

Eisenhuth GmbH und Co. KG  
Friedrich-Ebert-Str. 203  
37520 Osterode

In Zusammenarbeit mit

Direct Manufacturing Research Center (DMRC)  
an der Universität Paderborn  
Mersinweg 100  
33098 Paderborn

**Effizientes Herstellungsverfahren  
für metallische Bipolarplatten  
zum Einsatz in Brennstoffzellen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 32644/01 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Thorsten Hickmann und Dr. Rouven Henkel

November 2016

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>32644/01</b>	Referat	<b>34</b>	Fördersumme	<b>Eur 123.995,00</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Effizientes Herstellungsverfahren für metallische Bipolarplatten zum Einsatz in Brennstoffzellen</b>			
<b>Stichworte</b>		Brennstoffzellen. Additive Manufacturing, Bipolarplatte,			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>18 Monate</b>	<b>20.04.2015</b>	<b>20.10.2015</b>	<b>1</b>		
Zwischenberichte	Nein				
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Eisenhuth GmbH und Co. KG Friedrich-Ebert-Str. 203 37520 Osterode			Tel	05522-90670
				Fax	05522-906744
				Projektleitung Dr. Thorsten Hickmann	
				Bearbeiter	
<b>Kooperationspartner</b>	DMRC an der Universität Paderborn Mersinweg 100 33098 Paderborn				
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>In diesem Projekt soll ein FDM-3D-Druckverfahren zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen (Negativformen) entwickelt werden, welches die Fertigung von fein strukturierten metallischen BPP in Zusammenarbeit mit der Volkswagen AG ermöglicht. Des Weiteren sollen auch neuartiger Bipolarplatten aus Blechen hergestellt werden. Bipolarplatten (BPP) werden in elektro-chemischen Energiewandlern wie PEM-Brennstoffzellen und Elektrolyseuren eingesetzt. Eisenhuth übernimmt in der ersten Projekthälfte die Konstruktionen von BPP und Negativformen. Hierbei wird insbesondere auf einen großen Erfahrungsschatz aus den Unternehmensbereichen Werkzeugbau und BPP Fertigung gesetzt. Am DMRC werden Untersuchungen durchgeführt, um ein als Werkzeugeinsatz geeignetes thermoplastische Material zu identifizieren. Daran anschließend beginnen umfangreiche Versuche um möglichst optimale Maschinen- und Prozesseinstellungen für das FDM-Druckverfahren zu finden. Sobald die erste Negativform am DMRC entstanden ist, wird diese in die von Eisenhuth gebaute Werkzeugstammform integriert. Anschließend beginnt bei Eisenhuth die Herstellung der metallischen BPP mithilfe eines Prägeverfahrens. Die hierbei erhaltenen Erfahrungswerte werden im weiteren Projektverlauf dazu genutzt, die am DMRC hergestellten Negativformen zu optimieren. Außerdem werden die hergestellten metallischen BPP hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften am DMRC untersucht und deren Kennwerte mit anderen am Markt verfügbaren metallischen BPP verglichen. Messungen bezüglich der elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten werden durch Eisenhuth realisiert. Abgeschlossen wird das Vorhaben mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Teststandes und der Aufnahme einer Strom-Spannungs-Kennlinie.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>AP 1 Anforderungsanalyse Zu Beginn des Projektes wird eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Die aktuelle Ist-Situation für die Herstellung von BPP wird abgebildet und in Form eines abgeleiteten Lastenheftes dokumentiert. Im Pflichtenheft werden das weitere Vorgehen und Lösungsansätze formuliert. Hier erfolgt eine enge Abstimmung mit den potentiellen Anwendern.</p>					

Bei der Aufnahme der Ist-Situation wird eine umfassende Analyse der derzeitigen Fertigungsprozesse von BPP und in der Dünnblechumformung angestrebt. Im Rahmen der Analyse werden die wichtigen Fertigungsparameter (Druck, etc.) und die notwendigen mechanischen Eigenschaften ermittelt (Festigkeit, etc). Auch werden die speziellen Anforderungen an eine BPP aufgenommen. Hier sind die Kanäle und Stege zu nennen, welche in ihrer Tiefe und Breite unterschiedliche Eigenschaften hervorrufen und dementsprechend ausgelegt werden müssen. Ausgehend von den Ergebnissen aus der Analyse der Ist-Situation werden in diesem Arbeitspaket Materialien für die Herstellung von Negativformen identifiziert und hinsichtlich ihrer Tauglichkeit bewertet. Hier werden auf dem Stratasys 3-D-Drucker Fortus 400mc neben den aktuell verwendeten Materialien (u.a. Ultem) auch andere Materialien (z.B. Iglidur) betrachtet.

#### AP 2 Konstruktion

In diesem Arbeitspaket werden die konstruktiven Aufgaben des Projektes gelöst. Durch die neue Fertigungstechnologie von BPP ergeben sich grundlegend neue Möglichkeiten der Gestaltung. Als Endanwender konnte für die in diesem Projekt ein potentieller Kunde gefunden werden. Daher wird speziell dieses Arbeitspaket in enger Absprache mit potentiellen Kunden bearbeitet.

#### AP 3 Fertigung

In diesem Arbeitspaket werden alle notwendigen Komponenten für die Herstellung von BPP gefertigt. Hierbei wird auf die Daten aus der Konstruktion zurückgegriffen.

AP 4 Integration und Test In diesem Arbeitspaket werden die im Vorfeld hergestellten Komponenten zusammengesetzt, das Produkt gefertigt, aufgebaut, getestet und bewertet.

#### AP 4 Integration und Test

In diesem Arbeitspaket werden die im Vorfeld hergestellten Komponenten zusammengesetzt, das Produkt gefertigt, aufgebaut, getestet und bewertet.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel 0541/9633-0 ☐  
Fax 0541/9633-190 ☐ <http://www.dbu.de>

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Dokumentation und Anfertigung im Rahmen des vorliegenden Abschlussberichtes

Im Verlauf des Projektes sollen die neuen Erkenntnisse in ein Qualitätsmanagementsystem überführt und die Ergebnisse in die Fertigung umgesetzt werden.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Siehe Angehängte Veröffentlichungen

### ***Fazit***

Es ist klar beabsichtigt, im Anschluss an das Vorhaben das Thema der metallischen BPP weiterzuverfolgen. Wie erwähnt, ist Eisenhuth heute eines von 2 führenden Unternehmen im Europa im Bereich der Lieferung von Graphit-Compound BPP für unterschiedliche Anwendungen. Eisenhuths Kunden finden sich überwiegend in den Anwendungen HT-PEM, NT-PEM und Redox Flow wieder. Hier wird versucht, entsprechend der genannten Reihenfolge die Kundenbindung zu nutzen, um das neue Produkt im Markt zu lancieren.

Das Marktpotential der metallischen Blech-Bipolarplatten sieht Eisenhuth vor allem in der Kombination aus chemischer Stabilität und mechanischer Belastbarkeit der neuen Materialien. Damit können mehrere potentielle Kunden kostengünstige Komponenten verwenden und damit auch die Systeme entsprechend preiswert vermarkten.

Mit den neuen Produkten können die Umsätze gesteigert werden. Eisenhuth erhofft sich zudem, nach Abschluss auch die Mitarbeiterzahl aufstocken zu können.

Darüber hinaus verspricht sich Eisenhuth folgende Vorteile:

- Ausbau der bestehenden Kundenbeziehungen
- Festere Bindung der bestehenden Kunden durch neuartige Konzepte und Produkte
- Erschließung neuer Kunden, insbesondere im Brennstoffzellenbereich mit metallischen Stacks

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel  
0541/9633-0 ☐ Fax 0541/9633-190 ☐ <http://www.dbu.de>

## Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt .....	- 2 -
Inhaltsverzeichnis .....	- 4 -
Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen.....	- 5 -
Verzeichnis von Abkürzungen und Definitionen .....	- 6 -
Einleitung.....	- 7 -
Hauptteil .....	- 8 -
a.) CAD Erstellung.....	- 8 -
b.) Untersuchungen der Formen (DMRC/EIS).....	- 9 -
c.) Verschleisstests (DMRC) .....	- 15 -
d.) Brennstoffzellen-Integration (EIS) .....	- 17 -
e.) Kennlinien .....	- 21 -
Ökonomische und Ökologische Bewertung gegenüber dem heutigen Stand der Technik.....	- 25 -
Möglichen Nutzungspotentiale der Entwicklung über das konkrete Projektthema hinaus.....	- 27 -
Fazit.....	- 28 -
Literaturverzeichnis .....	- 29 -
Anhang 1: Veröffentlichungen Jahresbericht des DMRC Regijo, Nov. 2015. ....	- 30 -
Anhang 2: Veröffentlichungen Regijo Nr 1/2016 .....	- 33 -
Anhang 3: Veröffentlichungen Stahlformenbauer, Sept. 2016.....	- 34 -
Anhang 4: Veröffentlichung: Der Stanz & Schnittwerkzeugbau, Okt. 2016 ...	- 37 -

## Verzeichnis von Abbildungen und Tabellen

### Abbildungen:

Abb. 1: Kathode

Abb. 2.: Anode

Abb.3: Rauhtiefenmessgerät von Firma Eisenhuth

Abb.4: Messungen der Rauhtiefe von Platten DMRC

Abb.5: Untersuchungen der Linienwelligkeit der Bauteile

Abb.6: Druckprobe als Block & Druckprobe im zusammengedrückten Zustand

Abb.7: Abriebprüfgerät

Abb.8: Isolierschicht für Stack mit metallischen Platten (Teil 1)

Abb.:9 Isolierschicht für Stack mit metallischen Platten (Teil 2)

Abb. 10: MEA – liegend zwischen 2 Bipolarplatten

Abb.11: Einzelteile des Stacks

Abb. 12: Strom-Spannungs-Kennlinie des Einzellers

Abb.13: Spannungs-Leistungs-Kennlinie des Einzellers

Abb.14: Vergleich der verschiedenen Plattenmaterialien bezogen auf die Leistung

Abb. 15 Vergleich der verschiedenen Plattenmaterialien bezogen auf die Stromdichte

Abb. 16 Vergleich der verschiedenen Plattenmaterialien allgemein

Abb 17: Entwicklung von Stromverbrauch und -erzeugung aus erneuerbaren Energien

### Tabellen:

Tabelle. 1: Messung Ebenheit der Materialien mittels Keyence

Tabelle 2: Keyence Messung der Rechtwinkligkeit

Tabelle 3: Umrechnung der Prüfkraft in die spätere Druckkraft im Fertigungsprozess

Tabelle 4: Messungen Abriebfestigkeitstest (Angaben in Gramm (g))

## Verzeichnis von Abkürzungen und Definitionen

3-d-Druck	3-dimesionaler Druck
316 L	Edelstahlbezeichnung
A	Ampere
Abb.	Abbildung
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ABS M	Acrylnitril-Butadien-Styrol - Medium
AG	Aktiengesellschaft
BPP	Bipolarplatte
CAD	Computer Aided Design
DMRC	Direct Manufacturing Research Center
FDM	Fused Deposit Modeling
g	Gramm
HT PEM	Hoch-Temperatur Polymer Elektrolyt Membran
KN	Kilo-Newton
mA/cm <sup>2</sup>	Miliampere pro Quadratcentimeter
MEA	Membrane Electrode Assembly
µm	Mikrometer
mm	Milimeter
N/mm <sup>2</sup>	Newton pro Quadratmilimeter
NT PEM	Nieder-Temperatur Polymer Elektrolyt Membran
PEM	Polymer Elektrolyt Membran
V	Volt
VW	Volkswagen

## Einleitung

In diesem Projekt soll ein FDM-3D-Druckverfahren [Geb13] zur Herstellung von Werkzeugeinsätzen (Negativformen) entwickelt werden, welches die Fertigung von fein strukturierten metallischen Bipolarplatten (BPP) [Kai03] in Zusammenarbeit mit Brennstoffzellen-Stackbauern ermöglicht. Des Weiteren sollen auch neuartiger Bipolarplatten aus Blechen hergestellt werden. Bipolarplatten (BPP) werden in elektro-chemischen Energiewandlern wie PEM-Brennstoffzellen und Elektrolyseuren eingesetzt. Eisenhuth übernimmt in der ersten Projekthälfte die Konstruktionen von BPP und Negativformen. Hierbei wird insbesondere auf einen großen Erfahrungsschatz aus den Unternehmensbereichen Werkzeugbau und BPP Fertigung gesetzt.

Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Auslegung des fein strukturierten Wasserstoff Verteilerkanals (Flowfield) gelegt, wobei die Anforderungen der darauffolgenden Fertigungsschritte ausreichende Berücksichtigung finden. Zeitgleich werden am DMRC Untersuchungen durchgeführt, um ein als Werkzeugeinsatz geeignetes thermoplastische Material zu identifizieren. Daran anschließend beginnen umfangreiche Versuche um möglichst optimale Maschinen- und Prozesseinstellungen für das FDM-Druckverfahren zu finden. Sobald die erste Negativform am DMRC entstanden ist, wird diese in die von Eisenhuth gebaute Werkzeugstammform integriert. Anschließend beginnt bei Eisenhuth die Herstellung der metallischen BPP mithilfe eines Prägeverfahrens. Die hierbei erhaltenen Erfahrungswerte werden im weiteren Projektverlauf dazu genutzt, die am DMRC hergestellten Negativformen zu optimieren.

Außerdem werden die hergestellten metallischen BPP hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften am DMRC untersucht und deren Kennwerte mit anderen am Markt verfügbaren metallischen BPP verglichen. Messungen bezüglich der elektrischen und thermischen Leitfähigkeiten werden durch Eisenhuth realisiert. Abgeschlossen wird das Vorhaben mit dem Aufbau und der Inbetriebnahme eines Teststandes und der Aufnahme einer Strom-Spannungs-Kennlinie (U-I Kurve)

Als Endanwender kommen Stackbauer in Betracht, unter anderem die Volkswagen AG bzw. der Konzernbereich alternative Antriebe gewonnen werden. Hierbei werden von VW verschiedene Flowfelddesigns an Eisenhuth übermittelt, welche mithilfe in diesem Projekt geplanten Fertigungsverfahren auf metallische BPP geprägt werden.

Anschließend erfolgt eine Weitergabe dieser BPP an VW, wo die Eignung dieser BPP in Brennstoffzellen untersucht wird.

## Hauptteil

### a.) CAD Erstellung

Zunächst wurde im Rahmen des Vorhabens wurden in den zu Beginn des Vorhabens eine grundlegende Analyse der Bauteile und der Verfahren durchgeführt. So wurde zunächst ein Design gewählt, welches sich für eine spätere Serienfertigung eignet. Darauf aufbauend wurde nun eine Anode und eine Kathode konstruiert.

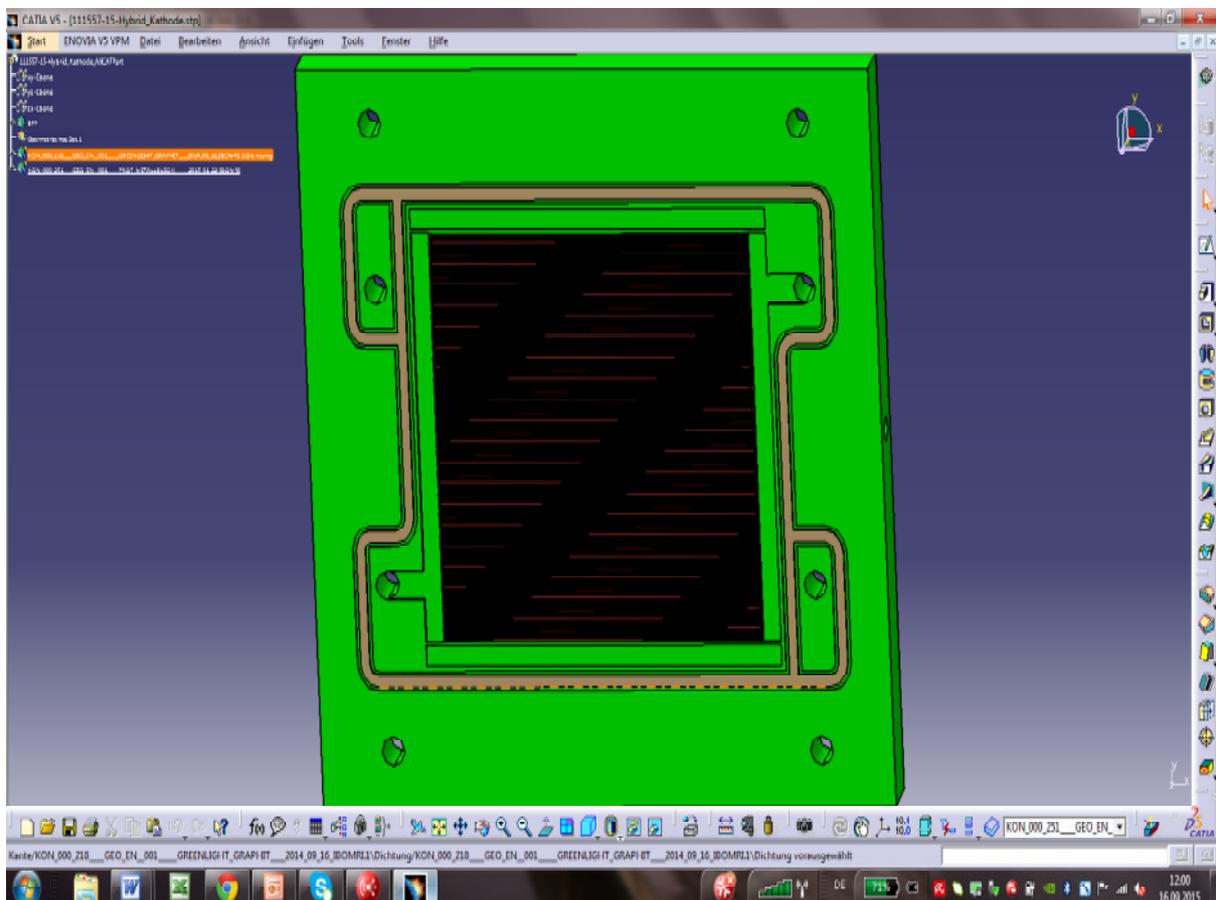


Abb. 1: Kathode

Auf der Abbildung 1 ist die Kathode zu sehen. In der Mitte (überwiegend schwarze Geometrie) zeichnet sich das Flowfield ab. Außen herum ist eine Dichtung angeordnet, die an den Ecken jeweils eine ringförmige Struktur aufweist. Diese soll nun als Ausgangssituation der Untersuchungen verwendet werden.

Eine ähnliche Kontur wurde auch für die Anode (Abb. 2) gewählt. Sie hat sich von der Kathode dahingehend unterschieden, dass die Nuttiefe weniger stark ausgeprägt ist. Darüber hinaus weicht die Position der Bohrungen ab.

Diese Geometrien sind etwas vereinfacht worden, für die Untersuchungen. Diese Daten wurden dem DMRC bereitgestellt und Testmuster hergestellt.

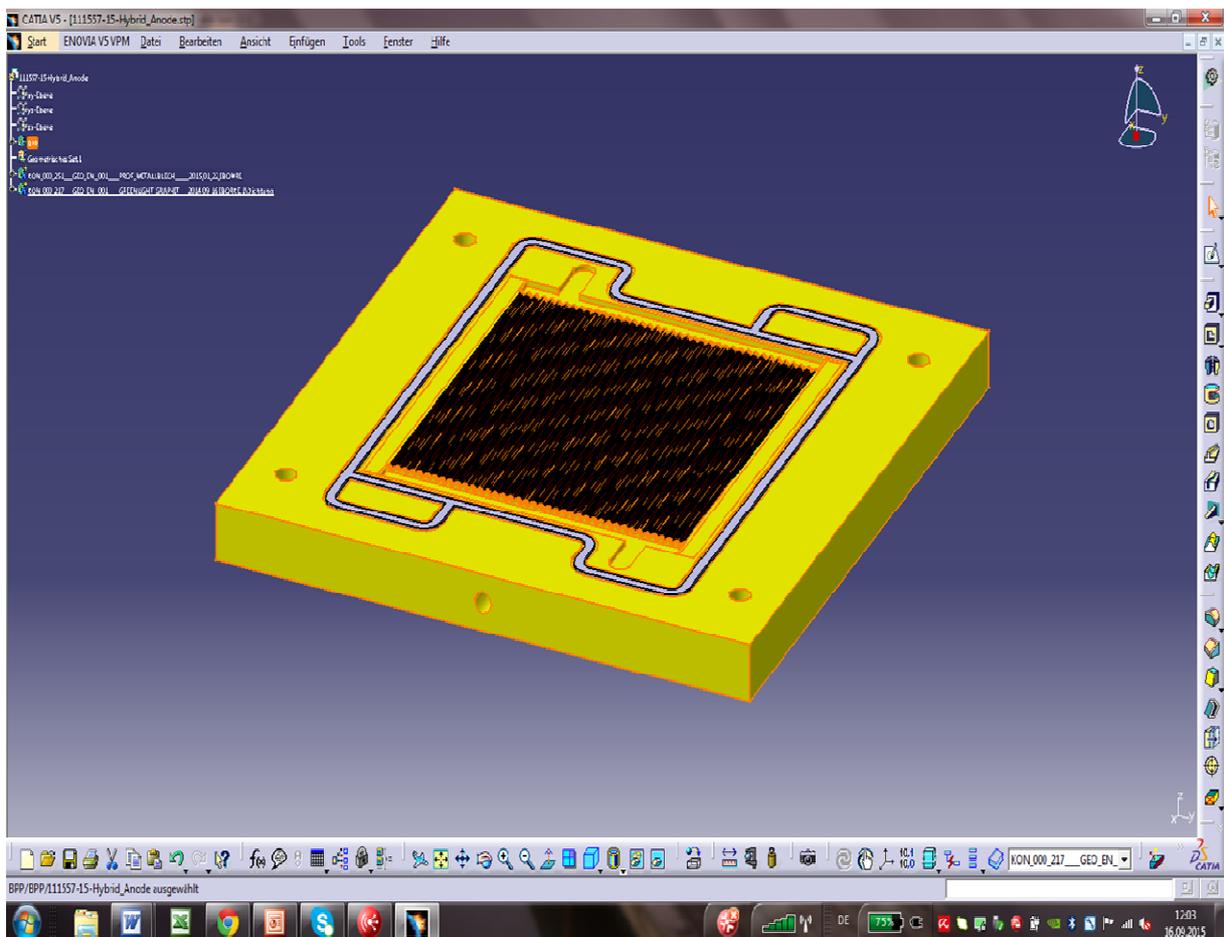


Abb. 2.: Anode

Das Design brachte es mit sich, dass auch eine entsprechende Dichtung konzipiert werden muss. Zu diesem Zweck wurde bei Eisenhuth ein Werkzeug gefertigt, um entsprechende Dichtungen herstellen zu können. Darüber hinaus sind auch Dichtungs-Rohstoffe beschafft worden, um die entsprechende Dichtung herzustellen.

### b.) Untersuchungen der Formen (DMRC/EIS)

Nachdem die ersten Muster in Zusammenarbeit mit dem DMRC gefertigt wurden, sind anschließend bei Eisenhuth auch Untersuchungen der Rauhtiefe durchgeführt

worden. Hier wurde auch ein Referenzmuster spezifiziert, welches den Ausgangspunkt und die Messfähigkeit des Gerätes begutachten kann (Abb.3).

### a) Referenzmuster



Rauhtiefe 7,8 µm

Abb.3: Rauhtiefenmessgerät von Firma Eisenhuth

Anschließend wurden die Bauteile vermessen. Dabei stellten sich folgende Ergebnisse heraus:

	<b>Platte 1</b>	<b>Platte 2</b>
<b>Rauhtiefenmessung Bauteil</b>	7,6 µm	10,2 µm
<b>Rauhtiefenmessung Form</b>	2,1 µm	88,3 µm

Abb.4: Messungen der Rauhtiefe von Platten DMRC

Hier zeigte sich (Abb. 4), dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Platte und der Bauteile besteht. Darüber hinaus zeigte sich, dass der Faktor der Rauhtiefe keine direkte Korrelation zwischen den Bauteilen einerseits und der Form andererseits aufzeigt. Im Anschluss daran wurde die Linienwelligkeit der Bauteile gemessen mit dem Keyence Verfahren (linienartige Untersuchung der Oberfläche des Bauteils). Diese Arbeiten wurden am DMRC durchgeführt

Dabei zeigte sich:

- Beste Ergebnisse bei Ultem 90 Grad waagrecht mit 0,53 mm durchschnittlicher Kanaltiefe
- Ausreichende Ergebnisse bei beiden ABS Aufbaurichtungen
- Bei waagrecht Aufbau gibt es möglicherweise Probleme durch erhöhten Verschleiß durch die Zacken auf den Stegen

Die einzelnen Ergebnisse sind in der Abbildung 5 dargestellt.

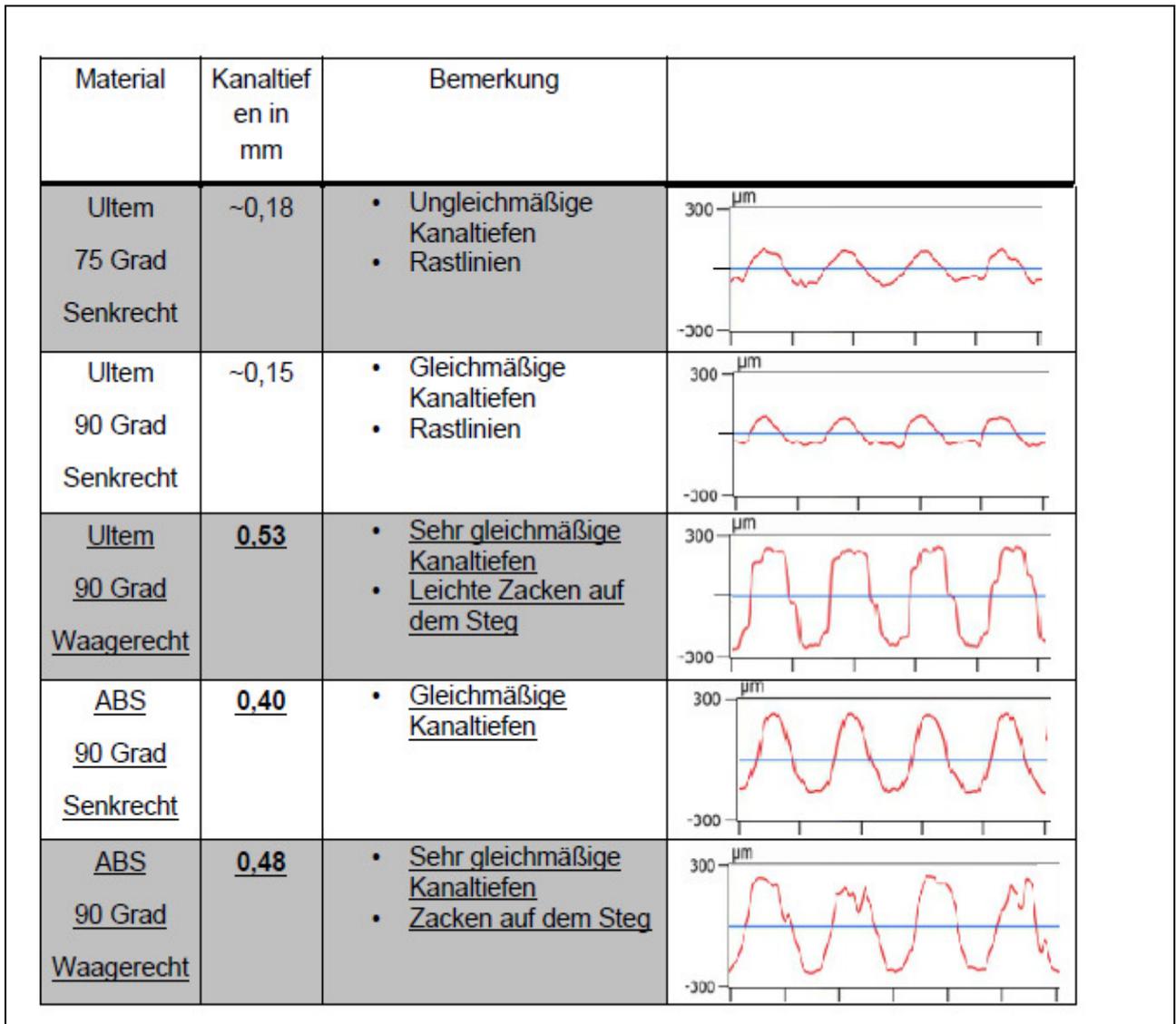


Abb.5: Untersuchungen der Linienwelligkeit der Bauteile

Darüber hinaus wurden weitere Untersuchungen der Geometriegenauigkeit vorgenommen. Zunächst sind die Ebenheit der Bauteile gemessen worden. In untenstehenden Tabelle sind die abgelesenen Werte aus den Messungen aufgelistet. Ist die Seite konvex, bzw. eine Wölbung nach innen zum Bauteil, ist der Wert „negativ“, wenn die Oberfläche sich nach außen wölbt, also konkav ist, ist der Wert in der Tabelle „positiv“.

Material	Seite A	Seite B	Seite C lang	Seite C kurz	Seite D lang	Seite D Kurz
Ultem senkrecht	-0,25	-0,06	-0,10	-0,04	+0,08 +0,13 Rastlinien	+0,05
Ultem waagrecht	-0,21	-0,06	-0,13	-0,05	+0,13	+0,13
ABS senkrecht	-0,12	-0,06	-0,06 Ausreißer	-0,03	+0,06 Ausreißer	+0,06 wellig
ABS waagrecht	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06 wellig	+0,06 Ausreißer	+0,03 wellig

Tabelle. 1: Messung Ebenheit der Materialien mittels Keyence.

Bei den Messungen der Seite A ist zu erkennen gewesen, dass bei allen Bauteilen ein negativer Wert für die Ebenheit gemessen wurde (Tabelle 1). D.h., dass sich die Bauteile, hervorgerufen durch Schwindung beim Abkühlen, nach innen zum Bauteil hin verziehen. Dieser Effekt ist bei den Bauteilen aus Ultem deutlich höher gewesen, was auf die höhere Verarbeitungstemperatur zurück zu führen ist. Bei Ultem lagen die Werte bei über -0,2 mm. Beim ABS hingegen ist die Wölbung deutlich geringer gewesen mit ca. -0,1mm.

Aus den Messungen der Seite A ist zusätzlich zu der Ebenheit die Rechtwinkligkeit der jeweiligen Seite zu bestimmen gewesen, die im additiven Fertigungsverfahren immer von Relevanz sind [Kle16]. Die Rechtwinkligkeit sagt aus, wie sich die Formen in Z-Richtung, also von der Bauplattformebene aus, mit steigender Höhe verändern. Ist der Wert für die Rechtwinkligkeit positiv, wird das Bauteil mit steigender Höhe breiter. Wenn der Wert negativ ist, wird das Bauteil mit steigender Höhe schmaler. In der folgenden Tabelle 2 sind die gemessenen Werte für die Rechtwinkligkeit aufgelistet:

Material	ABS senkrecht	ABS waagrecht	Ultem senkrecht	Ultem waagrecht
Rechtwinkligkeit	-0,28	-0,11	-0,075	<-0,05

Tabelle 2: Keyence Messung der Rechtwinkligkeit

Wie der obenstehenden Tabelle 2 zu entnehmen, haben sich die Werte für die Rechtwinkligkeit zum einen bei verschiedenen Materialien differenziert dargestellt, zum anderen sind sie durch die Aufbaurichtung beeinflusst worden. Der Verzug mit steigender Schichthöhe war bei ABS-Bauteilen höher als bei Ultem. Des Weiteren war der Verzug bei senkrecht aufgebauten höher, als bei waagrecht aufgebauten Negativformen.

Bei der Ebenheit der Seite B ist der Wert bei den gemessenen Negativformen aus ABS und Ultem ähnlich gewesen. Wie schon bei Seite A sind bei allen vermessenden Formen die Seiten leicht nach innen gewölbt gewesen. Der Wert liegt bei ca. -0,06mm. Hier ist jedoch eindeutig zu erkennen gewesen, dass sich die Ränder abheben. Der Effekt, dass sich die Ränder abheben, kommt zustande, da bei der Fertigung einer Schicht, der Düsenkopf der FDM-Anlage zuerst die Außenkontur abfährt und dann in einem Raster das Innere füllt. Somit kommt es durch die schnellere Abkühlung der Randschicht zu einer geringeren Schwindung als im inneren. Demzufolge ist die Baustrategie der Negativformen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zu versehen und erforderlich gewesen.

In einem nächsten Schritt sind auch die mechanischen Kennwerte gemessen worden. Beim Umformen wird die Form einer Druckkraft ausgesetzt. Aus diesem Grund ist eine Druckprüfung durchgeführt worden, um zu schauen, ob die Negativformen eine ausreichende Druckfestigkeit aufweisen. Des Weiteren wurde die Kugeldruckhärte ermittelt. Die Kugeldruckhärte eignet sich sehr gut für die Ermittlung der Härte der Negativformen.

Des Weiteren wurde eine Verschleißprüfung durchgeführt. Um den Verschleiß der beiden Materialien zu vergleichen, wurde ein Abriebtest gemacht und die Werte gegenübergestellt. Für die Druckprüfung wurde die Instron Universalprüfmaschine an der Uni Paderborn verwendet. Mit der Instron können Materialproben durch eine translatorische Bewegung des Prüfwerkzeugs einer Zug-, Druck- oder Biegebelastung ausgesetzt werden. Die Weg-Zeit-Diagramme werden üblicherweise in Spannungsdehnungs-Verläufe umgerechnet. Auch die Prüfungen von Sonder-Geometrien z.B. für Weiterreißversuche oder Relaxationsversuche und Kriechversuche sind möglich. Da es in dieser Arbeit um das Umformen von Dünnscheiben geht, wird eine Druckprüfung durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit

wird eher gering mit 1mm/min gewählt, um ein mögliches Reißen des Blechs durch hohe Umformraten zu vermeiden. Der Prüfdruck wird schrittweise erhöht um ein vorzeitiges Zerstören der Negativform zu vermeiden.

Bei der Druckprüfung wurden der Stempel und die Matrize übereinander gelegt und ein Blech mit den Maßen 30mm x 30mm in die Mitte eingefügt (Abb.6). Bei dem Blech handelte es sich um ein Edelstahlblech mit einer Dicke von 0,1mm. Um eine Fixierung der beiden Negativformen zu erhalten, werden die Formen mit einem Absatz von 30mm x 30mm gefertigt. So konnten, mit Hilfe von Klebeband, die beiden Formhälften und das Blech in einem Block fixiert werden und ein Verrutschen verhindert werden.

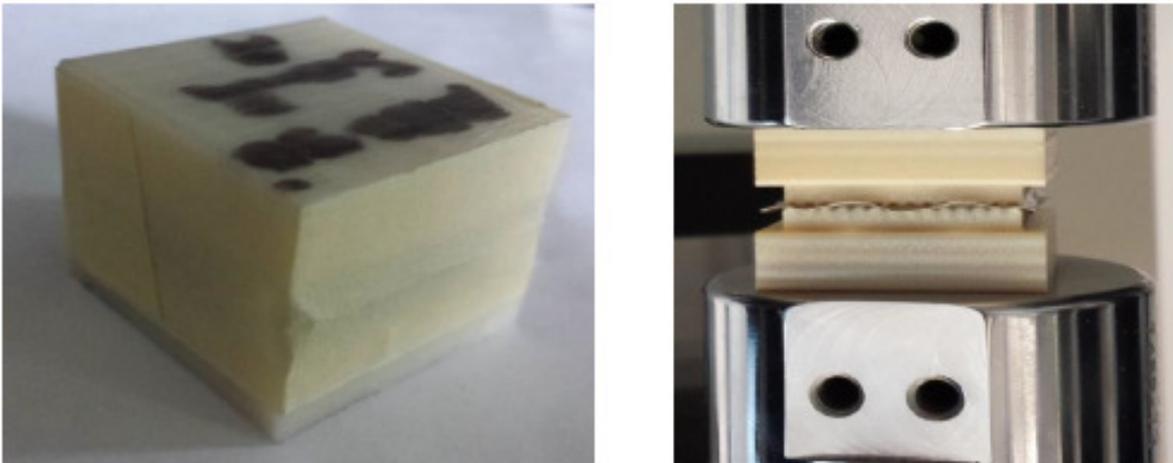


Abbildung 6: Druckprobe als Block & Druckprobe im zusammengedrückten Zustand  
Dieser Block wurde in die Prüfmaschine eingelegt. Als Prüfwerkzeug dienen zwei gegenüberliegende Stempel mit einer ebenen Fläche, auf die der Block gelegt wird. Anschließend drückt der obere Stempel mit der eingestellten Prüfkraft und Prüfgeschwindigkeit die Probe zusammen. Es wird der Traversenweg in X und die Prüfkraft in Y aufgezeichnet. Die angegebene Prüfkraft muss noch auf die spätere Druckkraft im Fertigungsprozess umgerechnet werden.

Laut Herstellerangaben hat das Ultem 9085 eine Druckfestigkeit von 104N/mm<sup>2</sup> und ABS-M30 von 58N/mm<sup>2</sup>. [Geb13] Um an die Grenzwerte heranzugehen, muss eine Prüfkraft beim Ultem von 65kN und bei ABS von 36kN eingestellt werden. Die eingestellten Prüfkraften sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Nach der Druckprüfung

wurde das umgeformte Blech mittels Keyence-Messgerät vermessen und die Kanaltiefen der jeweiligen Presskraft gegenübergestellt.

In der folgenden Tabelle 3 sind die entsprechenden Druckkräfte bei der Fertigung entsprechend zu der Prüfkraft dargestellt:

Prüfkraft	Flächenpressung in N/mm <sup>2</sup>	Druckkraft im späteren Fertigungsprozess
3,00kN	4,8	24kN
8,00kN	12,8	63kN
10,00kN	16	79kN
12,00kN	19,2	94kN
15,00kN	24	118kN
20,00kN	32	157kN
25,00kN	40	197kN
30,00kN	48	236kN
35,00kN	56	275kN
40,00kN	64	314kN
45,00kN	72	354kN

Tabelle 3: Umrechnung der Prüfkraft in die spätere Druckkraft im Fertigungsprozess.

### c.) Verschleisstests (DMRC)

Bei der Prüfung von ABS ist zu sehen gewesen, dass sich bei einer Kraft ab ~30kN die Negativformen stark verformt haben. Die Prüfung ist bei einer maximalen Prüfkraft von 34,7kN abgebrochen worden, da die Prüfkraft nur noch gering angestiegen ist, jedoch der Traversenweg signifikant weiter angestiegen ist. Beim Ultem ist diese Grenze bei einer Prüfkraft von 45kN und einer daraus resultierenden Flächenpressung von 72N/mm<sup>2</sup> erreicht worden.

Da die spätere Pressmaschine mit einer Druckkraft von 250kN nicht auf eine Flächenpressung von 72N/mm<sup>2</sup> kommt, ist ein höherer Prüfdruck nicht getestet worden. Im Bereich von 1000-10000N Prüfkraft, sind Unregelmäßigkeiten im Druckverlauf zu erkennen. Diese lassen darauf schließen, dass in diesem Bereich die Umformarbeit am höchsten ist.

In einem weiteren Schritt wurde der Verschleiß ermittelt. Um die beiden Materialien in Bezug auf den Verschleiß vergleichen zu können, wird ein Abriebfestigkeitstest in Anlehnung an die DIN-Norm 53 754 durchgeführt worden. Bei diesem Test wird

zunächst Schleifpapier mit einer gewissen Anzahl an Hieben über eine Oberfläche gezogen und der Gewichtsverlust gemessen (Abb.7).



Abbildung 7: Abriebprüfgerät

Da es sich bei Ultem um einen sehr harten Kunststoff handelt muss ein gröberes Schleifpapier aus gepulvertem Aluminiumoxid verwendet werden. Nach ersten Tests eignet sich hier ein Schleifpapier in der Körnung P80, um einen ausreichenden Abrieb zu erhalten und um die Materialien vergleichen zu können. Das Probenmaterial wird mit 200 Hieben über die Oberfläche abgerieben und der Gewichtsverlust wird gewogen.

Da bei den additiven Fertigungsverfahren die Bauteile Schicht für Schicht aufgebaut werden, muss hier ein Abriebtest in Aufbaurichtung(längs) und quer zur Aufbaurichtung durchgeführt werden. Zu erwarten ist, dass es, durch die einzelnen Schichten hervorgerufene Rauheit, quer zur Aufbaurichtung, zu einem höheren Verschleiß führt. Um einen guten Durchschnittswert zu erhalten und die Unregelmäßigkeiten, hervorgerufen durch das Schleifpapier, gering zu halten, wurden die Proben fünfmal mit jeweils 200 Hieben abgerieben und getestet. Somit erhält man einen Durchschnittswert und kann die Materialien vergleichen. In der folgenden Tabelle sind die Gewichtsreduzierungen der verschiedenen Proben nach fünf Abriebtests aufgezeigt.

Material	200x	200x	200x	200x	200x	Ø	V in mm <sup>3</sup>
Ultem Quer	-0,0155	-0,0152	-0,0153	-0,0142	-0,0142	-0,0148	11,0
Ultem Längs	-0,0160	-0,0151	-0,0154	-0,0142	-0,0138	-0,0149	11,1
ABS Quer	-0,0295	-0,0278	-0,0276	-0,0262	-0,0260	-0,0274	25,3
ABS Längs	-0,0310	-0,0308	-0,0284	-0,0278	-0,0261	-0,0288	26,7

Tabelle 4: Messungen Abriebfestigkeitstest (Angaben in Gramm (g))

Um die Materialien vergleichen zu können wurde zuerst der arithmetische Mittelwert aus den fünf Messungen errechnet. Mit dem arithmetischen Mittelwert erhält man die durchschnittliche Gewichtsabnahme. Da sich die Dichte der beiden Materialien unterscheidet [Kle13], muss hier der volumetrische Abrieb (V) ermittelt werden (Tabelle 4). Mit dem durchschnittlichen volumetrischen Abrieb werden die verschiedenen Materialien verglichen. Die Dichte von Ultem 9085 liegt bei 1,34g/cm<sup>3</sup> und beim ABS-M30 bei 1,08 g/cm<sup>3</sup> (Tabelle 4)

Wie zu erwarten, ist der Abrieb beim ABS deutlich höher gewesen im Vergleich zu Ultem. Ein Unterschied zwischen der Richtung in der getestet wurde, hat nur einen geringen Einfluss auf den Abrieb. Der volumetrische Abrieb von ABS ist um ~230% höher gewesen als bei Ultem. Die Werte sind in diesem Fall nicht direkt auf den Verschleiß beim Umformen zurück zu führen. Jedoch ist eindeutig zu sehen, dass die Abriebfestigkeit von Ultem deutlich höher ist im Vergleich zu ABS.

#### d.) Brennstoffzellen-Integration (EIS)

Mit den Vorliegenden Ergebnissen wurden nunmehr etliche Platten erstellt. Diese Platten wurden anschließend verwendet, um bei Eisenhuth entsprechend einen Stack zu fertigen. Dabei ist auch eine erneute Anpassung des Designs erforderlich gewesen, die aufgrund der oben dargestellten Ergebnisse umgesetzt werden mussten.

Für den Stackaufbau wurde bei Eisenhuth folgende Vorgehensweise gewählt:

- Rekonstruktion und Bau eines Einzellers
- Erstellen einer 5-Schichtigen Membran-Elektroden-Einheit
- Pressen der Bipolarplatten und Montage des Stacks

## - Durchführen der Messungen

Um sehr verlässliche Werte für die Blechzelle mit dem Werkstoff 316L zu erhalten wurden 5 verschiedene Messungen der Messwerte zu erhalten. Aus den 5 Messungen wurden für die weitere Betrachtung Mittelwertskurven erstellt. Dieser Vorgang ist deshalb wichtig, um die Verlässlichkeit des Verfahrens im Vergleich mit den anderen Materialien abzusichern, da möglicherweise keine zu großen Unterschiede zu erwarten sind, aber beim Materialwechsel Zerlegen und Zusammenbauen der Zelle erforderlich ist.

Im Anschluss daran wurden die beiden Bipolarplatten des Werkstoffes 316L dünn vergoldet, um den Einfluss des Vergoldens zu erfassen. Zum weiteren Vergleich konnten Bipolarplatten mit einer Graphitfolie 0,5 mm ebenfalls mit den vorliegenden Formen gepresst und in der Zelle gemessen werden. Zuletzt wurde als Material eine 0,10 mm, ebenfalls gepresste Kupferfolie, eingesetzt und im Einzeller vermessen.

Die obendargestellten leichten Abweichungen der ABS- und Ultem-Formen haben es erforderlich gemacht, das Design der Platten und das Design des Stacks zu modifizieren. Darüber hinaus musste auch vermeintlich auftretende Temperatureffekte berücksichtigt werden. [Kai03] Um den Temperatureffekt in Grenzen zu halten wurden Kunststoff- Endplatten eingesetzt und zwischen Bipolarplatte und Endplatte eine starke Isolierschicht aus Silikon (Kissen) eingebracht.

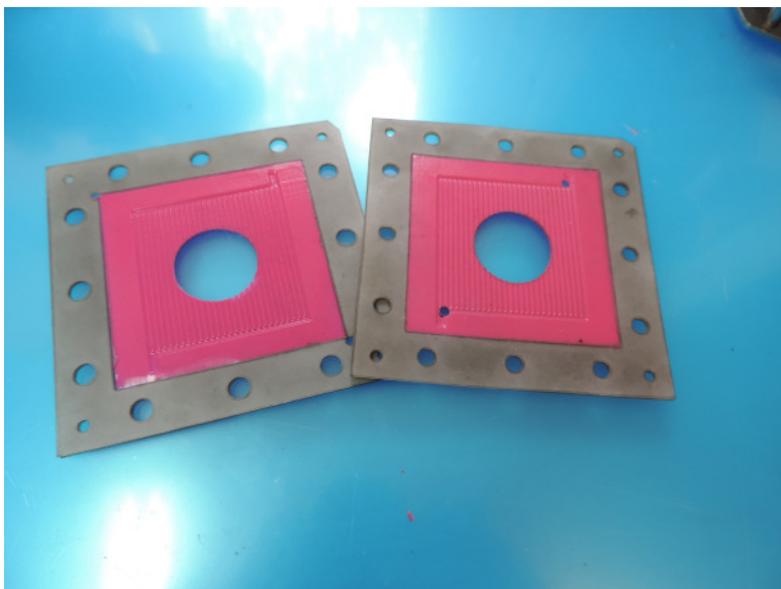


Abb.8: Isolierschicht für Stack mit metallischen Platten (Teil 1)

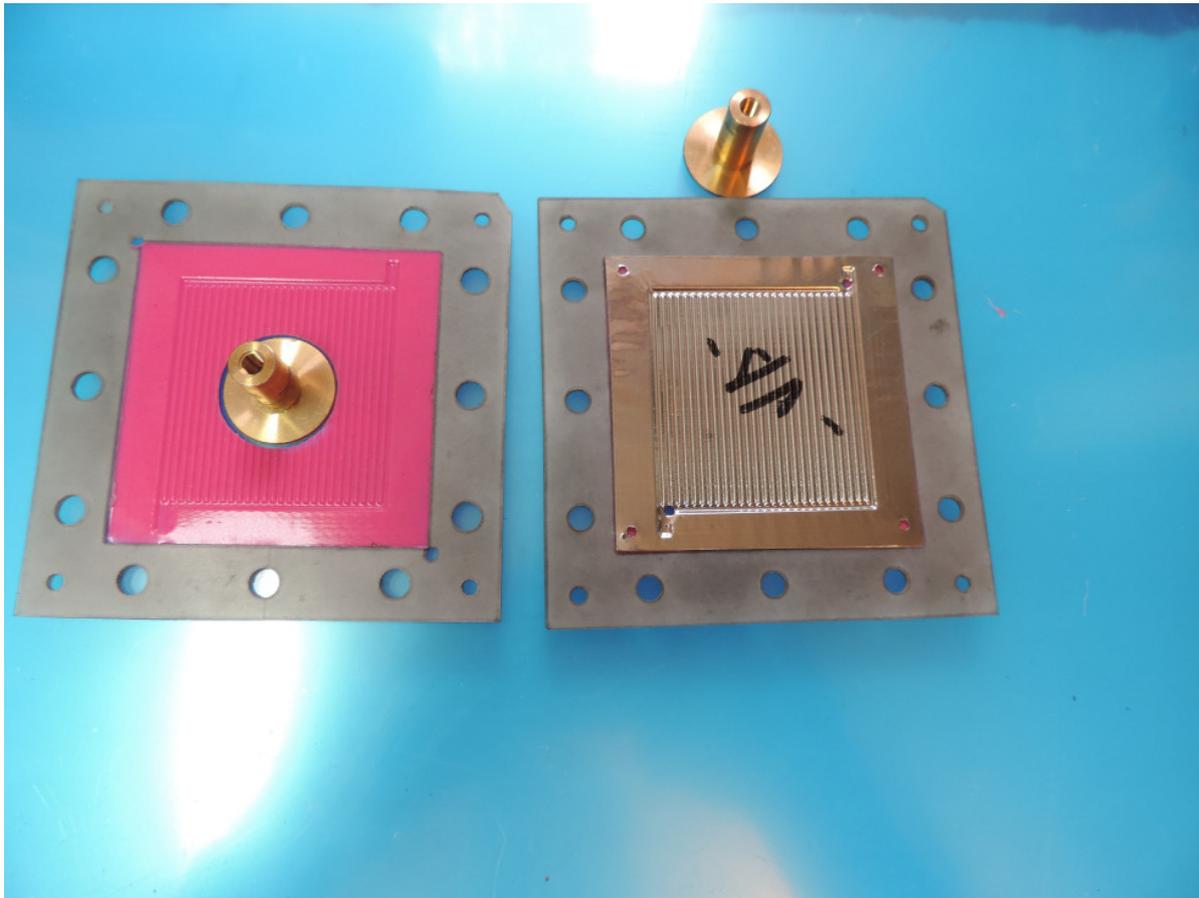


Abb.:9 Isolierschicht für Stack mit metallischen Platten (Teil 2)

Die in den Abbildungen 8, 9 dargestellte Isolierschicht wurde zusammen mit den gewellten Bipolarplatten gegossen um dadurch ein planparalleles und dichtes Anliegen der Bipolarplatten an die Endplatten zu erhalten. Als Stromabgriffe dienten besonders geformte Pilze, die durch die Endplatten im ausgeschnittenen Bereich der Isolierschicht direkten elektrischen Kontakt mit den Bipolarplatten ermöglichten und zusätzlich einen zentralen Druck auf die Bipolarplatten und MEA ausüben.

In einem nächsten Schritt wurde nun die MEA hergestellt. Die MEA wurde in einem Arbeitsschritt hergestellt. Sie besteht neben der PEM aus beidseitigen aufgetragenen Diffusionslayern (auf Abb. Schwarz), die mit hoher Temperatur und Druck mit Isopropanol verpresst worden sind, um eine hohe Gesamtleitfähigkeit der MEA zu erreichen. An dem Aussenrand der MEA wurde zugleich die Dichtung integriert. Hier wurde erneut ein Werkzeug gefertigt, um entsprechend die Dichtungen herzustellen.



Abb. 10: MEA – liegend zwischen 2 Bipolarplatten

Nachdem die MEA fertig gestellt war (Abb.10), wurde sie nunmehr mit den anderen Einzelteilen (Abb. 11) zum Stack verbaut. Vor diesem Hintergrund ist es erforderlich gewesen, zusätzlich noch Endplatten herzustellen. Die Endplatten bestehen aus einem Speziellen Kunststoff, der es ermöglicht, eine weitgehend planparallele Verschraubung des Systems zu realisieren.

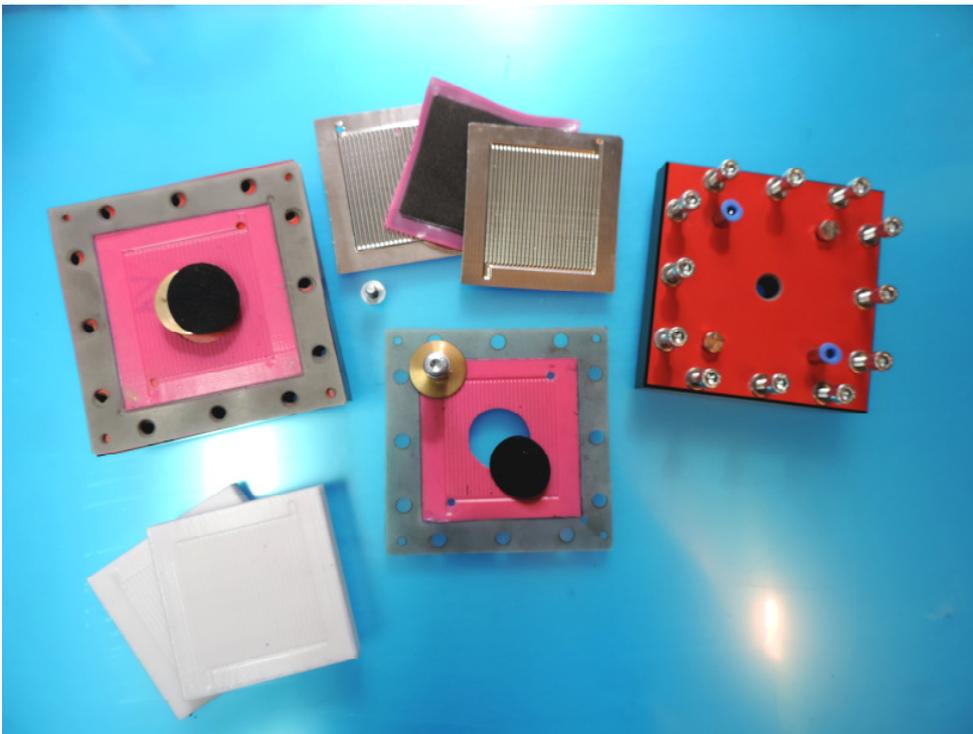


Abb.11: Einzelteile des Stacks

Das System wurde nunmehr zusammengebaut und getestet. Im Folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse dargestellt werden. Dabei wurde als Ausgangsmaterial die metallische Bipolarplatte, die durch das Pressen entstanden ist, gewählt. Anschließend wurde die Platte noch modifiziert, um eine bessere Leitfähigkeit zu erhalten.

### e.) Kennlinien

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse dargestellt.

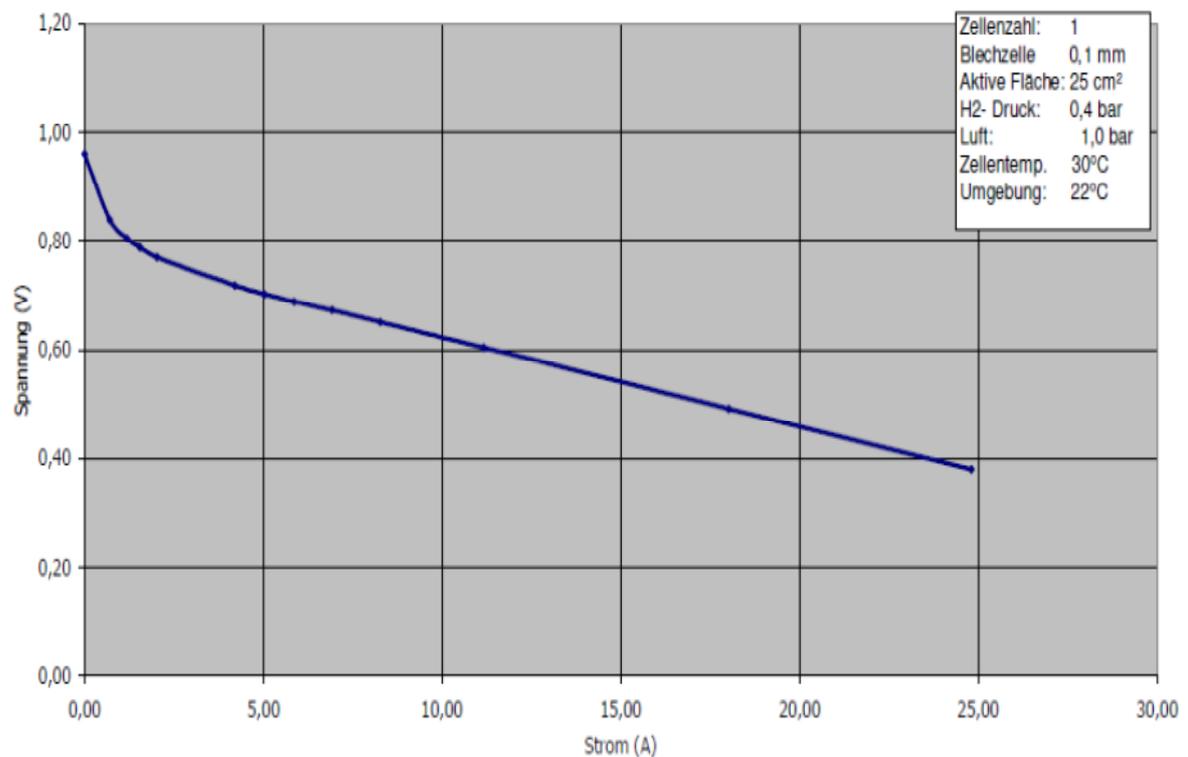


Abb. 12: Strom-Spannungs-Kennlinie des Einzellers

Auf der Abbildung 12 ist die Strom-Spannungs-Kennlinie des Einzellers zu sehen. Dabei ist die Spannung (V) gegenüber der Leistung (A) abgetragen. Der Einzeller bringt im Optimalen Betriebspunkt von 0,5 bis 0,6 V eine Leistung von 20 A.

Überträgt man nun die Leistung in Watt, ergibt sich folgendes Bild:

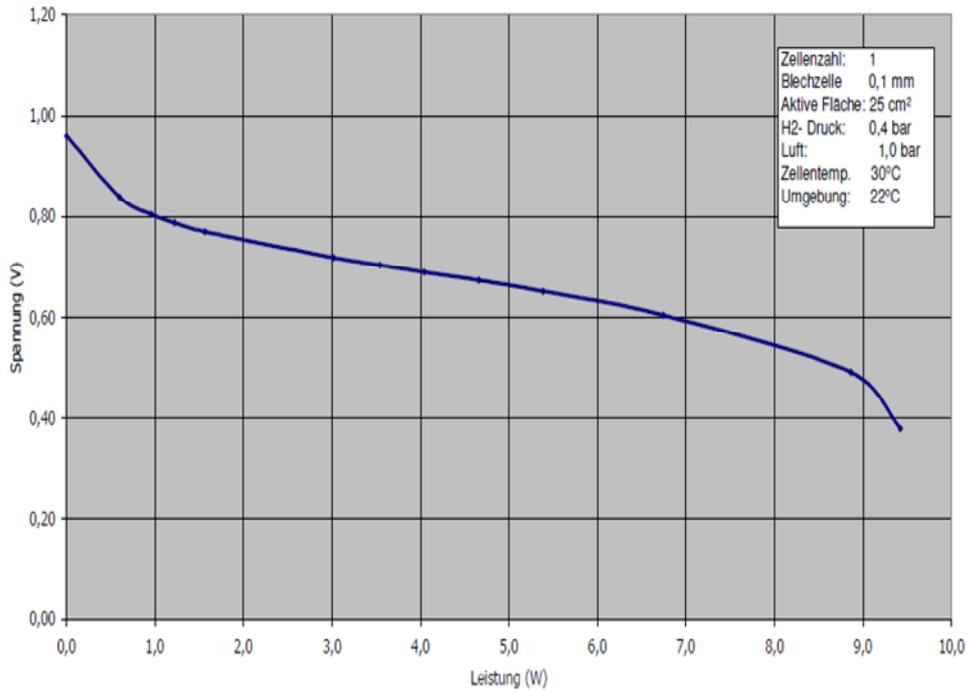


Abb.13: Spannungs-Leistungs-Kennlinie des Einzellers

Aus der Abbildung 13 ist zu ersehen, dass im optimalen Betriebspunkt von 0,5 bis 0,6 V [Kai03] eine Leistung von 8,5 Watt erzielt wird.

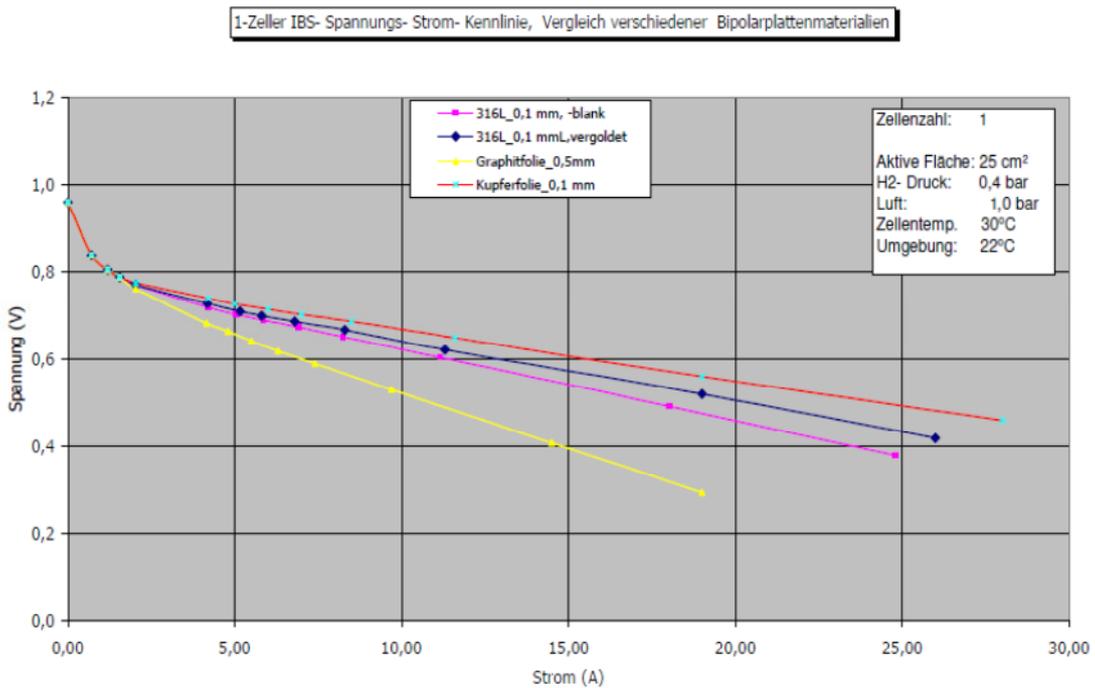


Abb.14: Vergleich der verschiedenen Plattenmaterialien bezogen auf die Leistung

Aus der Abbildung 14 ist zu ersehen, dass die Leistung der Zelle signifikant gesteigert werden kann, wenn die Platten mit Gold beschichtet werden.

Diese Beschichtung wird üblicherweise beim Einsatz von metallischen Bipolarplatten angewandt. Aus der Abbildung ist zu ersehen, dass bei einem Betriebspunkt von 0,6 V die Stromleistung (A) sich wie folgt darstellt:

Metallische Platte unbeschichtet (pinke Kurve): 11 A

Goldbeschichtete Platte (blaue Kurve): 13 A

Graphitplatte (untere Referenz): 7,4 A

Kupferplatte (obere Referenz) : 16 A

Ein analoges Bild zeigt sich auch bei Stromdichte:

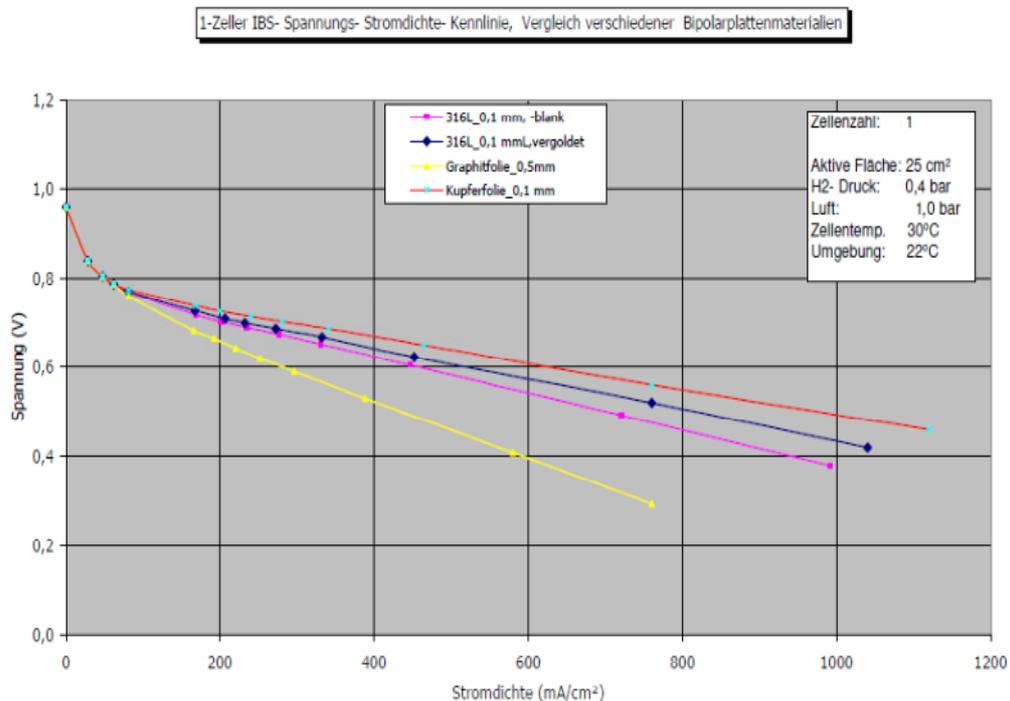


Abb. 15 Vergleich der verschiedenen Plattenmaterialien bezogen auf die Stromdichte

Aus der Abbildung 15 ist zu ersehen, dass die Leistung der Zelle signifikant gesteigert werden kann, wenn die Platten mit Gold beschichtet werden. Diese Beschichtung wird üblicherweise beim Einsatz von metallischen Bipolarplatten angewandt.

Aus der Abbildung ist zu ersehen, dass bei einem Betriebspunkt von 0,6 V die Stromleistung (A) sich wie folgt darstellt:

Metallische Platte unbeschichtet (pinke Kurve): 520 mA/cm<sup>2</sup>

Goldbeschichtete Platte (blaue Kurve): 470 mA/cm<sup>2</sup>

Graphitplatte (untere Referenz): 280 mA/cm<sup>2</sup>

Kupferplatte (obere Referenz) : 620 mA/cm<sup>2</sup>

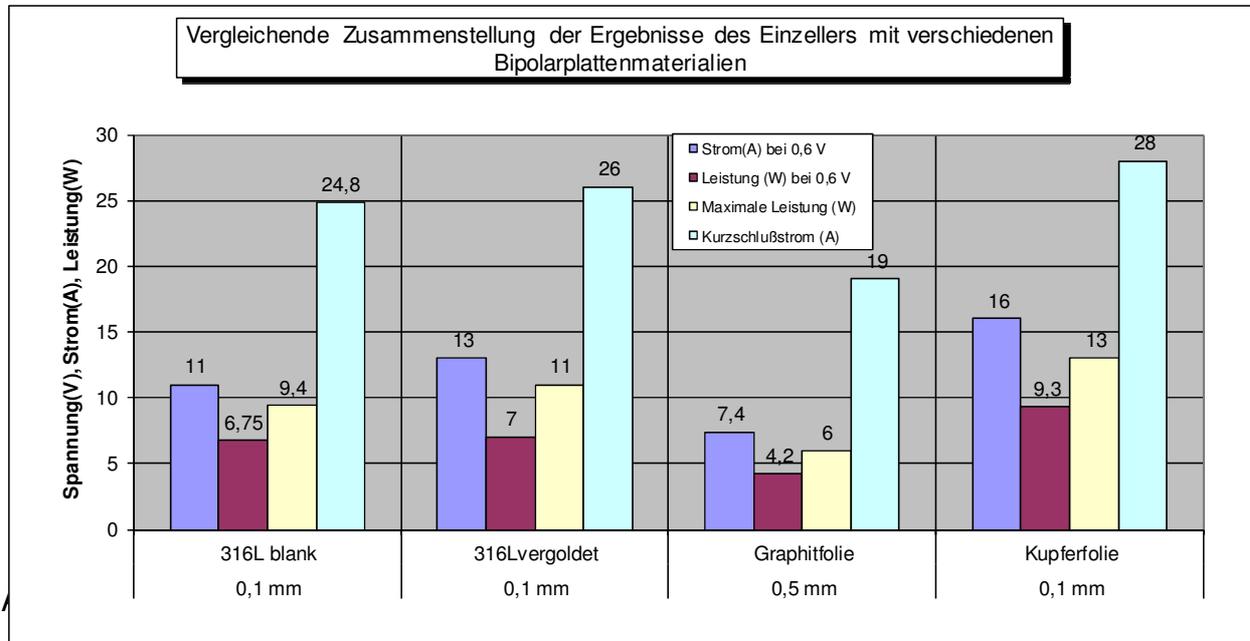


Abb. 16 Vergleich der verschiedenen Plattenmaterialien allgemein

Aus der Abbildung 16 ist zu ersehen, dass bei einem Betriebspunkt von 0,6 V die Stromleistung (W) sich wie folgt darstellt:

Metallische Platte unbeschichtet : 6,75 W

Goldbeschichtete Platte: 7 W

Graphitplatte (untere Referenz): 4,2 W

Kupferplatte (obere Referenz) : 9,3 W

Darüber hinaus sind die maximalen Leistungen genannt:

Metallische Platte unbeschichtet: 9,4 W

Goldbeschichtete Platte: 11 W

Graphitplatte (untere Referenz): 6 W

Kupferplatte (obere Referenz) : 13 W

Schließlich sind auch die Kurzschlussströme (A) dargestellt:

Metallische Platte unbeschichtet: 24,8 A

Goldbeschichtete Platte: 26 A

Graphitplatte (untere Referenz): 19 A

Kupferplatte (obere Referenz) : 28 A

### Ökonomische und Ökologische Bewertung gegenüber dem heutigen Stand der Technik

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von einer neuartigen Technologie gewesen, die es ermöglicht, Bipolarplatte aus Metall für Brennstoffzellen kostengünstig herzustellen. Es wurde einerseits ein Verfahren entwickelt, bei dem der elektrisch und thermisch leitfähige Teil der Bipolarplatte in einer 3-d-Druck-Form gepresst und dieses Bauteil im Stanzverfahren hergestellt wird.

Die hergestellte innovative Herstellmethode kann als Technologien zur Steigerung der Energieverwertung gesehen werden, also auch zur Verringerung klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen, zur Erhaltung der Biodiversität und zur Schonung von Ressourcen in ökonomisch und ökologisch relevanten Märkten.

In der Vergangenheit konnte das Wachstum des Bruttoinlandsprodukts vom Wachstum des Energieverbrauchs weitgehend entkoppelt werden [NPN12] Die Stromversorgung stellt mit 40 % einen deutlichen Anteil am Primärenergieverbrauchs (Stand 2009) dar. Daher hat die Effizienzsteigerung im Strombereich eine hohe Priorität für eine Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. In privaten Haushalten und in der Industrie konnten durch Einzeltechnologien (z.B. Waschmaschine) Stromeinsparungen realisiert werden. Demgegenüber stehen ein zunehmender Stromverbrauch durch die steigende Zahl von Elektrogeräten und deren intensive Nutzung von privaten Haushalten und die zunehmende Wertschöpfung der Industrie [NPN12].

Es besteht daher ein deutlicher Bedarf, den Energieverbrauch signifikant zu senken. Bis 2020 sollen mithilfe der erneuerbaren Energien 205 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr eingespart werden. Zudem sollen die erneuerbaren Energien im Jahr 2020 einen Anteil von 47 % an der Strom-erzeugung besitzen [URL13a].

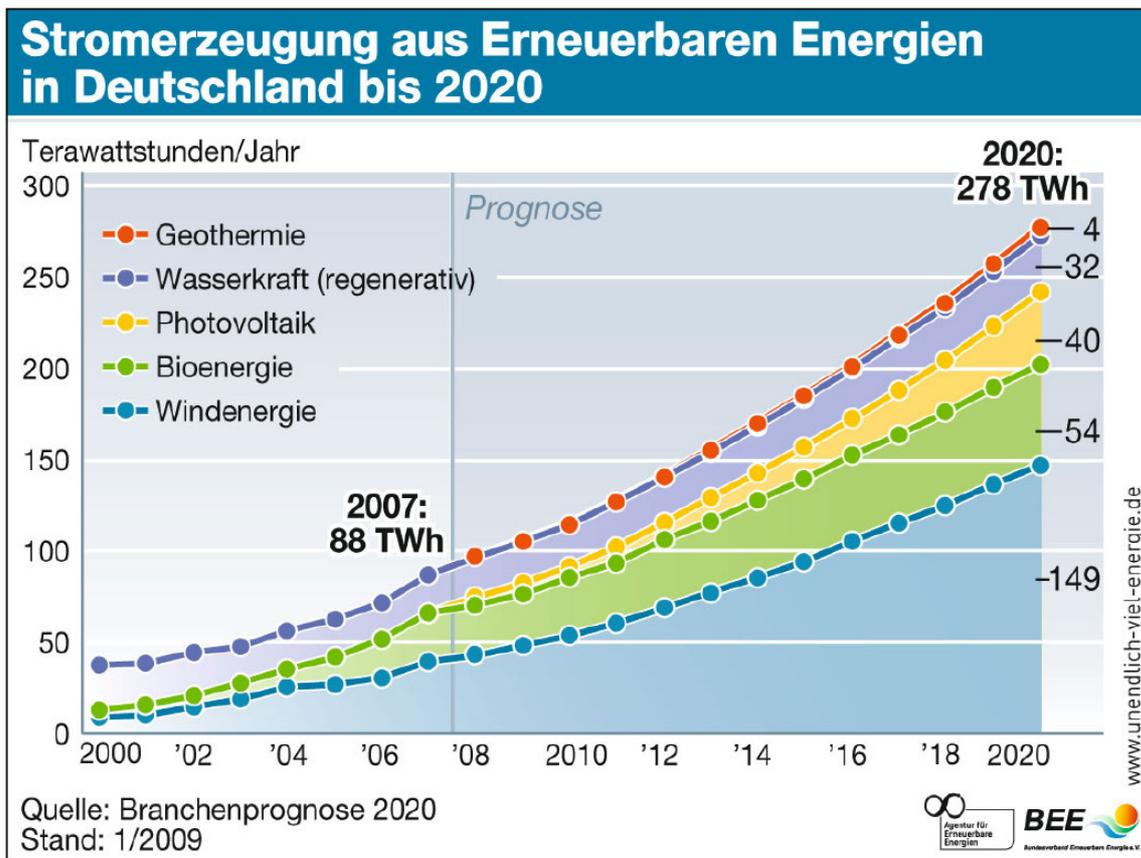


Abb 17: Entwicklung von Stromverbrauch und -erzeugung aus erneuerbaren Energien [URL13].

Durch den zunehmenden Anteil an erneuerbaren Energien können Importe von fossilen Energieträgern, wie Steinkohle oder Erdgas, mit einem Betrag 22,6 Mrd. Euro pro Jahr vermieden werden. Die Kosten zum Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor werden somit durch den Entlastungsbeitrag überkompensiert, sodass eine Gesamtentlastung von ca. 2,4 Mrd. Euro resultiert [URL13].

Beim derzeitigen Stand ist die energetische Nutzung von Biomasse als erneuerbare Energie begrenzt. Gasförmige chemische Energieträger (wie z.B. Wasserstoff und Methan) bieten hier die Möglichkeit, große Mengen Energie für viele verschiedene Sektoren nutzbar zu machen. Wasserstoff und Methan können mithilfe von erneuerbaren Energien als chemische Energiespeicher und -wandler produziert werden. Die Speicherkosten für standardmäßig eingesetzte Stromspeicher betragen zwischen 5 bis 10 Cent pro Kilowattstunde für Pumpspeicher und 23 bis 40 Cent pro Kilowattstunde für Druckluftspeicher. Wasserstoffspeicher liegen mit 25 Cent pro

Kilowattstunde derzeit und mit 10 Cent pro Kilowattstunde (in Zukunft) dazwischen [NPN12]. Zudem können entsprechend der Prognosen nach BMU [NPN12] Wasserstoff und Methan in Zukunft deutlich kostengünstiger als fossile Kraftstoffe produziert werden. Allerdings sind bei der Speicherung von fluktuierenden Energiequellen (z.B. Windkraft) durch Wasserstoff hohe Speicherkapazitäten und Wirkungsgrade von hoher Bedeutung. Pumpspeicherkraftwerke in Deutschland erzielen derzeit Wirkungsgrade von 80 % bei einer Erzeugungsleistung von 6200 Megawatt. Diese Werte sind mit Wasserstoffspeichern mit einem Wirkungsgrad von 40 % noch nicht realisierbar [NPN12].

Ein wichtiger Beitrag des Forschungsvorhabens ist es gewesen, bei der Herstellung der Platten einen signifikanten Beitrag zu leisten, den Energieverbrauch zu senken durch eine kostenoptimierte Herstellung der Betriebsmittel. Darüber hinaus können auch die Stückkosten für die Bipolarplatten für Brennstoffzellen gesenkt werden, da sich die Investkosten reduzieren. Somit konnte ein wichtiger Beitrag geleistet werden für eine höhere Akzeptanz der Technologie.

#### Möglichen Nutzungspotentiale der Entwicklung über das konkrete Projektthema hinaus

Neben der bereits geschilderten Technologie zur Herstellung von gestanzten Bipolarplatten ist es denkbar, dass die Technologie auch in anderen Feldern eingesetzt werden kann. Ein mögliches artverwandtes und energierelevantes Thema sind hierbei die Wärmetauscher-Anwendungen.

Im Bereich der Wärmetauscher dominieren bislang Lösungen auf Basis von metallischen Werkstoffen. Unterschiedliche Systeme kommen hierbei zum Einsatz. Auch hier ist es denkbar, insbesondere massgeschneiderte Lösungen zu realisieren, die es ermöglichen, speziell auf die Anwendung einen Wärmetauscher auszulegen und eine entsprechende Kleinserie zu produzieren. Insbesondere bei Kleinserien spielen die Werkzeugkosten eine signifikante Rolle, so dass die Gesamtkosten des System ebenfalls gesteigert werden können. Durch das potentiell neu entwickelte Design werden die genannten Technologien daher derart weiterentwickelt, dass sie aufgrund ihrer verbesserten Effizienz und ihrer Kostenstruktur in größerem Maße wirtschaftlich sinnvoll einsetzbar sind und damit z. B. wirtschaftlich darstellbare Energiespeicherung mit Rückverstromung sowie eine Verbesserung der Energieeffizienz ermöglichen.

## Fazit

Insgesamt ist das Vorhaben erfolgreich verlaufen. In Kurzzusammenfassung stellen sich die Ergebnisse wie folgt dar:

- Generell ist es möglich, mittels Prototypenformen Blechzellen herzustellen
- Die mechanischen Werte sind hinreichend, eine kleine Serie von Blechzellen herzustellen
- Ultem eignet sich als Ausgangsmaterial besser als ABS. Der Verschleiß bei ABS ist um ca. 230% höher als bei Ultem
- Die Qualität der Oberfläche und die Baustrategie müssen auf den Prozess abgestimmt werden, um möglichst homogene Oberfläche der Stanzwerkzeuge zu erhalten
- Die Blechzellen sind geeignet einen Stapel aufzubauen. Die Leistung liegt bezogen auf die Fläche bei einer Blechzelle bei ca. 470 mA/cm<sup>2</sup> bei 0,6 V Betriebsspannung. Eine vergleichbare Zelle mit einer graphitischen Platte hat eine Leistung von 290 mA/cm<sup>2</sup>
- Durch Beschichtung mit Gold kann die Leistung der metallischen Platte um ca. 10 % gesteigert werden auf ca. 520 mA/cm<sup>2</sup>
- Die Maximalleistung der Brennstoffzelle beträgt mit der unbeschichteten Platte 9,4 W, mit der goldbeschichteten Platte 11 W.
- Die neue kostengünstige Struktur ermöglicht es, Kosteneffizient Kleinserien für metallische Bipolarplatten herzustellen und damit einen Beitrag zur Ressourceneffizienz zu leisten
- Auch in anderen Anwendungen, wie beispielsweise bei Wärmetauschern ist der Einsatz der Technologie denkbar

## Literaturverzeichnis

[Geb13]– **Gebhardt, Andreas**. Generative Fertigungsverfahren. München: Carl Hanser Ver- lag, 2013

[Kle13] – **Dr. Klemp, Eric**. Additive Fertigungsverfahren. Vorlesungsunterlagen: Universität Paderborn, 2013

[Kai03]- **Kaiser, Wolfram** Entwicklung und Charakterisierung metallischer Bipolarplatten für PEM-Brennstoffzellen. Berlin. Logos Verlag, 2003

[Kak11]- **Kakati, Biraj Kr., u.a.** Carbon-polymer composite bipolar plate for PEM fuel cell. Guwahati. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011

[NPN12] **NITSCH, J.; PREGGER, T.; NAEGLER T.; HEIDE, D.; DE TENA, D.L; TRIEB, F.; SCHOLZ, Y.; NIENHAUS, K.; GERHARDT, N.; STERNER, M.; TROST, T.; VON OEHSEN, A.; SCHWIMM, R.; PAPE, C.; HAHN, H.; WICKERT, M.; WENZEL, B.**: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Abschlussbericht zum BMU-Vorhaben FKZ 03MAP146, 2012

[URL13] **N.N.**: Branchenprognose Stromversorgung 2020. URL: <http://www.bee-ev.de/Energieversorgung/Strom/Stromversorgung-2020.php>, 2013

[VAY01] – **Tsiplakides, Demitros, u.a.** Electrochemical Activation of Heterogeneous Catalysis: Promotion, Electrochemical Promotion and Metal-Support Interactions. New York Kluwer/Plenum Press, 2001

# Direct Manufacturing Research Center

*Annual Report 2015*



## Efficient manufacturing process for metal bipolar plates for use in fuel cells



Dominik Ahlers



In a fuel cell, the conversion of chemical energy from a fuel into electricity takes place. The chemical reaction between hydrogen ions with oxygen releases clean energy. For this functionality a fuel cell stack is constructed with several bipolar plates. Bipolar plates are the key component of the considered proton exchange membrane (PEM) fuel cells. The aim of the project "Efficient manufacturing process for metal bipolar plates for use in fuel cells" is to answer the question, if the Fused Deposition Modelling (FDM) process is suitable for the production of tool inserts (negative molds), which enables the production of finely textured metallic bipolar plates (BPP).

### Participating Partners and Funding

As an external project, the company Eisenhuth is a cooperation partner

and Volkswagen AG an associated partner. The project is funded by the DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt and led by Eisenhuth. The funding starts in Mai 2015 and ends in October 2016. Within this time several in-person meetings and teleconferences between the two cooperation partners were held and are planned regularly till the end of the project.

The project partner Eisenhuth has special experience in the fuel cell technology and in calculating, designing and manufacturing molds and dies for tooling and injection molding. The Volkswagen AG is well known as an innovative German automobile manufacturer and an end-user of such PEM fuel cells.

### Proceeding within the project

In a first step, the new BPP design was developed by Eisenhuth and the negative forms were constructed at the

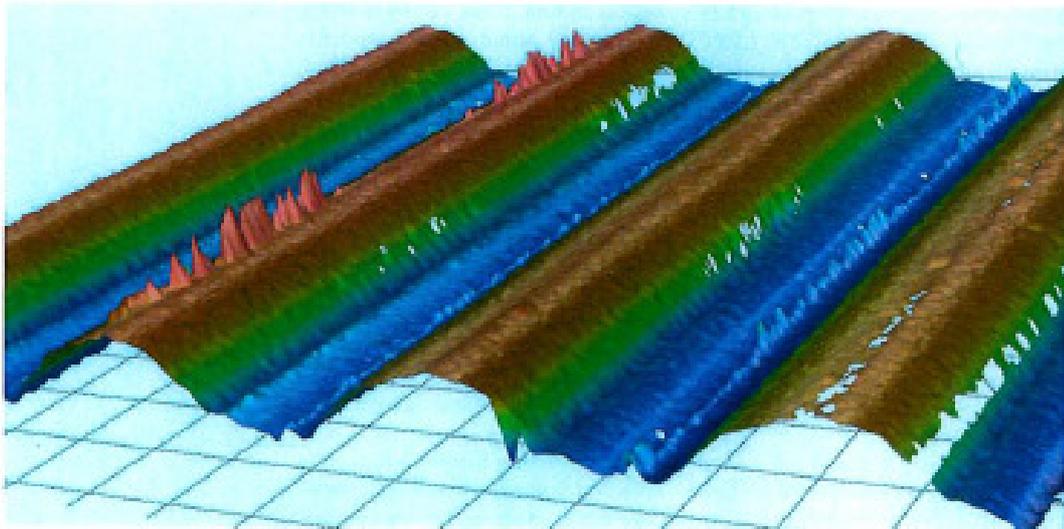


Figure 1 – Surface quality measurement of a metallic BPP with obvious measurement defects (reference macroscopic).

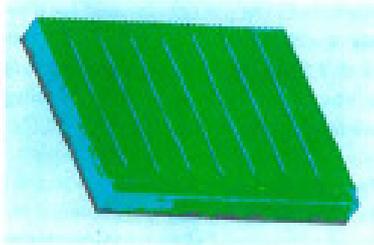


Figure 2 – Measurement of the manufacturing accuracy of the whole tool insert with the KolibriMulti System

DMRC with a particular attention to the interpretation of the finely structured hydrogen plenum (flow field). The requirements of the subsequent manufacturing steps take sufficient consideration already. Parallel to the described working steps, studies were carried out at the DMRC to identify a suitable thermoplastic material (ABS or ULTEM). Extensive testing with tactile and optical measurement systems (KolibriMulti, Keyence microscope and coordinate measurement machine) has been obtained at the best process settings for the FDM printing process. Focused parameters were orientation in the building chamber and tip diameter ( $T_{12}$ ,  $T_{16}$ ). Other interesting parameters for the design of the negative forms are the hardness, abrasion resistance and roughness of the used materials. In addition, the produced BPPs are exam-

ined in terms of their mechanical properties and their characteristics will be compared with other available BPPs on the market.

#### Aims of the Project

The main aim of this project is to answer the question if thermoplastic materials processed on a FDM machine are suitable for producing tool inserts with sufficient mechanical properties for an industrial application. The main focus is on tolerances and part quality. First on the negative forms and, as a result, especially on the final metallic BPP. The BPP has to fit exactly in the whole stack to enable the chemical reaction between the hydrogen and the oxygen. Once the final negative forms are manufactured and the BPPs are embossed, the project will be completed with the construction and commissioning of a test object and recording a current-voltage characteristic. The material characteristics and an attached cost analysis answers the question if ABS or ULTEM should be used for an industrial use case. As a final step, the test object will be examined at VW, where the suitability of the BPP will be tested.

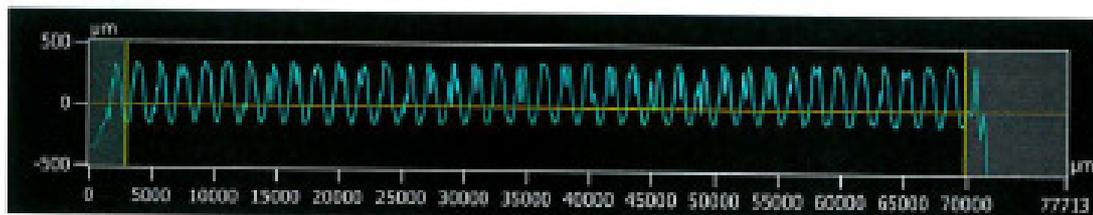


Figure 3 – Representation of the dimensional accuracy of the wave profile (Keyence microscope)

## Anhang 2: Veröffentlichungen Regio Nr 1/2016

### **3d-Druck im Werkzeugbau**

*Höhere Präzision durch 3-d-  
Druck für Kleinserien mittels  
innovativer Werkzeugeinsätze.*

Wenn es darum geht, hohe Präzision von Metallteilen zu erreichen, dann eignen sich spanabhebende Verfahren. Doch wenn die Stückzahlen steigen, wird das Fräsen und Bohren solcher Bauteile schnell unwirtschaftlich. Grund genug, neue Verfahren zu wählen: Zum einen bietet sich hier der 3-d-Druck an, zum anderen kann auf Metallspritzguß zurückgegriffen werden.

Insbesondere der 3-d-Druck bietet neue Potentiale im Hinblick auf Schnelligkeit und Genauigkeit. Die Osteroder Firma Eisenhuth kooperiert bei diesem Thema zusammen mit der Paderborner Direct Research Manufacturing Center (DMRC). Beide Einrichtungen arbeiten an der Verbesserung solcher Verfahren zur Implementierung von Beispielen in die Praxis.



In der Medizintechnik ist Präzision gefragt. Beim Fräsen und Bohren kleiner Bauteile bietet der 3-d-Druck neue Möglichkeiten im Hinblick auf Schnelligkeit und Genauigkeit.

So haben Eisenhuth und das DMRC neue Ansätze für das Hybrid-Moulding herausgearbeitet. Dabei geht es zunächst um Werkzeugeinsätze für das Umformen für Metallplatten für die Brennstoffzelle. Diese Idee wird später auch auf andere Technologien übertragen. Das Projekt wird gefördert von der Deutschen Bundesstiftung für Umwelt, wofür sich das Unternehmen Eisenhuth und das DMRC bedanken. ○ VT

[www.eisenhuth.de](http://www.eisenhuth.de)  
[dmrc.uni-paderborn.de](http://dmrc.uni-paderborn.de)

Quelle: Regio Ausgabe 1/2016.

Anhang 3: Veröffentlichungen Stahlformenbauer, Sept. 2016

Technischer Fachverlag Möller • Neustraße 163 • 42553 Velbert • Telefon: 02053/981250 • 33. Jahrgang • Sept./Okt. 2016

5/2016

# DER STAHLFORMENBAUER

G 11358

DRUCKGIESSWERKZEUGE    SPRITZGIESSWERKZEUGE    FUNKENEROSIONSTECHNIK



**Welo senkt Ihre Kosten**

## WELO – Ihr kompetenter Partner für die Funkenerosion

 Alle wollen Kosten senken – mit WELO Ersatzteilen können Sie es. Seit 1987 produzieren und vertreiben WELO Ersatz- und Verschleißteile für alle neuesten Erodiermaschinen. Langjährige Erfahrung und das Qualitätsdenken bei WELO gewähren Ihnen präzise Teile aus hochwertigem Material. Profitieren Sie von der Langlebigkeit unserer Produkte sowie der günstigen „just in time“-Lieferung. Qualität geliefert aus Deutschland.



→ AMB Stuttgart 13.-17.09.2016, Halle 7, Stand 7C58

Zertifiziert nach  
DIN EN ISO 9001

Welo Werkzeug- und Maschinenvertriebs-GmbH  
Wielalpenstraße 12, D-71272 Reutlingen, Germany, Telefon: +49 (0)7143/92 80-0, Fax: +49 (0)7143/92 80-40  
E-mail: sales@welo.com, Internet: www.welo.com

**WELO**  
EDM /  
www.welo.com

Artikel in Stahlformenbauer, Nr. 5/ 2016

# Neue Prototypen-Werkzeug-technologie für Bipolarplatten und Batteriekomponenten

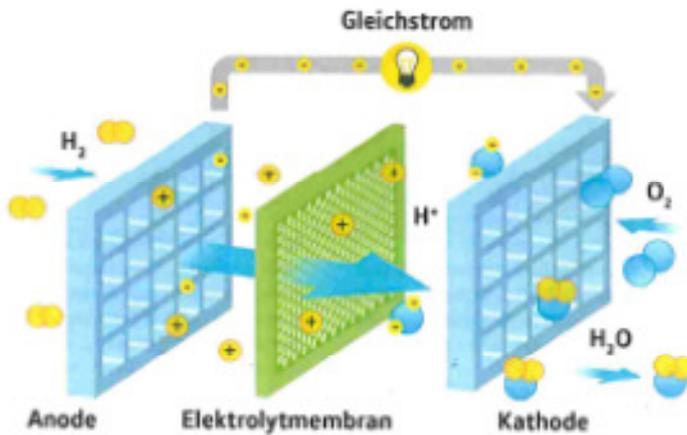


Bild 1:  
Aufbau und Funktion einer  
PEM-Brennstoffzelle (Volkswagen)

Der Begriff Elektromobilität ist verknüpft mit der Entwicklung umweltfreundlicher Energiespeicher und -wandler. Neben energiespeichernden Batteriesystemen stellt die Brennstoffzelle als chemischer Energiewandler ein vielversprechendes Konzept dar. Brennstoffzellen haben früh Anwendung in der Raumfahrt und bei U-Boot Antrieben gefunden, da dort Kosten eine geringe Rolle gespielt haben. Mittlerweile sind die hoch effizienten Energiewandler auch in der Hausenergieversorgung, in der Notstromversorgung und in weiteren ganz speziellen Anwendungen zu finden. Insbesondere die Automobilbranche zeigt Interesse an dieser Technologie. Die wohl bekannteste und am Häufigsten genutzte Variante ist die mit Wasserstoff und Sauerstoff betriebene Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Brennstoffzelle. In Bild 1 ist der Aufbau und die Funktionsweise

einer PEM-Brennstoffzelle dargestellt. In einfacher Weise wird das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle kurz erklärt. Der Brennstoff, in diesem Beispiel Wasserstoff wird an der Anode katalytisch unter Abgabe von Elektronen zu Wasserstoff-Ionen oxidiert. Diese „wandern“ durch die Membran. Dort reagieren die Wasserstoff-Ionen mit den an der Kathode entstandenen Sauerstoff-Ionen zu Wasser.

## Bipolarplatten

Um höhere Spannungen zu erhalten werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet und zu einem Stack (engl. „Stapel“) aufgebaut. Ein wichtiges strukturelles sowie funktionelles Element der Brennstoffzelle stellt die Bipolarplatte dar. Deren wesentliche Aufgaben bestehen darin, die Zellen voneinander stofflich zu trennen und andererseits den elektrischen Kontakt

zwischen zwei benachbarten Zellen zu gewährleisten. Weiterhin muss der Brennstoff Wasserstoff flächenmäßig sehr gut an der Katalysatorfläche verteilt werden und gleichzeitig das entstandene Wasser bzw. der Wasserdampf abgeführt werden. Des Weiteren dient die Bipolarplatte auch zur Abführung von Wärme. An diesen Kernaufgaben richten sich die Anforderungen an eine Bipolarplatte aus. Welche Eigenschaften sollte das Material mitbringen? Um nur einige Merkmale aufzuzählen, das Material muss leicht, elektrisch leitfähig, eine geringe Wärmekapazität aufweisen, gut verarbeitbar sein, eine hohe chemikalische Beständigkeit zeigen und u.a. kostengünstig sein. Traditionell findet entweder Graphit oder Metall mit seinen guten elektrischen Eigenschaften Anwendung bei der Herstellung von Bipolarplatten. Einen neuen Weg bei der Herstellung der Platten ist Eisenhuth

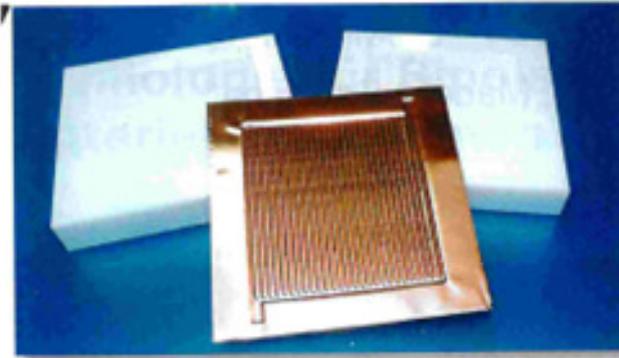


Bild 2:  
Mittels Rapid Tooling hergestelltes Gehäuse für eine Batteriekomponente

sätzen in Stanz-Biege-Prozesse lässt sich in kurzer Zeit ein Bauteil herstellen, das im gleichen Fertigungsverfahren mit nahezu identischen Eigenschaften hergestellt wird, wie das spätere Serienprodukt. Die sich daraus ergebenden Vorteile bestehen nicht nur in der Verkürzung der Entwicklungszeit, kombiniert mit dem frühzeitigen Erkennen von Fehlern, es können erhebliche Kosteneinsparungen erzielt werden. Dabei gilt die Regel, dass der Einsatz von Rapid Tooling um so erfolgreicher ist, je komplexer die Geometrie ist.

gegangen. Zusammen mit dem Direct Research Manufacturing Center (DMRC) der Universität Paderborn hat das Unternehmen im Rahmen eines durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes eine neue Stanz- und Biegetechnologie entwickelt, die es ermöglicht, sehr früh auch metallische Platten im Prägeverfahren herzustellen.

**Neuartige Werkzeugtechnologie im 3D-Druck**

Bislang wurden die Bipolarplatten und Batteriekomponenten in traditionellen Werkzeugeinsätzen über Stanz- und Prägewerkzeuge hergestellt. Aufgrund intensiver Zusammenarbeit zwischen dem DMRC und Eisenhuth können nun diese komplexen Geometrien auch im Rapid Tooling hergestellt werden. Aus den Entwicklungen der vergangenen Jahre zwischen dem DMRC und Eisenhuth haben sich die Anwendungen des Rapid Prototyping im Entwicklungsprozess durchgesetzt, wobei sowohl die Verbesserung der Prozesse, als auch neue Materialien zu dieser (rasanten) Entwicklung beigetragen haben. Mit diesem Verfahren lassen sich die Anforderungen an Werkzeuge verwirklichen und das in einer sehr kurzen Zeit. Anschließend kann die Form in ein Mutterwerkzeug

eingebaut und Stanzteile erstellt werden. Durch den Einsatz der additiv gefertigten Formen und Formein-



Bild 3:  
Die 3D-Drucker (Stratasys und Ultimaker)

(Werkbäder: Eisenhuth GmbH & Co. KG, Osterode am Harz)

Quelle: Stahlformenbauer, 05/2016

Anhang 4: Veröffentlichung: Der Stanz & Schnittwerkzeugbau, Okt. 2016

# Der Schnitt- & Stanzwerkzeugbau

G 10697

SCHNEIDERODIEREN    UMFORMEN    LASERN

Bordignons neue **2XC SX32** Gasdruckfeder:  
660 daN bei kompakten Abmessungen.



**2XC SX32: 4 MAL HÖHERE KRÄFTE**

**RUNTECH**    **XTECH**

Erfahrung und Know How aus 30 Jahren Bordignon Produktion und Entwicklung stecken in der neuen 2XC SX32. Dank Nanotechnologien RUNtech und Xtech und einer Anfangskraft von 660 daN ergeben sich hohe Standfestigkeit und Laufgeschwindigkeit bei verminderten Produktionsstillständen. Bis zu 4 mal höhere Kräfte im Vergleich zu ISO 11901 Nenngasdruckfedern mit Durchmesser 32 mm. Die 2XC SX32 ist die kompakteste und stärkste Gasdruckfeder am Markt.

Kreativität und Qualität – made in Italy –  
unser Können für Ihren Erfolg.



Bordignon Deutschlandvertretung  
**NVG** Normtalvertriebsgesellschaft mbH  
info@nvg.de - T +49 3721 275579  
www.stanztaetler.de

Besuchen Sie uns auf der EuroBLECH vom 29. bis 30. Oktober 2016, Halle 13 – Stand C58



Quelle: Der Schnitt- und Stanzwerkzeugbau, 05/2016

# Neue Prototypen-Werkzeug-technologie für Bipolarplatten und Batteriekomponenten

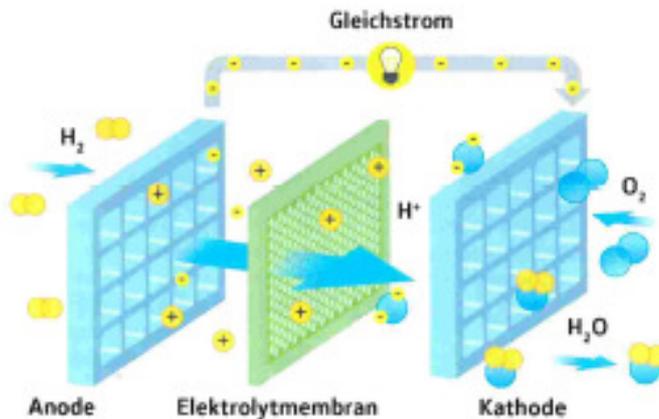


Bild 1: Aufbau und Funktion einer PEM-Brennstoffzelle (Volkswagen)

Der Begriff Elektromobilität ist verknüpft mit der Entwicklung umweltfreundlicher Energiespeicher und -wandler. Neben energiespeichernden Batteriesystemen stellt die Brennstoffzelle als chemischer Energiewandler ein vielversprechendes Konzept dar. Brennstoffzellen haben früh Anwendung in der Raumfahrt und bei U-Boot Antrieben gefunden, da dort Kosten eine geringe Rolle spielen. Mittlerweile sind die hoch effizienten Energiewandler auch in der Hausenergieversorgung,

in der Notstromversorgung und in weiteren ganz speziellen Anwendungen zu finden. Insbesondere die Automobilbranche zeigt Interesse an dieser Technologie. Die wohl bekannteste und am Häufigsten genutzte Variante ist die mit Wasserstoff und Sauerstoff betriebene Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)-Brennstoffzelle. In Bild 1 ist der Aufbau und die Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle dargestellt. In einfacher Weise wird das Funktionsprinzip der Brennstoff-

zelle kurz erklärt. Der Brennstoff, in diesem Beispiel Wasserstoff, wird an der Anode katalytisch unter Abgabe von Elektronen zu Wasserstoff-Ionen oxidiert. Diese „wandern“ durch die Membran. Dort reagieren die Wasserstoff-Ionen mit den an der Kathode entstandenen Sauerstoff-Ionen zu Wasser.

## Bipolarplatten

Um höhere Spannungen zu erhalten werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet und zu einem Stack (engl. „Stapel“) aufgebaut. Ein wichtiges strukturelles sowie funktionelles Element der Brennstoffzelle stellt die Bipolarplatte dar. Deren wesentliche Aufgaben bestehen darin, die Zellen voneinander stofflich zu trennen und andererseits den elektrischen Kontakt zwischen zwei benachbarten Zellen zu gewährleisten. Weiterhin muss der Brennstoff Wasserstoff flächenmäßig sehr gut an der Katalysatorfläche verteilt werden und gleichzeitig das entstandene Wasser bzw. der Wasserdampf abgeführt werden. Des Weiteren dient die Bipolarplatte auch zur Abführung von Wärme. An diesen Kernaufgaben richten sich die Anforderungen an eine Bipolarplatte aus. Welche Eigenschaften sollte das Material mitbringen? Um nur einige Merkmale aufzuzählen, das Material muss leicht, elektrisch leitfähig, eine geringe Wärmekapazität aufweisen, gut verarbeitbar sein, eine hohe chemikalische Beständigkeit zeigen und u.a. kostengünstig sein. Traditionell findet entweder Graphit oder Metall mit seinen

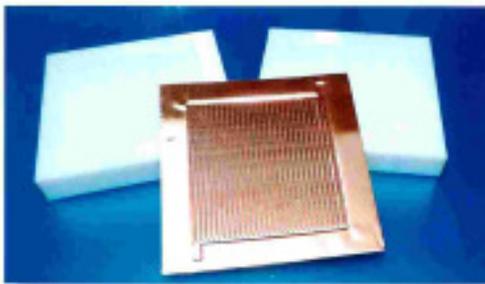


Bild 2: Mittels Rapid Tooling hergestelltes Gehäuse für eine Batteriekomponente (Werkbilder: Eisenhuth GmbH & Co. KG, Osterode am Harz)

guten elektrischen Eigenschaften Anwendung bei der Herstellung von Bipolarplatten. Einen neuen Weg bei der Herstellung der Platten ist Eisenhuth gegangen. Zusammen mit dem Direct Research Manufacturing Center (DMRC) der Universität Paderborn hat das Unternehmen im Rahmen eines durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes eine neue Stanz- und Biegetechnologie entwickelt, die es ermöglicht, sehr früh auch metallische Platten im Prägeverfahren herzustellen.

#### Neuartige Werkzeugtechnologie im 3D-Druck

Bislang wurden die Bipolarplatten und Batteriekomponenten in traditionellen Werkzeugeinsätzen über Stanz- und Prägwerkzeuge hergestellt. Aufgrund intensiver Zusammenarbeit zwischen dem



Bild 3: Die 3D-Drucker (Stratasys und Ultimaker)

www.techtag-moeller.de

DMRC und Eisenhuth können nun diese komplexen Geometrien auch im Rapid Tooling hergestellt werden. Aus den Entwicklungen der vergangenen Jahre zwischen dem DMRC und Eisenhuth haben sich die Anwendungen des Rapid Prototyping im Entwicklungsprozess durchgesetzt, wobei sowohl die Verbesserung der Prozesse, als auch neue Materialien zu dieser (rasanten) Entwicklung beigetragen haben.

Mit diesem Verfahren lassen sich die Anforderungen an Werkzeuge verwirklichen und das in einer sehr kurzen Zeit. Anschließend kann die Form in ein Mutterwerkzeug eingebaut und Stanzteile erstellt werden.

Durch den Einsatz der additiv gefertigten Formen und Formeinsätzen in Stanz-Biege-Prozesse lässt sich in kurzer Zeit ein Bauteil herstellen, das im gleichen Fertigungsverfahren mit nahezu identischen Eigenschaften hergestellt wird, wie das spätere Serienprodukt. Die sich daraus ergebenden Vorteile bestehen nicht nur in der Verkürzung der Entwicklungszeit, kombiniert mit dem frühzeitigen Erkennen von Fehlern, es können erhebliche Kosteneinsparungen erzielt werden. Dabei gilt die Regel, dass der Einsatz von Rapid Tooling um so erfolgreicher ist, je komplexer die Geometrie ist.

EUROBLECH Hannover | 29.-29.10.16 | Halle 11 / Stand E16

## Mehr Flexibilität.

Rein Käsen und Legern von Metall sind wir Technologieführer. Als kompetenter Partner schaffen wir Mehrwerte, die sich sehen lassen können.

Effizientes Arbeiten, wie Gehrungsschritte in der Metallverarbeitung, verlangt Maschinen, die vielseitig einsetzbar sind. So wie Kreis- und Bandsägen von KASTO. Sie sind die universellen Partner für Werkstattbetriebe. Für mehr Flexibilität in jedem Unternehmen.

**KASTO**  
Sägen. Legern. Mehr.

www.kasto.de

**PAUL HAFNER**  
WERKZEUGBAU

## UM LÄNGEN BESSER!

- ▶ Innovative Ideen
- ▶ Individuelle Konstruktionen
- ▶ Hochpräzise Lösungen
- ▶ Kompromisslose Qualität

PAUL HAFNER GmbH  
Werkzeugbau  
78669 Wellendingen  
Telefon +49 7425 6006-0  
paul-hafner.de

www.techtag-moeller.de