Spannung	Strom
1	nicht vorbehandelt	nein	6 mV	0,005 mA
2	nicht vorbehandelt	ja	80 mV	0,15 mA
3	H ₂ O (100°C, 1h)	nein	0,14 V	0,26 - 0,29 mA
4	H ₂ O (100°C, 1h)	ja	0,5 V	0,3 mA
5	H ₂ SO ₄ (100°C, 1h)	nein	0,4 - 0,5 V	2,3 mA
6	H ₂ SO ₄ (100°C, 1h)	ja	0,7 - 0,81 V	4,5 mA

Bei den weiteren Messungen wurde katalysatorbeladener Ruß auf den Füllstoff aufgetragen, um die Katalysatorfläche zu vergrößern. Eine optimale Haftung des Rußes auf der Membran konnte nicht realisiert werden, weil beim Auswaschen des Füllstoffes der Teil des Rußes, der nicht an der Membran haftete, ausgewaschen wurde. Die Abbildungen 89 und 90 zeigen Vorder- und Rückseite einer EasyCell wie sie zur U/I Messung herangezogen wurde.



Abbildung 89: Basisplatte mit Membran, Katalysator und Ableitungen (Vorderseite)



Abbildung 90: Basisplatte mit Membran, Katalysator und Ableitungen (Rückseite)

Abbildung 91 zeigt das Messprinzip zur Aufnahme des U/I Verlaufes an der EasyCell. Abbildung 92 zeigt den realisierten Messaufbau.

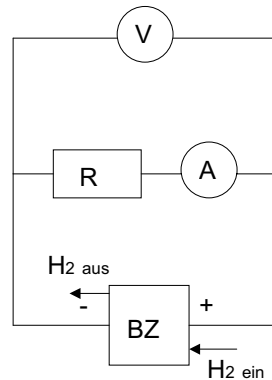


Abbildung 91: Messprinzip bei der Aufnahme des U/I Verlaufes an der EasyCell



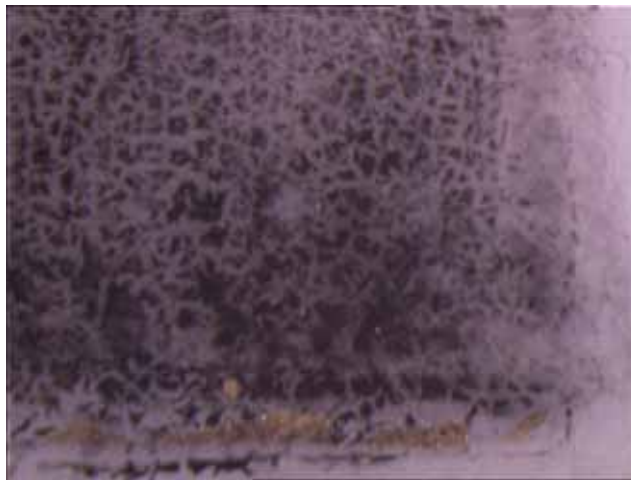
Abbildung 92: Realisierter Messaufbau zur Aufnahme des U/I Verlaufes

In weiterer Folge wurde der U/I Verlauf von Zellen 5 unterschiedlicher Prototypserien der EasyCell aufgezeichnet. Die Prototypserien unterscheiden sich in der Qualität der aufgetragenen Elektrodenschicht.

- Prototypserie 1: Elektrodenschicht nur an den Kanalwänden
- Prototypserie 2: nicht zusammenhängende Elektrodenschicht an der Membran
- Prototypserie 3: schwach zusammenhängende Elektrodenschicht an der Membran
- Prototypserie 4: zusammenhängende Elektrodenschicht an der Membran
- Prototypserie 5: zusammenhängende Elektrodenschicht mit höherer Leitfähigkeit

Die Ergebnisse der Messungen an Zellen der Prototypserie 1 zeigten, dass die EasyCell funktioniert, jedoch aufgrund der geringen Elektrodenfläche (nur ca. 1/100 der zur Verfügung stehenden Reaktionsfläche) war die entnehmbare Leistung sehr gering.

Die Messungen an Zellen der Prototypserie 2 zeigten Leistungsdaten mit rund $0,15 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2$, die ca. 4 Zehnerpotenzen unter denen herkömmlicher bipolarer Zellen liegt. Hauptverantwortlich dafür ist die geringe Ausnutzung der aktiven Fläche durch die aufgetretene „Vereinzelung“ der Katalysatorkörner wie Abbildung 93 zeigt.



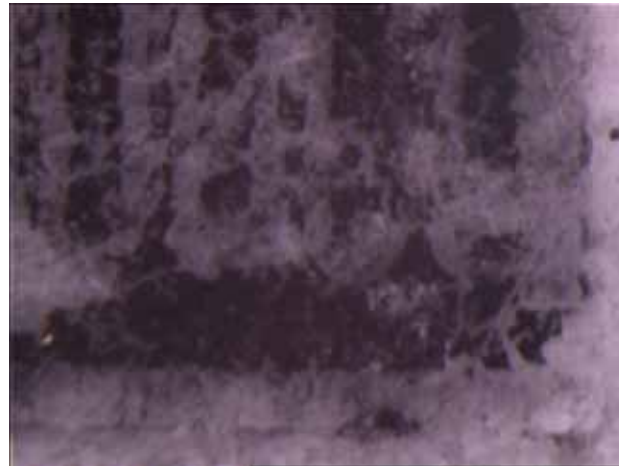
*Abbildung 93: Ausschnitt der abgezogenen Membran einer Zelle aus Prototypserie 2
(vereinzelte Elektrodenkörner)*

Die aufgenommenen U/I Kurven der Prototypserie 3 zeigen eine gute Einstellung der Ruheklemmenspannung mit 1,030 V (theor. 1,2 V). Es zeigte sich jedoch, dass die Einstellung der Ruheklemmenspannung vom eingestellten Wasserstoffvolumenstrom abhängig war.

Je stärker der Wasserstoffvolumenstrom eingestellt war desto geringer wurde die Zellspannung. Dies könnte durch Undichtigkeiten im System erklärt werden. Durch Undichtheiten gelangt Wasserstoff von der Anodenseite an die Kathodenseite und bildet dort ein Mischpotential aus. Die Zellen konnten in weiterer Folge nur äußerst wenig belastet werden.

Obwohl die Zellspannung bei der Prototypserie 3 deutlich höher war als bei Serie 2 liegt die entnommene Leistung nur bei ca. $0,4 \cdot 10^{-5} \text{ W/cm}^2$.

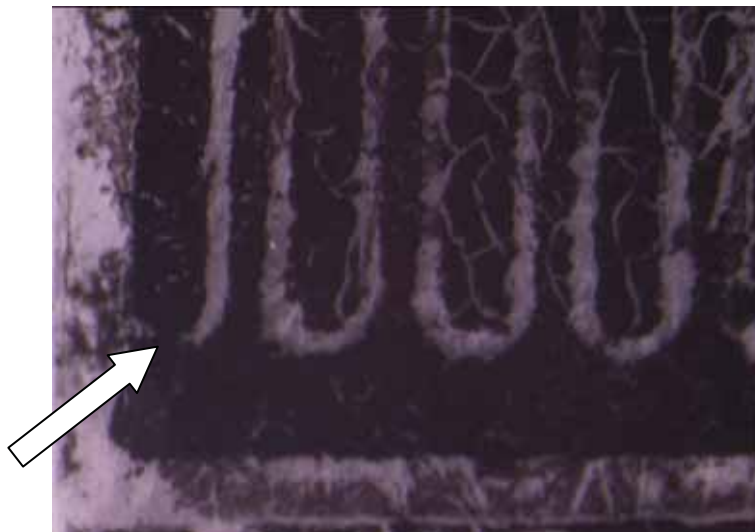
Abbildung 94 zeigt einen Ausschnitt einer abgezogenen Membran. Zu erkennen sind größere, zusammenhängende Elektrodenflächen. Jedoch durch die Risse noch keine zufriedenstellende Leitfähigkeit.



*Abbildung 94: Ausschnitt einer abgezogenen Membran von einer Zelle aus Prototypserie 3
(Elektrodeninseln)*

Bei den aufgenommenen U/I Kurven der Prototypserie 4 stellte sich zwar nicht die erwartete Ruheklemmenspannung wie in Serie 3 ein, doch konnte eine deutlich höhere Stromentnahme erfolgen. Die entnehmbare Leistung betrug etwa $1,3 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2$. Dies ist zwar immer noch drei Zehnerpotenzen unter dem Wert von bipolaren Zellen ($0,3 \text{ W/cm}^2$), aber schon deutlich besser als die vorangegangenen Prototypserien der EasyCell.

Abbildung 95 zeigt eine durchgängige, wenn auch mit Rissen übersäte Elektrodenfläche einer Zelle aus Prototypserie 4.



*Abbildung 95: Ausschnitt einer abgezogenen Membran von einer Zelle aus Prototypserie 4
(beinahe vollständig ausgebildete Elektroden, Kurzschlussgefahr bei Elektrodenüberbrückung [siehe Pfeil])*

Bei den aufgenommenen U/I Kurven der Prototypserie 5 zeigte sich eine deutliche Verbesserung der Leistungscharakteristik. Durch eine verbesserte innere Stromabführung konnte der Innenwiderstand erheblich gesenkt werden. Die entnehmbare Leistung betrug etwa $5,3 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^2$.

Abbildung 96 zeigt einen Vergleich der U/I Kennlinien von Zellen der Prototypserien 2, 4 und 5 mit dem Zielwert. Stand der Technik bei bipolaren Zellen ist eine Leistungsdichte von $0,3 \text{ W/cm}^2$ bezogen auf die MEA Fläche. Dies bedeutet bei 2 mm dicken Bipolarplatten eine theoretische volumetrische Leistungsdichte von $1,5 \text{ W/cm}^3$. Als Arbeitspunkt kann eine Zellspannung von 600 mV bei 0,5 A angenommen werden. Dieser Punkt ist als Zielwert in Abbildung 96 eingetragen. Es wurde in der Literatur jedoch schon von MEAs berichtet, die eine Leistung von $0,9 \text{ W/cm}^2$ erreicht haben. Dies würde bei Bipolarplatten mit einer Dicke von 2 bis 4 mm zu einer theoretischen volumetrischen Leistungsdichte von $2,25 - 4,5 \text{ W/cm}^3$ führen.

In Abbildung 96 ist zu sehen, dass die Serie 5 aufgrund ihrer besseren inneren Ableitung wesentlich höhere Ströme zulässt. Da die Kontaktfläche zwischen Membran und Katalysatormaterial teilweise noch inhomogen ist, macht sich auch eine schlechten Einstellung des Ruhezellpotentials bemerkbar.

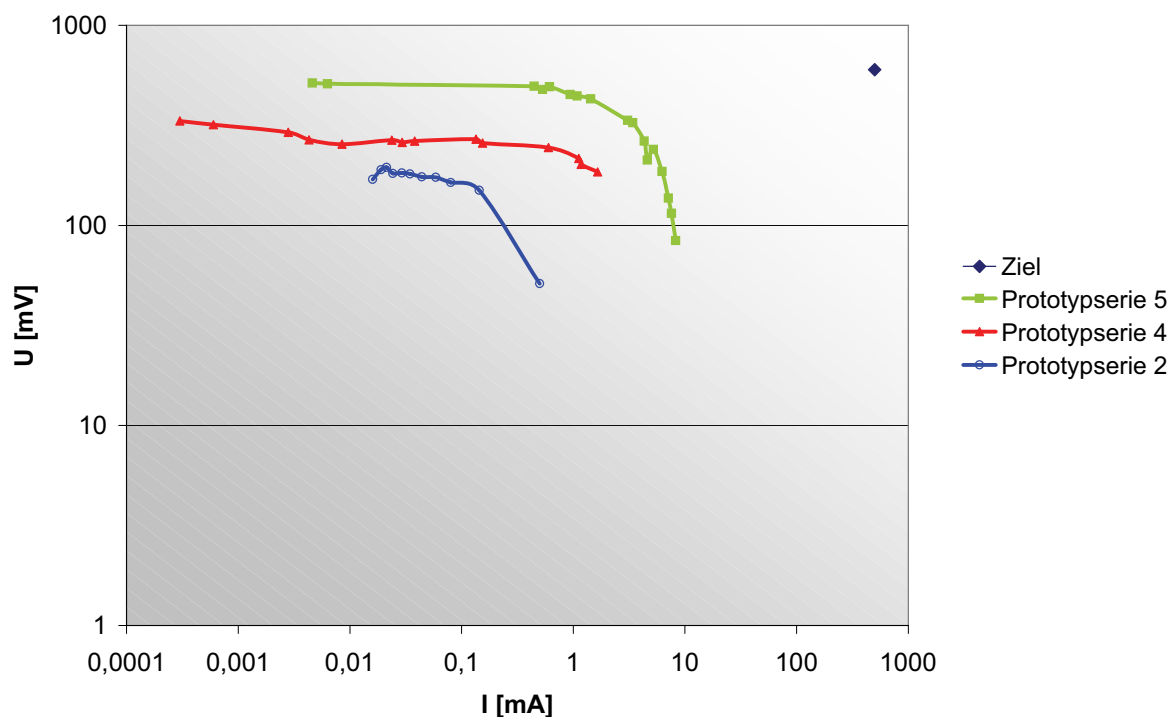


Abbildung 96: Vergleich der U/I Kennlinien von Zellen der Prototypserien 2, 4 und 5 mit dem Zielwert

Die Aufnahme der Kenndaten der ersten Prototypserien demonstrierte die prinzipielle Machbarkeit dieser Bauart. Sehr positiv zu beurteilen ist die Einstellung der Ruheklemmenspannung (1,09 V) an der Prototypserie 3 die im Bereich des thermodynamischen Wertes liegt (1,2 V).

Eine Verbesserung des Ausnutzungsgrades der aktiven Elektrodenoberfläche bei Prototypserie 4 führte zu einer Steigerung des entnehmbaren Stromes. Leider waren bei dieser Serie die Kanäle des Flow-fields durch Na_2SO_4 -Membran-Agglomerate verstopft, sodass große Teile der Zelle nicht für die elektrochemische Reaktion zur Verfügung standen.

Prototypserie 5 zeigte eine weitere deutliche Verbesserung der Leistungscharakteristik. Durch eine verbesserte innere Stromabführung konnte der Innenwiderstand erheblich gesenkt werden.

5 Detailangaben zu den Zielen der ‚Fabrik der Zukunft‘

5.1 Beitrag zum Gesamtziel der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ und den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung

Ziel der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ ist die Entwicklung und Demonstration von Konzepten und Technologien zur Produktion und Bereitstellung von Gütern und Dienstleistungen in einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wirtschaft.

Ziel des gegenständlichen Projektes ‚EasyCell‘ war die Designoptimierung von PEM-Brennstoffzellen zur Reduzierung der Nebenaggregate, zur Vereinfachung des Stoffmanagements und zur Erleichterung der Massenfertigung.

Das Projekt konnte zur Erreichung des Zieles der Programmlinie „Fabrik der Zukunft“ in folgender Hinsicht beitragen:

- PEM-Brennstoffzellen gelten als umweltfreundliche und schadstoffarme Energiewandler.
- Im Rahmen des Projektes wurde die weltweit erste laterale PEM-Brennstoffzelle gebaut.
 - Die einzelnen Verfahrensschritte zur Herstellung bzw. Produktion einer solchen lateralen PEM-Brennstoffzelle wurden im Rahmen des Projektes entwickelt.
 - Prototypserien der neuartigen lateralen PEM-Brennstoffzelle (EasyCell) wurden im Rahmen des Projektes hergestellt und das Funktionsprinzip der EasyCell wurde erfolgreich demonstriert.

Der Beitrag des Projektes zu den sieben Leitprinzipien nachhaltiger Technologieentwicklung kann wie folgt zusammengefasst werden:

Prinzip der Dienstleistungs-, Service- und Nutzerorientierung:

Generell wird durch den Einsatz von Brennstoffzellen wird autarke, netzungebundene Energie zur Verfügung gestellt. Vergleichbare, konkurrierende Systeme weisen höhere Emissionen (Abgase, Abwässer, Abfälle, Abwärme und Lärm) auf.

Prinzip der Nutzung neuerbarer Ressourcen:

Die für den Betrieb der ‚EasyCell‘ eingesetzten Brennstoffe Wasserstoff und Sauerstoff können aus erneuerbaren Quellen unter Schonung der Umwelt gewonnen werden.

Prinzip der Rezyklierungsfähigkeit:

Eine Rezyklierung des Katalysatormaterials einer EasyCell ist technisch möglich und ökonomisch insofern sinnvoll, als dass der eingesetzte Primärrohstoff sehr teuer ist (Edelmetalle).

Prinzip der Einpassung, Flexibilität, Adaptionsfähigkeit und Lernfähigkeit:

Die Grundlagen, auf denen die ‚EasyCell‘ basiert sind zeitinvariant.

Prinzip der Fehlertoleranz und Risikovorsorge:

Diesem Prinzip wird durch den einfachen Aufbau der ‚EasyCell‘ Rechnung getragen. Eine fehlerhafte ‚EasyCell‘ kann problemlos ausgetauscht werden. Bis zum Austausch unterbleibt die Energieversorgung des eigentlichen Gerätes und eine problemlose Wartung ist leicht möglich.

Prinzip der Sicherung von Arbeit, Einkommen und Lebensqualität:

Im Bereich der Brennstoffzellen ist absehbar, dass sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf fertigungstechnischer Ebene hochwertige Arbeitsplätze geschaffen werden können und andererseits die Lebensqualität durch den Einsatz erneuerbarer Energiequellen erhöht wird sowie eine Reduktion von Emissionen erzielt werden kann.

5.2 Einbeziehung der Zielgruppen in das Projekt und Berücksichtigung ihrer Bedürfnisse im Projekt

Zielgruppe 1 = Produzenten, welche die ‚EasyCell‘ herstellen und vertreiben wollen

Zielgruppe 2 = Produzenten, welche die ‚EasyCell‘ als Energiewandler für ihre Produkte heranziehen wollen

Zielgruppe 3 = Endverbraucher (Konsumenten)

Bedürfnisse der Zielgruppe 1 betreffen im wesentlichen die kostengünstige Massenfertigbarkeit sowie die Funktion der EasyCell. Diese Bedürfnisse wurden bei der Entwicklung des Fertigungskonzeptes bereits von Anfang an berücksichtigt. Das kostengünstige Massenfertigungsverfahren Spritzgießen nimmt dabei für die Herstellung der Grundkörper der EasyCell eine zentrale Rolle ein.

Die Bedürfnisse der Zielgruppe 2 beziehen sich auf die Verfügbarkeit von kostengünstigen und zuverlässigen PEM-Brennstoffzellen, welche von Zielgruppe 1 zur Verfügung gestellt werden. Beide Bedürfnisse, Kosten sowie Zuverlässigkeit, waren zentrale Schwerpunkte des Projektes.

Für Zielgruppe 3 ergibt sich der potentielle Nutzen, mittelfristig Produkte erwerben zu können, in welchen die ‚EasyCell‘ eingesetzt ist und somit Produkte mit Eigenschaften zur Verfügung stehen werden, welche heute noch nicht zur Verfügung stehen. Diese Eigenschaften betreffen auch die Punkte Umweltschutz bzw. -schonung und Störsicherheit durch den Einsatz der im Projekt entwickelten EasyCell und führen langfristig auch zu einer Kostenersparnis für die Zielgruppe.

5.3 Beschreibung der Potenziale für das Projekt

Der Markt für Brennstoffzellen wird zunehmend aufgebaut. So beginnen bereits namhafte Hersteller von Geräten zur Warmwasserbereitung für Heizungen mit Feldversuchen für einen Brennstoffzellenblock für die Warmwassergewinnung in Kombination mit elektrischer Energie als Ersatz für eine Therme. Weitere Anwendungsgebiete (dezentrale Energieversorgung von Messstationen, von Kühlanlagen etc.) werden ebenfalls diskutiert. Auch im Bereich der Automobilindustrie werden Brennstoffzellen als APU (auxiliary power unit) speziell für wasserstoffbetriebene Kraftfahrzeuge eingesetzt werden. Das Marktpotential für Brennstoffzellen kann demnach generell als sehr groß bezeichnet werden.

Das Marktpotential für die EasyCell selbst kann noch nicht abgeschätzt werden. Im Rahmen dieses Projektes im Bereich der wirtschaftsbezogenen Grundlagenforschung wurde die weltweit erste laterale PEM-Brennstoffzelle dieser Art gebaut. Bis zur Industriereife bzw. ersten Applikationen der EasyCell besteht auch noch Optimierungs- und Entwicklungsbedarf.

Das Umsetzungspotential ist aufgrund des großen Marktpotentiales ebenfalls sehr groß. Die Herstellung von Komponenten für unterschiedlich dimensionierte EasyCells bis hin zu ganzen Systemen ermöglicht es, die EasyCell in zahlreichen unterschiedlichen Produkten einzusetzen. Österreichische Industriebetriebe sind speziell aufgrund ihrer großen Innovationsstärke hervorragend gerüstet, mögliche Anwender der ‚EasyCell‘ zu sein bzw. diese möglicherweise in ihren Produkten zu integrieren.

6 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

6.1 Was sind die in dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse für das Projektteam? (fachliche Einschätzung)

Wichtigste Erkenntnis für das Projektteam ist, dass das im Projekt entwickelte Prinzip der EasyCell, einer lateral betriebenen PEM-Brennstoffzelle, sowie das im Projekt entwickelte Herstellungsverfahren für die EasyCell umsetzbar ist. So konnte im Rahmen des Projektes die weltweit erste laterale PEM-Brennstoffzelle dieser Art gebaut werden.

Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass die Leistungsdaten der im Rahmen des Projektes hergestellten Prototypserien der EasyCell sehr vielversprechend, vom Zielwert jedoch noch entfernt sind. Allerdings weist die EasyCell weitere Vorteile gegenüber Zellen konventioneller Bauart auf:

- Reduktion der Nebenaggregate und Vereinfachung des Stoffmanagements
Die bei Zellen konventioneller Bauart notwendige Befeuchtungseinheit für den Wasserstoffstrom kann bei der EasyCell komplett entfallen. Das bei der EasyCell entstehende Reaktionswasser kann nämlich direkt zur Befeuchtung des Wasserstoffstroms herangezogen werden. Daraus ergibt sich nicht nur eine Kosteneinsparung und eine Verringerung der Baugröße bei der EasyCell sondern auch eine starke Vereinfachung des Stoffmanagements.
- Erleichterung der Massenfertigung
Durch den Einsatz des kostengünstigen Massenfertigungsverfahrens Spritzgießen zur Herstellung des mikrostrukturierten Grundkörpers der EasyCell kann in weiterer Folge eine kostengünstige Massenfertigung der EasyCell bewerkstelligt werden. Entwicklungsbedarf in Richtung Massenfertigbarkeit besteht jedoch noch bei den einzelnen Prozessschritten zur Herstellung der EasyCell.

Darüber hinaus gelangte das Projektteam zur Erkenntnis, dass bis zu einem industriellen Einsatz der EasyCell noch weitere Entwicklungs- und Optimierungsschritte erforderlich sind, die vor allem die Verfahren zur Herstellung des Elektroden-Membran-Verbundes der EasyCell soweit verbessern müssen, dass es möglich wird Zelleistungen im Bereich von 1 W/cm^3 zu erhalten. Darüber hinaus müsste die volumetrische Leistungsdichte der lateralen Zelle durch konstruktive Maßnahmen im Bereich des Grundkörpers weiter gesteigert werden.

6.2 Wie arbeitet das Projektteam mit den erarbeiteten Ergebnissen weiter?

Das Projektteam beabsichtigt, gegen Jahresende 2006 ein weiteres wirtschaftsbezogenes Grundlagenforschungsprojekt im Rahmen der 4. Ausschreibung der Programmlinie ‚Fabrik der Zukunft‘ einzureichen. Dieses Projekt soll im wesentlichen die Optimierung der EasyCell beinhalten. Die folgende Abbildung 97 zeigt das geplante Szenario zur weiteren Entwicklung des Projektes zu einem Demonstrationsvorhaben.

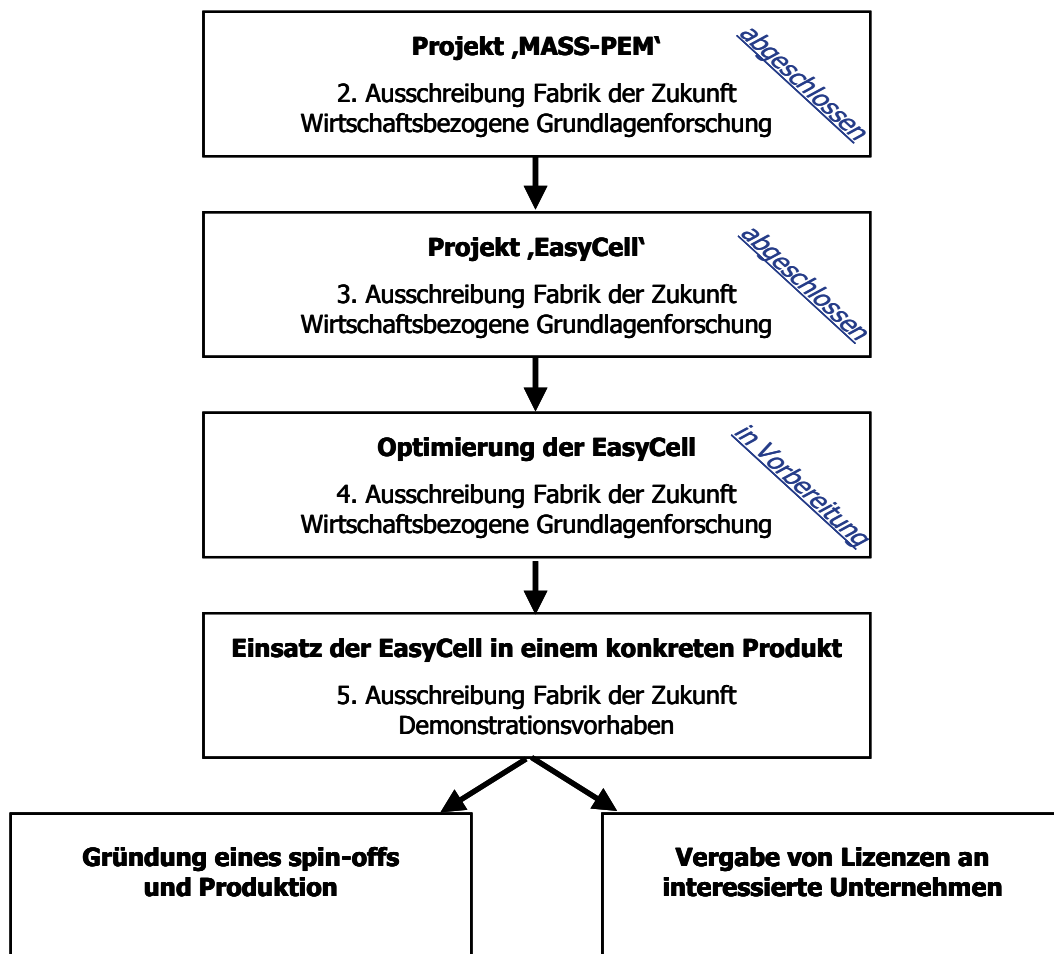


Abbildung 97: Szenario zur Entwicklung des Projektes zu einem Demonstrationsvorhaben

Nach der erfolgreichen Implementierung der ‚EasyCell‘ in ein konkretes Produkt (Demonstrationsvorhaben) beständen 2 Möglichkeiten der Fortführung, die sowohl als auch realisiert werden können. Dies wäre einerseits die Gründung eines spin-offs zur Produktion von EasyCells oder von Produkten mit EasyCells als Energieversorgung und andererseits die Vergabe von Lizenzen an interessierte Unternehmen, wie z.B. Gore, SGL Carbon, Ballard, Plug Power oder UTC-FC.

6.3 Für welche anderen Zielgruppen sind die Projektergebnisse relevant und interessant und wer kann damit wie weiterarbeiten?

Die erzielten Projektergebnisse sind im wesentlichen für Produzenten von Brennstoffzellenkomponenten und –systemen von Interesse. Für die geplante Fortsetzung des Projektes ist es daher erforderlich, diese Zielgruppe in das Projektteam aufzunehmen.

Darüber hinaus sind die Projektergebnisse für Forscher und Wissenschaftler aus dem Bereich der Elektrochemie und Brennstoffzellentechnik von Interesse. Um diese Zielgruppe anzusprechen ist vorgesehen, die Projektergebnisse in einem internationalen Fachjournal zu publizieren. Entsprechende Schutzrechte hat sich das Projektteam bereits gesichert.

7 Diskussion über die Nachhaltigkeit von Brennstoffzellen

7.1 Allgemeine Betrachtungen

Der Elektrochemiker und insbesondere der Brennstoffzellenforscher ist oft mit der weit verbreiteten Ansicht konfrontiert, dass die Brennstoffzelle und der Treibstoff eine unzertrennliche Einheit bilden würden. Diese gedankliche Fixierung ist historisch bedingt. Als einzig brauchbarer Treibstoff für Brennstoffzellen im Niedertemperaturbereich stellte sich schon im Jahr 1839 Wasserstoff heraus. Es wäre schwer übertrieben zu sagen, dass dies ein idealer Treibstoff sei, da er sich nur schwer mit brauchbarer Energiedichte speichern lässt. Trotzdem ist von den Elektrochemikern seit damals keine bessere anodische Reaktion für ein Brennstoffelement gefunden worden, als die anodische Oxidation von Wasserstoff an Platin bzw. platingruppenmetallehaltigen Elektrokatalysatoren.

Neben der elektrokatalytischen Aktivität muss dieser Katalysator chemisch beständig und elektrisch leitfähig sein, was die Suche nach Alternativen bis zum heutigen Zeitpunkt einigermaßen erschwert. Auch wenn schon Grove im Jahr 1840 alternative Brennstoffe wie Alkohole, Fette oder Wachse vorgeschlagen hat, so zeigte im Laufe der Jahre einzig Methanol noch eine gewisse elektrochemische Umsetzbarkeit. Leider ist die direkte Umsetzung des Methanols kinetisch gehemmt, und herkömmliche Katalysatoren werden überdies durch intermediär gebildete Zwischenprodukte vergiftet.

Diese Schwierigkeiten bei der Auffindung alternativer Elektrodenreaktionen ist aus Sicht der Autoren der wesentliche Grund, warum Wasserstoff als Treibstoff überhaupt ernsthaft diskutiert wird. Auch die Pläne einer Wasserstoffwirtschaft dürften nur solange aufrecht zu erhalten sein, solange keine vernünftige anodische Ersatzreaktion gefunden wird.

Das überdies die kathodische Sauerstoffreduktion die limitierende Reaktion schlechthin in der gesamten Brennstoffzellenthematik ist, kann nicht oft genug wiederholt werden und soll an dieser Stelle nur noch einmal betont werden.

Die Idee einer auf Wasserstoff basierten Energieversorgung kam schon in den Werken von Jules Verne im 19. Jahrhundert vor.

Der technisch konkrete Ursprung der Wasserstoffwirtschaft ist jedoch in den Überlegungen von Lawaczek im Jahre 1933 zu suchen. Er erkannte, dass in Skandinavien jede Menge Wasserkraft vorhanden war, die im hohen Norden, weitab jeglicher Industrie ungenutzt blieb. Sein Vorschlag mit dieser frei verfügbaren Energie über Elektrolyse Wasserstoff zu erzeugen und mittels Pipelines ins Deutsche Reich zu schicken fiel in Deutschland auf fruchtbaren Boden. Dies führte zu einem von Lawaczek gar nicht gewünschten hohen Aufstieg seiner Person der nach 1945 der jähe Absturz mit Vernichtung seiner Schriften und seiner selbst folgte.

Ein ähnliches Schicksal blieb dem Münchner Ingenieur Niederreither erspart, der schon 1933 eine Gaskette zur Herstellung von Wasserstoff und Erzeugung von elektrischer Energie in derselben patentierte. Trotzdem gilt noch heute der Engländer Francis Bacon, der seine Arbeit just genau in dem Jahr aufnahm (1937), als Niederreithers Patent veröffentlicht wurde, als der Vater der alkalischen Brennstoffzelle. Allerdings war schon zum damaligen Zeitpunkt der Treibstoff Wasserstoff gedanklich so eng mit der Brennstoffzelle verknüpft, dass es nicht verwundert, dass sich dies bis in die heutige Zeit gehalten hat.

Es ist jedoch immer zu bedenken, dass eine elektrochemische Umsetzung eines Brennstoffes an einer Elektrode nur den Spezialfall einer chemischen Reaktion darstellt, bei dem die Reaktionspartner räumlich getrennt voneinander reagieren. Wasserstoff ist also prinzipiell nur einer von vielen möglichen Brennstoffen.

Die Brennstoffzelle ist ein Energiewandler und keinesfalls eine primäre Energiequelle. Dieser Energiewandler besitzt jedoch den theoretisch höchsten erreichbaren Wirkungsgrad von allen bekannten Energiewandlern. Die Leistungsdichte dieses Energiewandlers und der Treibstoff mit dem dieser Energiewandler befüllt wird, sind allerdings völlig separat zu betrachten.

7.2 Treibstoff für Brennstoffzellen

Ein Treibstoff für Brennstoffzellen soll einfach zu speichern und einfach handhabbar sein, sowie einen ähnlichen Energieinhalt aufweisen wie die bekannten flüssigen Treibstoffe Benzin und Diesel. Wasserstoff erfüllt diese Voraussetzungen in keiner Weise, ist jedoch der einzige Treibstoff der sich zur Zeit einfach in Brennstoffzellen in elektrische Energie umwandeln lässt.

Der Tatsache, dass Wasserstoff ein denkbar ungeeigneter Treibstoff ist, wird oft das "Trickargument" entgegengesetzt, dass Wasserstoff doch die höchste gravimetrische Energiedichte von allen Stoffen aufweise. Die volumetrische Energiedichte wird dabei natürlich nie erwähnt. Dies ist einer der Gründe warum Wasserstoff zwar seit Jahrzehnten als idealer Energieträger genannt wird, jedoch praktisch bisher nicht zum Einsatz kam.

Die Verflüssigung von Wasserstoff bzw. die Speicherung unter hohem Druck (700 bar) sind zwei Wege die zur Zeit für den Einsatz im Automobil angedacht werden.

Trotzdem, auch wenn diese Art der Speicherung nicht die technisch eleganteste Lösung ist, und auch volkswirtschaftlich betrachtet viel Energie vernichtet wird, so ist das Argument, dass so der Verkehr in den Ballungsräumen emissionsfrei werden könnte, höchst interessant. Dieses Argument ist letztendlich so überzeugend das man es technisch und politisch rechtfertigen kann, Wasserstoff als Treibstoff verflüssigt oder unter Hochdruck einzusetzen.

Das zweite überzeugende Argument das für alternative Treibstoffe und alternative Energiewandler spricht ist die fast gänzliche Abhängigkeit der Industriestaaten von Energieimporten. Aus dieser Sicht darf man die Kosten des Wasserstoffs oder eines anderen alternativen Treibstoffes nicht mit den heutigen Benzinpreisen vergleichen!

Natürlich ist es am billigsten in einem Dritte-Welt-Land das Erdöl aus dem Boden sprudeln zu lassen, diese Regionen dabei ökologisch wie ökonomisch zu zerstören, womöglich die einheimische Bevölkerung zu unterdrücken bzw. korrupte Regimes zu unterstützen, die das erledigen. Anschließend wird das Öl auf maroden Tankern um die Welt geschifft, um so auch Küstenregionen der Industriestaaten durch immer häufiger auftretende Tankerunglücke zu verseuchen.

Kosten für Folgeschäden an der Gesundheit (siehe auch die aktuelle Diskussion über die Feinstaubbelastung in den Ballungszentren) bis hin zu Todesfälle durch die giftigen Abgase der Verbrennungskraftmotoren werden selbstverständlich nicht in den Treibstoffpreis eingerechnet.

Bei den Folgekosten durch Überschwemmungen und anderen Klimakatastrophen wird sehr gerne von „natürlichen Schwankungen“ gesprochen. Selbst ein anteiliger Zusammenhang mit den Abgasen aus Verbrennungskraftmaschinen wird abgestritten. Auch diese Folgekosten werden nicht in den Treibstoffpreis eingerechnet.

Natürlich ist es einfacher Kriege um Ölreserven und vielversprechende Regionen zu führen, als über alternative Energieversorgung nachzudenken oder womöglich Energiesparen in Erwägung zu ziehen!

Und natürlich ist es taktisch klug, wenn man Geld selber drucken kann und als Wertsicherung Erdöl und Erdölreserven in der Hand hat. Allerdings sind die Erdölvorräte endlich. Die großen Konzerne fangen an zu "diversifizieren", fangen an eine andere "Cash Cow" zu suchen.

Aber auch die Uranvorräte zur Nutzung der Atomenergie sind endlich. Und auch hier werden von der Atomlobby Folgekosten beinhart geleugnet. Der Supergau von Tschernobyl hat atomfreundlichen Medienberichten zufolge ja „lediglich“ 4.000 Tote nach sich gezogen und „nur“ die halbe Ukraine verseucht.

Eine dezentrale Energieversorgung, bei der die großen Energieversorger die Aufgabe des Verteilungsmanagements der Energie übernehmen, wäre wesentlich krisensicherer, stabiler und energiesparender.

Wie auch immer, Europa und vor allem Österreich sollte danach trachten, eine autarke und umweltschonende Energieversorgung sicherzustellen. Deshalb sollte Energiesparen, das Entwickeln alternativer und umweltfreundlicher Treibstoffe und alternativer Umwandlungstechnologien oberste Priorität haben.

Interessanterweise ergibt sich für die Technologie der Brennstoffzelle als sauberer, leiser, kalter und energieeffizienter Wandler eine bemerkenswerte Koalition aus:

- Militär (V-Boot, transportable Energieversorgung für Soldaten)
- Atomenergielobby (Elektrolyse - Wasserstoffherstellung)
- Politik (emissionsfreier Verkehr)
- Umweltschützer

Es bleibt jedoch zu befürchten, dass auch die Brennstoffzelle zuerst auf den Schlachtfeldern und dann erst im Eigenheim eingesetzt wird.

Das Schicksal der Brennstoffzelle muss aber keineswegs zwangsläufig an das des Wasserstoffes als Treibstoff gekettet sein! Ganz im Gegenteil, aufgrund ihres hohen Wirkungsgrades und ihres relativ simplen Aufbaus werden sich Brennstoffzellen als Energiewandler früher oder später durchsetzen, auch wenn der entscheidende Durchbruch an der Kathode nie kommt.

Die Treibstoffe werden aus einfach zu speichernden und handzuhabenden chemischen Verbindungen bestehen. Diese werden direkt oder nach einem Reformierungsschritt, also nach der Abspaltung von reaktivem H₂, am Ort des Endverbrauches hergestellt und genutzt.

7.3 Die Leistungsdichte von Brennstoffzellen

Der Brennstoffzellentechnologie wird oft unterstellt, dass der Verbrennungskraftmotor noch soviel Potenzial besitze und die Leistungsdichten eines Verbrennungskraftmotors wohl nie erreicht werden würden. Auch hier findet teilweise ein unsauberer Vergleich statt. Oft wird bei der volumetrischen Leistungsdichte eines Verbrennungskraftmotors die Leistung auf das Volumen des Hubraumes bezogen. So kommen Leistungsdichten von 20 – 40 kW/l zustande. Das Restvolumen des Motorblocks, der Auspuff, das Getriebe, das Abgasnachbehandlungssystem, der Kühler etc. werden einfach nicht mitgerechnet!

Im Gegensatz dazu kommen Brennstoffzellen nach nur ca. 10 jähriger intensiver Entwicklung bei den Automobilfirmen auf echte 2,5 – 4 kW/l (85 kW Stacks).

Man könnte durchaus sagen, dass die mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzellen die Verbrennungskraftmotoren hinsichtlich Leistungsdichte bereits eingeholt haben. Der große Unterschied zu den Verbrennungskraftmaschinen besteht jedoch darin, dass das Potential bei weitem noch nicht ausgeschöpft ist! So meinen die Autoren, dass Leistungsdichten von 100 kW/l theoretisch durchaus möglich sind! Allerdings spielen dann Nebeneffekte wie Wärmeabtransport und Reaktionswasserabtransport eine größere Rolle als bei den heutigen Systemen.

Ein immer wiederkehrendes Statement lautet: "Die spezifischen Kosten pro kW elektrischer Energie sind bei Brennstoffzellen zu hoch". Hier werden jedoch die Kosten von Prototypentwicklungen im Brennstoffzellenbereich mit den Kosten von Teilen verglichen, die sich im ausgereiztesten Zustand der Kostenoptimierung befinden – auf den Motorblock eines Autos, wo jede Komponente, jeder Fertigungs- und Montageschritt auf Bruchteile eines Cents kalkuliert wird.

7.4 Werkstoffe und Fertigungsverfahren

Die unterschiedlichen Komponenten einer Brennstoffzelle werden mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt und schließlich zu einer Brennstoffzelle bzw. mehrere solcher Brennstoffzellen zu einem sogenannten ‚Stack‘ assembliert.

Die derzeit für die Massenproduktion von Komponenten für PEM Brennstoffzellen eingesetzten Werkstoffe und Fertigungsverfahren sind in der folgenden Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Werkstoffe und Fertigungsverfahren der wichtigsten Komponenten einer PEM Brennstoffzelle

Komponente	Werkstoffe	Fertigungsverfahren
Bipolarplatte	Titan, Edelstahl, Gold, Graphit, Polymere (z.B. PVDF, Phenolharz Vinylester, Polypropylen)	Blechumformen, Beschichten, Fräsen, Druckgießen, Spritzgießen
Membran	Copolymer aus Tetrafluorethen und perfluoriertes Fluorsulfonyl-Vinylether (Nafion); Phosphorsäure-dotiertes Polybenzimidazol (PBI), sulfoniertes Polyetheretherketon (SPEEK)	Sprühen, Ziehen, Gießen, Pressen
Katalysator	Platingruppemetalle	Siebdruck, Sprühen, Pressen
Gasdiffusionslage (GDL)	Kohlenstoffgewebe, -papiere	Pressen

Die Massenproduktionsverfahren dieser Komponenten befinden sich größtenteils in der Entwicklung. In der Bipolarplattenfertigung gibt es grundsätzlich zwei erfolgversprechende Wege. Der eine ist die Herstellung metallischer Platten, der andere die Herstellung von Platten aus hochleitfähigen Kunststoff-Graphit-Compounds.

Die metallischen Platten sind den graphitbasierten Platten in vielen Punkten überlegen. So sind dünnere Platten mit höherer elektrischer Leitfähigkeit herstellbar. Die Platten sind überdies gasdicht und mechanisch äußerst stabil. Der einzige Nachteil ist ihre chemische Unbeständigkeit. Sie müssen beschichtet werden (z.B. mit Gold), was sie wiederum teurer werden lässt.

Graphitbasierte Bipolarplatten sind chemisch äußerst stabil, jedoch besitzen sie eine schlechtere Leitfähigkeit, höhere Wandstärken und geringere Gasdichtheit.

Fertigungstechnisch gesehen werden metallische Bipolarplatten gefräst, was bei großen Stückzahlen gegenüber spritzgegossenen Platten aus hochgefüllten Kunststoffcompounds wesentlich teurer ist. Andererseits ist bei den hochgefüllten Kunststoffcompounds noch Entwicklungsaufwand notwendig, um die geforderten Leitfähigkeiten zu erreichen. Diesbezügliche Anstrengungen werden derzeit unternommen (z.B. am IKV Aachen).

Generell müssen alle Komponenten einer Brennstoffzelle mit massenfertigungstauglichen Verfahren herstellbar sein, damit die Kosten sich in einem vernünftigen Rahmen bewegen.

Weiters bedeutet ein Konzept, das eine reduzierte Anzahl von Einzelkomponenten mit sich bringt auch Kostenvorteile in der Fertigung (z.B. laterale Brennstoffzelle EasyCell).

Derzeit kommen aufgrund der geringen gefertigten Stückzahlen auch noch kaum Massenfertigungsverfahren zum Einsatz, da bei den geringen Stückzahlen andere Verfahren (z.B. Fräsen) günstiger sind. Hier wird der Einsatz von Massenfertigungsverfahren schrittweise mit den am Markt verkauften Stückzahlen mitentwickeln. Dies geht aber dann schnell, wenn die Konstruktion der Brennstoffzellen dies bereits zulässt, ansonsten wären größere konstruktive Änderungen notwendig, die eine Umstellung der Fertigungsverfahren zusätzlich behindern.

7.5 Ausblick

Der Einstieg der Brennstoffzelle in die Automobilindustrie bedeutet das Ende der langen Ära der Verbrennungskraftmotoren. Genauso wie der Otto- und Dieselmotor die Dampfmaschine abgelöst hat, so wird die Brennstoffzelle diese Motoren ablösen.

Dies ist jedoch mit umfassenden sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen verbunden. Wenn man bedenkt wie viel menschliche Arbeit in der Herstellung eines Motorblockes steckt und wie wenig im Vergleich dazu in einer Brennstoffzelle. Wenn man die Preise der Ausgangsmaterialien betrachtet und deren Herstellungskette. Brennstoffzellen sind einfacher, besser und billiger. Natürlich werden die Rohstoffpreise der Ausgangsmaterialien für Brennstoffzellen so lange wie möglich künstlich aufrechterhalten werden, doch diese Zeit kann kürzer sein als von Vielen angenommen. Wenn es soweit ist, werden viele alte Industrien und Zulieferfirmen geschlossen werden.

Die Hoffnung der Autoren ist, dass zu diesem Zeitpunkt ausreichend Know-how und internationale Schutzrechte bei österreichischen Betrieben liegen, um zumindest aus volkswirtschaftlicher Sicht Arbeitsplätze und Deviseneinnahmen zu lukrieren.

8 Ausblick und Empfehlungen

Die Entwicklung von lateralen Brennstoffzellen steht erst am Beginn. In diesem Projekt wurde die weltweit erste laterale PEM-Brennstoffzelle dieser Art gebaut. Die einzelnen Verfahrensschritte zur Herstellung einer solchen lateralen PEM-Brennstoffzelle wurden im Rahmen des Projektes soweit entwickelt, dass es möglich war, Prototypen zu bauen und zu testen.

In weiteren Schritten nach dem Projekt sollten die Verfahren zur Herstellung des Elektroden-Membran-Verbundes der EasyCell soweit verbessert werden, dass es möglich wird Zelleistungen im Bereich von 1 W/cm^3 zu erhalten.

Sollte dies gelingen, kann in weiterer Folge das Design des Grundkörpers der EasyCell optimiert werden um so die volumetrische Leistungsdichte der lateralen Zelle weiter zu steigern. Eine Minimierung der Grundplatte auf 0,5 mm Dicke sollte volumetrische Leistungsdichten von $2,2 \text{ W/cm}^3$ ermöglichen.

Durch eine Steigerung der Dicke der aufgetragenen Membran einer EasyCell wird der Querschnitt der für die Protonenleitung zur Verfügung steht erhöht. Somit könnte eine weitere Steigerung der Leistungsdichte möglich sein. Ob eine Steigerung auf bzw. über $4,5 \text{ W/cm}^3$ möglich sein wird kann zum heutigen Zeitpunkt nicht beantwortet werden.

Eine endgültige Antwort auf die Überlegenheit oder Unterlegenheit der lateralen Zelle im Vergleich zu bipolaren Zellen ist aus heutiger Sicht schwer zu geben. Vergleichbar wären hier nur tatsächlich erzielte Leistungsdichten lateraler Zellaggregate und bipolarer Zellstapel gleicher Nennleistung. Zu erwarten wäre hier eine Überlegenheit der lateralen Zelle gegenüber bipolaren Zellen im kleinsten Leistungsbereich von $1 \mu\text{W} - 1 \text{ W}$, vor allem aufgrund der einfacheren Kühlbarkeit und wegen des einfacheren Stoffmanagements.

Bei geschicktem Aufbau der lateralen Zellaggregate ist es jedoch nicht auszuschließen, dass die laterale Bauweise auch bei hohen Leistungsbereichen im kW-Bereich mit der bipolaren Bauweise konkurrieren könnte.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

- [1] C.A. Linkous, H.R. Anderson, R.W. Kopitzke, G.L. Nelson, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 23, No. 7, pp. 525-529, 1998
- [2] Menges, Mohren, „*Spritzgieß-Werkzeuge – Anleitungen zum bau von Spritzgieß-Werkzeugen*“, 3. Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien 1991
- [3] Domininghaus, „*Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*“, 5. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 1998
- [4] R.O'Hayre et al. *Journal of the Electrochemical Society*, 150 (4) A430-A438, 2003
- [5] "Development of portable fuel cell arrays with printed-circuit technology", Ryan O'Hayre et al. *Journal of Power Sources*, 124 459-472, 2003
- [6] "Design and fabrication of a micro fuel cell array with "flip flop" interconnection", S.J.Lee et al. *Journal of Power Sources*, 112, 410-418, 2002
- [7] "Tangential and normal conductivities of Nafion membranes used in polymer electrolyte fuel cells", R.F.Silva et al. *Journal of Power Sources*, 134, 18-26, 2004

Relevante Patente

- Lamarre et.al., US 2004/0058226 A1, **(2004)**
- Xing et.al., US 2003/0224926A1, **(2003)**
- Maynard et.al, US 6,541,149 B1 **(2003)**
- D'Arrigo et.al., US 2003/0003347A1 **(2003)**
- Bronoel, US 2003/0003346 A1 **(2003)**
- Ruhl et.al., US 2002/0132156 A1 **(2002)**
- Ruhl et.al., WO 01/41239 A1 **(2001)**
- Hahn et.al., DE 102 24452 C1 **(2003)**
- Jankowski et.al., US 6,638,654 B2 **(2003)**
- Hirota, US 5,053,291 **(1991)**
- Ledjeff et.al., DE 44 43 939 C1 **(1994)**
- R.Hahn et.al., J.of Power Sources 131, 73-78, **(2004)**
- Laurent Mex et.al, Fuel Cell Bulletin 39, 9-12, **(2001)**
- Keyur Shah et.al., J.of Power Sources 123, 172-181 **(2003)**

9.2 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Aufbau einer PEM-Brennstoffzelle*
- Abbildung 2: Konventionelle Struktur eines PEM-Brennstoffzellenstacks*
- Abbildung 3: Struktur eines PEM-Brennstoffzellenelements der ‚EasyCell‘*
- Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Charakterisierung der Wasserausbreitung*
- Abbildung 5: Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Diffusionslänge in die Membran*
- Abbildung 6: Ausbreitung von Wasser auf Nafion*
- Abbildung 7a: Prinzipskizze der Versuchszelle*
- Abbildung 7b: Realisierte Versuchszelle*
- Abbildung 8: Grundkörper der EasyCell im Aufriss sowie Schnittansicht durch den Grundkörper*
- Abbildung 9: Rückansicht des Grundkörpers der EasyCell*
- Abbildung 10: Schematische Schnittansicht der EasyCell*
- Abbildung 11: Grundkörper der EasyCell*
- Abbildung 12: PS 2*
- Abbildung 13: PS 1*
- Abbildung 14: PSU*
- Abbildung 15: PCT*
- Abbildung 16: Co-Polyester*
- Abbildung 17: PPSU*
- Abbildung 18: PSU*
- Abbildung 19: LCP*
- Abbildung 20: PPS*
- Abbildung 21: PEEK*
- Abbildung 22: PES*
- Abbildung 23: PETG*
- Abbildung 24: Konstruktionszeichnung der auswerferseitigen Formplatte des Spritzgießwerkzeuges*
- Abbildung 25: Formfüllsimulation am Beispiel PPSU*
- Abbildung 26: Simulation der Fließweglängen am Beispiel PPSU*
- Abbildung 27: Simulation der Bindenähte am Beispiel PPSU*
- Abbildung 28: Auswerferseitige Formplatte des Spritzgießwerkzeuges*
- Abbildung 29: Auswerferseite des Spritzgießwerkzeuges mit eingebauter Formplatte*
- Abbildung 30: Kavität der auswerferseitigen Formplatte*
- Abbildung 31: Detail aus der Kavität der auswerferseitigen Formplatte*
- Abbildung 32: Battenfeld Mikrospritzgießmaschine vom Typ Microsystem 50*
- Abbildung 33: Auswerferseitige Werkzeughälfte in der Spritzgießmaschine*
- Abbildung 34: Spritzgießwerkzeug in der Spritzgießmaschine*
- Abbildung 35: PCT*

- Abbildung 36: PETG*
- Abbildung 37: PES*
- Abbildung 38: PPSU*
- Abbildung 39: Aluminiumoxid (Keramik)*
- Abbildung 40: Grünteil (links) und Sinterteil (rechts) aus Aluminiumoxid*
- Abbildung 41: Unvollständig abgeformte Mikrostege (beispielhaft)*
- Abbildung 42: Vollständig abgeformte Mikrostege (beispielhaft)*
- Abbildung 43: Gefräste Versuchsplatten mit Füllmaterial in den Fräsbahnen*
- Abbildung 44: Versuchsplatte mit aufgebrachter Membranlösung nach dreistündiger Trocknungszeit*
- Abbildung 45: Rekristallisationserscheinung des Füllmaterials bei Verwendung von wasserhaltiger Membranlösung*
- Abbildung 46: 200-fache Vergrößerung eines Kanalsteges mit Nafion-Membran aus rein alkoholischer Lösung*
- Abbildung 47: Schnitt durch den konstruierten Versuchsstand zur variothermen Prozessführung*
- Abbildung 48: Versuchsaufbau des variothermen Versuchsstandes*
- Abbildung 49: Elektronische Geräte für den Betrieb des Versuchsstandes*
- Abbildung 50: Elektronische Hilfskomponenten für den Betrieb des Versuchsstandes*
- Abbildung 51: Verwendete Spulen mit großen Schalenkernen*
- Abbildung 52: Verwendete Spulen mit kleinen Schalenkernen*
- Abbildung 53: 8-fach Rack zur Messdatenerfassung*
- Abbildung 54: Schaltbild DASYlab*
- Abbildung 55: Beispielhaftes Ergebnis der Messungen mit 3 Aufheiz- und Abkühlzyklen*
- Abbildung 56: Mit Gold besputterte Vorderseite eines Grundkörpers (beispielhaft)*
- Abbildung 57: Mit Gold besputterte Rückseite eines Grundkörpers (beispielhaft)*
- Abbildung 58: Gold auf den Kanalstegen eines Grundkörpers (beispielhaft)*
- Abbildung 59: Gold am Kanalgrund eines Grundkörpers (beispielhaft)*
- Abbildung 60: Füllmaterial 1*
- Abbildung 61: Füllmaterial 2*
- Abbildung 62: Füllmaterial 3*
- Abbildung 63: Füllmaterial 4*
- Abbildung 64: Füllmaterial 5*
- Abbildung 65: Füllmaterial 6*
- Abbildung 66: Benetzt mit 0,1ml 10%iger Lösung*
- Abbildung 67: 10%ige Lösung trocken*
- Abbildung 68: Benetzt mit 0,1ml 20%iger Lösung*
- Abbildung 69: 20%ige Lösung trocken*
- Abbildung 70: Füllstoff 1 mit Kristallisation an der Oberfläche*
- Abbildung 71: Füllstoff 2*
- Abbildung 72: Füllstoff 3*

- Abbildung 73: Füllmaterial 6 mit Membranlösung benetzt
- Abbildung 74: Füllmaterial 6 mit Membranlösung trocken
- Abbildung 75: Füllstoff 4
- Abbildung 76: Vollständig ausgeprägte Membran auf der Zwischenschicht aus Russ
- Abbildung 77: Schnitt durch die Probe
- Abbildung 78: Draufsicht auf die Probe (kein Russ auf den Stegen)
- Abbildung 79: Membranen aus eingedickter Lösung ohne (links) und mit (rechts) Zwischenschicht aus Russ
- Abbildung 80: Getränkte Glasfasermatte direkt auf Füllmaterial
- Abbildung 81: Getränkte Glasfasermatte auf Zwischenschicht aus Russ
- Abbildung 82: Grundkörper mit freien Kanälen
- Abbildung 83: Dichtheitsprüfung der EasyCell unter Wasser
- Abbildung 84: Flow-field einer konventionellen Bipolarplatte einer PEMFC
- Abbildung 85: Strömungscharakteristik des Flow-fields aus Abbildung 91
- Abbildung 86: Grundkörper der EasyCell für Strömungsmessung präpariert
- Abbildung 87: Messaufbau (Übersicht)
- Abbildung 88: Messaufbau (Detail)
- Abbildung 89: Basisplatte mit Membran, Katalysator und Ableitungen (Vorderseite)
- Abbildung 90: Basisplatte mit Membran, Katalysator und Ableitungen (Rückseite)
- Abbildung 91: Messprinzip bei der Aufnahme des U/I Verlaufs an der EasyCell
- Abbildung 92: Realisierter Messaufbau zur Aufnahme des U/I Verlaufes
- Abbildung 93: Ausschnitt der abgezogenen Membran einer Zelle aus Prototypserie 2 (vereinzelte Elektrodenkörner)
- Abbildung 94: Ausschnitt einer abgezogenen Membran von einer Zelle aus Prototypserie 3 (Elektrodeninseln)
- Abbildung 95: Ausschnitt einer abgezogenen Membran von einer Zelle aus Prototypserie 4 (beinahe vollständig ausgebildete Elektroden, Kurzschlussgefahr bei Elektrodenüberbrückung)
- Abbildung 96: Vergleich der U/I Kennlinien von Zellen der Prototypserien 2, 4 und 5 mit dem Zielwert
- Abbildung 97: Szenario zur Entwicklung des Projektes zu einem Demonstrationsvorhaben
- Tabellenverzeichnis

9.3 Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1: Werkstoffe und Fertigungsverfahren der wichtigsten Komponenten einer PEM Brennstoffzelle
- Tabelle 2: Kunststoffe für den Grundkörper
- Tabelle 3: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PPS 2
- Tabelle 4: Auftragungseffizienz beim Kunststoff PS 3

<i>Tabelle 5:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff LCP</i>
<i>Tabelle 6:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff Co-Polyester</i>
<i>Tabelle 7:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PS 2</i>
<i>Tabelle 8:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PSU</i>
<i>Tabelle 9:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PEEK</i>
<i>Tabelle 10:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PCT</i>
<i>Tabelle 11:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PPSU</i>
<i>Tabelle 12:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PS 1</i>
<i>Tabelle 13:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PPS 1</i>
<i>Tabelle 14:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PES</i>
<i>Tabelle 15:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PEEK</i>
<i>Tabelle 16:</i>	<i>Auftragungseffizienz beim Kunststoff PETG</i>
<i>Tabelle 17:</i>	<i>Vorläufige Reihung der Kunststoffe nach den Abziehversuchen</i>
<i>Tabelle 18:</i>	<i>Auswahl der Kunststoffe für den Grundkörper</i>
<i>Tabelle 19:</i>	<i>Zusammenfassung der Messergebnisse mit dem kleinen Spulenkern</i>
<i>Tabelle 20:</i>	<i>Zusammenfassung der Messergebnisse mit dem großen Spulenkern</i>
<i>Tabelle 21:</i>	<i>Zusammenfassung der Messergebnisse ohne katalysatorbeladener Rußschicht</i>
<i>Tabelle 22:</i>	<i>Werkstoffe und Fertigungsverfahren der wichtigsten Komponenten einer PEM Brennstoffzelle</i>