

IUTA

Name der Forschungsstelle(n)

225ZBG / 2

IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.09.2006 - 31.08.2009

Bewilligungszeitraum

## Schlussbericht für den Zeitraum : 01.09.2006 - 31.08.2009

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Entwicklung einer Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen zur verbesserten Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme und zur Erhöhung des damit gekoppelten Gesamtwirkungsgrads von PEM-BZ-Systemen.

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Duisburg, 30.11.2009

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

ZBT

Name der Forschungsstelle(n)

225ZBG / 2

IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.09.2006 - 31.08.2009

Bewilligungszeitraum

## Schlussbericht für den Zeitraum : 01.09.2006 - 31.08.2009

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

- Normalverfahren  
 Fördervariante ZUTECH

### Forschungsthema :

Entwicklung einer Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen zur verbesserten Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme und zur Erhöhung des damit gekoppelten Gesamtwirkungsgrads von PEM-BZ-Systemen.

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- ist beigefügt  
 liegt bereits vor  
 wird fristgerecht nachgereicht

Duisburg 16.12.2009

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

IWTT  
Name der Forschungsstelle(n)

225ZBG / 2  
IGF-Vorhaben-Nr. / GAG  
01.09.2006 - 31.08.2009  
Bewilligungszeitraum

**Schlussbericht für den Zeitraum : 01.09.2006 - 31.08.2009**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Entwicklung einer Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen zur verbesserten Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme und zur Erhöhung des damit gekoppelten Gesamtwirkungsgrads von PEM-BZ-Systemen.

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

ist beigefügt

liegt bereits vor

wird fristgerecht nachgereicht

Freiburg, 26. 11. 2009  
Ort, Datum

  
Unterschrift der/des Projektleiter(s)

# Dokumentationsblatt

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

Normalverfahren

Fördervariante ZUTECH

Umwelttechnik	225ZBG / 2
Name der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)	AiF- Vorhaben-Nr. / GAG
74.3	01.09.2006 - 31.08.2009
Wirtschaftszweig (WZ)	Bewilligungszeitraum
213	518.370,00 €
Aktenzeichen der MV	Summe der beantragten Zuwendung (bZ)

## Forschungsstelle(n) :

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA)  
Zentrum für Brennstoffzellen Technik gGmbH (ZBT)  
Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik (IWTT)

## Forschungsthema :

Entwicklung einer Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen zur verbesserten Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme und zur Erhöhung des damit gekoppelten Gesamtwirkungsgrads von PEM-BZ-Systemen

## Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten :

Entsprechend den Zielen des Forschungsvorhabens haben die drei beteiligten Forschungseinrichtungen eine Verdampfungskühlung für Niedertemperatur-PEM Brennstoffzellen entwickelt.

Die Ergebnisse des Projektes liefern eine Produktvorentwicklung, die die Potenziale und Anforderungen zu einem ausgereiften Stack-Modul mit integrierter Nutzwärmeauskopplung ermöglichen. Die Verdampfungskühlung ist prinzipiell auf alle unterschiedlichen Arten von Nieder- und Mitteltemperatur-Brennstoffzellen übertragbar und liefert einen Beitrag zur Erhöhung der Betriebssicherheit von Brennstoffzellensystemen.

Die entwickelte Verdampfertechnik wird, auch zur Übertragung in andere Anwendungen (z. B. als Hochleistungskühlung von Leistungselektronik in zukünftigen dieselektrischen Fahrzeugen), allen interessierten Anwendern, Forschern und Entwicklern zugänglich sein.

Neben den Innovationen auf dem Gebiet der PEM-Brennstoffzelle wurde mit diesem Vorhaben eine Methode zur Berechnung von Phasenübergängen in offenporösen Medien unter Berücksichtigung ihrer Anisotropie entwickelt.

Sowohl die entwickelten Modelle, als auch die gewonnenen Kenntnisse über die eingesetzten Materialien können auf viele technischen Anwendungen im Bereich des Heizens und Kühlens übertragen werden (z. B. Entwicklung neuartiger Solarkollektoren auf Basis von Metallschäumen, Entwicklung verbesserter Verdampfer in Kühleinrichtungen).

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

**Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse**

- |   |                                     |                                     |                                     |                                     |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|   | ja                                  | zum Teil                            | nein                                |                                     |
| 1. Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht  | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 2. Die Bedeutung der Forschungsergebnisse ist folgendermaßen einzuschätzen :  | hoch                                | mittel                              | gering                              | z.Zt. nicht absehbar                |
| • wissenschaftlich-technischer Nutzen   | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| • wirtschaftlicher Nutzen für KMU   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3. Die Forschungsergebnisse liefern einen innovativen Beitrag   |                                     |                                     |                                     |                                     |
| • zu einem neuen Produkt  | <input type="checkbox"/>            |                                     |                                     |                                     |
| • zur Weiterentwicklung eines Produkts  | <input checked="" type="checkbox"/> |                                     |                                     |                                     |
| • zu einem neuen Verfahren  | <input type="checkbox"/>            |                                     |                                     |                                     |
| • zur Weiterentwicklung eines Verfahrens  | <input checked="" type="checkbox"/> |                                     |                                     |                                     |
| 4. Eine industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse ist realisiert  | ja                                  | demnächst                           | nein                                | z.Zt. nicht absehbar                |
|   | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5. Eine weiterführende FuE kann in < 3 Jahren zur Innovation (z.B. Pilotanwendung) führen   | ja                                  | vielleicht                          | nein                                | z.Zt. nicht absehbar                |
|   | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            |
| 6. Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten gemäß Anlage 1  |                                     |                                     |                                     |                                     |
| 7. Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen gemäß Anlage 2  |                                     |                                     |                                     |                                     |
|   | ja                                  | demnächst                           | nein                                |                                     |
| 8. Die Forschungsergebnisse wurden in einer der entsprechend Abschnitt 3.6 des IGF-Leitfadens zulässigen Formen veröffentlicht  |                                     | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |
| <u>Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben:</u>  |                                     |                                     |                                     |                                     |
| 9. Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft enthält ausreichend beschriebene Maßnahmen zu folgenden Punkten:   |                                     | ja                                  | nein                                |                                     |
| • zum möglichen Umfang der industriellen Nutzung der Forschungsergebnisse   |                                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| • zur konkreten Umsetzung der Forschungsergebnisse in KMU   |                                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |
| 10. Die Darstellung der Maßnahmen im Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist ausreichend, um eine spätere Evaluierung der Forschungsergebnisse zu ermöglichen |                                     | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            |                                     |

Ort, Datum

Ort, Datum

oder

Rechtsverbindliche Unterschrift mit Stempelabdruck

der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)  
- Erstzuwendungsempfänger -des Leiters der Forschungsstelle (FSt)  
- Letztzuwendungsempfänger -

**Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten**

(Anlage 1 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Fachgebiete	Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Rohstoffe		
Werkstoffe, Materialien	X	
Chemie		
Verfahrenstechnik	X	
Lebensmitteltechnik, Bio-, Gentechnik		
Mikrobiologie, Hygiene		
Umwelttechnik		
Konstruktion		
Produktion		
Elektrotechnik, Mikrosystemtechnik, Medizintechnik		X
Mess-, Regel-, Automatisierungstechnik		X
Informations- und Kommunikationstechnik		
Betriebswirtschaft, Organisation		

**Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen****(Anlage 2 des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)**

Wirtschaftszweige		Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Abteilung	Kurzname		
10	Kohlenbergbau und Torfgewinnung		
15	Ernährungsgewerbe		
17/18	Textil- und Bekleidungsgewerbe		
19	Ledergewerbe		
20	Holzgewerbe		
21/22	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe		
23	Kokerei, Mineralölverarbeitung, Spalt- und Brutstoffe		
24	Chemische Industrie		
25	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren		
26	Glasgewerbe, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden		
27/28	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen	X	
29	Maschinenbau		
30/31/ 32/33	Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik		X
34/35	Fahrzeugbau		
36	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte u. sonstige Erzeugnisse		
40/41	Energie- und Wasserversorgung	X	
45	Baugewerbe		
60	Landverkehr, Transport		X
72/74	Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen		

## **Schlussbericht**

des IGF-Vorhaben  
225ZBG

### **Forschungsthema:**

Entwicklung einer Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen zur verbesserten Nutzung der anfallenden Niedertemperaturwärme und zur Erhöhung des damit gekoppelten Gesamtwirkungsgrads von PEM-BZ-Systemen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung und Zielstellung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Forschungsstelle IUTA</b>	<b>8</b>
3.1	Aufgaben und Vorbereitungen	8
3.1.1	Entwicklung des Verdampfungskühlungsteststands	9
3.1.2	Auswahl einer geeigneten Verdampfungsflüssigkeit	13
3.1.3	Auswahl der porösen Materialien	17
3.1.4	Untersuchte Bipolarhalbplatten	18
3.2	Beschreibung und Aufbau des Teststands	21
3.3	Durchführung der Versuche	25
3.4	Messergebnisse	28
3.5	Fazit	35
<b>4</b>	<b>Forschungsstelle ZBT</b>	<b>36</b>
4.1	Entwicklung & Konstruktion	36
4.1.1	Konzept 1 – Verwendung von porösen Medien	36
4.1.2	Konzept 2 – Kapillar-Verdampfungsstruktur	44
4.2	Spritzgießen verdampfungsgekühlter Bipolarplatten	49
4.3	Qualitätssicherung der Bipolarplatten	51
4.3.1	Widerstandsmessung	52
4.3.2	3D-Geometrie Messung	57
4.4	Stackaufbau	59
4.5	Versuchsdurchführung	60
4.5.1	Versuchsaufbau	60
4.5.2	Testlauf	63
4.6	Ergebnisse	63

4.6.1	Versuchsdurchlauf Kapillarstruktur	63
4.6.2	Versuchsdurchlauf Verdampfungskanäle mit Porenschaum	67
4.6.3	Versuchsdurchlauf Verdampfungskanäle ohne Porenschaum	70
4.6.4	Versuchsdurchlauf Verdampfungskanäle ohne Porenschaum mit Naturumlauf	74
4.7	Zusammenfassung & Ausblick	74
<b>5</b>	<b>Forschungsstelle IWTT</b>	<b>76</b>
5.1	Überblick	76
5.2	Untersuchungen der Materialeigenschaften	77
5.2.1	Geometrischer Aufbau	77
5.2.2	Permeabilität	79
5.2.3	Effektive Wärmeleitfähigkeit	81
5.3	Design der Kühlkanäle:	82
5.3.1	Erste Schritte:	82
5.3.2	Optimierung der Geometrie	86
5.3.3	Simulationen mit Zweiphasen-Strömung für die verbesserte Geometrie	89
5.3.4	Weitere geometrische Modelle:	94
5.4	Zusammenfassung und Ausblick:	96
5.5	Quellen	98

# 1 Zusammenfassung

Entsprechend den Zielen des Forschungsvorhabens haben die drei beteiligten Forschungseinrichtungen eine Verdampfungskühlung für Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen entwickelt. An der Forschungsstelle ZBT erfolgte dazu zunächst die Entwicklung eines Basisdesigns einer verdampfungsgekühlte Bipolarplatte. Dieses Basisdesign diente als Grundlage für die Entwicklung eines Simulationsmoduls an der Forschungsstelle IWTT, das es ermöglichte, die Zweiphasenströmungen und den Phasenwechsel des Kühlmediums innerhalb eines porösen Materials mit einer CFD-Software abzubilden.

Die experimentellen Untersuchungen an den im Verlauf des Vorhabens entwickelten verdampfungsgekühlten Bipolarplatten erfolgten an der Forschungsstelle IUTA. Dazu wurde am IUTA ein Versuchsstand konzipiert und aufgebaut, mit dem die verdampfungsgekühlten Bipolarplatten hinsichtlich ihrer Eignung quantitativ untersucht werden konnten. Des Weiteren erfolgten am IUTA die Auswahl geeigneter poröser Medien, welche in den Verdampfungskanälen der Bipolarplatten Wärmeübertragung und Kühlleistung verbessern sollten, sowie die Untersuchung zur Auswahl der am besten geeigneten Verdampfungsflüssigkeiten. Die geometrischen Eigenschaften der porösen Materialien, sowie deren Wärme- und Stofftransporteigenschaften, sind durch das IWTT ermittelt und in das CFD-Modell eingearbeitet worden.

In dem Vorhaben wurden zwei alternative Konzepte der Kühlmittelzirkulation untersucht, wobei aber, wie im Projektantrag vorgesehen, nur eine Entwicklungslinie fortgeführt werden sollte. Das Prinzip des Naturumlaufs durch Schwerkraft und Kapillarkräfte wurde nach ca. einem Jahr Entwicklungszeit von den beteiligten Forschungsstellen als im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht umsetzbar eingestuft und verworfen. Dementsprechend konzentrierten sich die Arbeiten auf die Entwicklung der Verdampfungskühlung nach dem Prinzip des Zwangsumlaufs.

Des Weiteren stand die Entwicklung eines Bipolarplatten-Design im Fokus, welches bereits eine feine Kapillarstruktur in der Platte besitzt, um so auf zusätzliche poröse Materialien verzichten zu können.

Nach Abschluss der Entwicklungsarbeiten am Plattendesign erfolgte am ZBT die Herstellung der ersten Bipolarplatten. Diese wurden am IUTA mit den

unterschiedlichen porösen Medien und Verdampfungsflüssigkeiten experimentell untersucht. Mit den gewonnenen experimentellen Daten konnte einerseits die Eignung des Plattendesigns und das Zusammenspiels Platte – poröses Medium – Verdampfungsflüssigkeit beurteilt werden, andererseits dienten die Daten der Verifizierung des am IWTT erstellten CFD-Modells. Die experimentellen Daten und die Daten der Simulationsrechnungen wurden am ZBT genutzt, um die Designs der Bipolarplatten zu optimieren.

Insgesamt wurden am IUTA drei verschiedene Designs von Bipolarplatten untersucht: Ein Design zur Einlage von porösen Medien, eine modifizierte Variante der wassergekühlten Bipolarplatte des ZBT, sowie eine Bipolarplatte mit einer Kapillarstruktur ohne ein poröses Medium. Als poröse Materialien kamen drei Metallschäume und zwei Kohlefaservliese zum Einsatz, die mit Wasser als auch mit Ethanol als Verdampfungsflüssigkeiten untersucht wurden. Die beste Kühlleistung hat eine Bipolarplatte mit einer Metallschaumeinlage mit Ethanol als Verdampfungsflüssigkeit erzielt.

Gegen Ende der Projektlaufzeit erfolgte am ZBT der Aufbau von drei Demonstrationsstacks. Mit diesen Stacks konnte die Umsetzung einer verdampfungsgekühlten PEM-Brennstoffzelle erfolgreich demonstriert werden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## 2 Einleitung und Zielstellung

Die Betriebstemperatur von PEM-Brennstoffzellen ist auf ca. 80°C begrenzt. Höhere Temperaturen führen zu einem lokalen Austrocknen der Membran, wodurch die elektrische Leitfähigkeit der Membran an diesen Stellen stark abnimmt. Dies hat im Wesentlichen eine Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades und der Zelleistung zur Konsequenz. Wesentlich kritischer jedoch sind die damit verbundenen lokalen Erhöhungen der Temperatur, die bis zu irreversiblen Schädigungen der Membran führen können.

Um den sicheren Betrieb zu gewährleisten, ist daher eine möglichst homogene Temperaturverteilung (quasi isotherm) auf der gesamten Oberfläche der Membran-Elektroden-Einheit (MEA) erforderlich.

Wäre die Stromdichte innerhalb einer PEM-BZ an jeder Stelle gleich hoch, wäre auch die abzuführende Wärme an jeder Stelle gleich hoch. Abhängig von der Strömungsführung von Wasserstoff und Luft sowie des Kühlmediums durch den PEM-Stack werden in der Praxis jedoch signifikante Unterschiede der lokalen Stromdichte und somit der Temperatur beobachtet. Da die Temperaturverteilung in der Zelle nicht völlig gleichmäßig ist, besteht insbesondere bei hohen Betriebstemperaturen nahe 80°C die Gefahr von irreversiblen Schädigungen der Membran durch lokale Überhitzungen, sog. Hot-spots. Daher beträgt z. B. die zulässige Kühlmittelaustrittstemperatur bei dem von der DLR untersuchten Brennstoffzellenstack der Fa. Nuvera max. 50°C.

Die oben dargestellten Zusammenhänge haben Auswirkungen auf die für den sicheren Betrieb zulässige Umgebungstemperatur und auf die Nutzbarkeit der aus dem PEM-Stack abzuführenden Wärme:

- Je höher die Umgebungstemperatur, umso größer wird der Aufwand zur Rückkühlung des Kühlmediums. Dies ist z. B. bei dem Betrieb von PEM-Brennstoffzellen-Systemen zum Fahrzeugantrieb in wärmeren Klimazonen der Fall. Bei hohen Außentemperaturen ist der Temperaturabstand zum Kühlmedium so gering, dass sehr große Wärmeübertragerflächen und sehr große Volumenströme erforderlich sind. Die dazu erforderlichen Gebläse führen zu einem hohen elektrischen Eigenbedarf und damit zu Wirkungsgradeinbußen.

- Zum optimalen Einsatz von PEM-BZ-Systemen in der Hausenergieversorgung ist es auf Grund von Hygienevorschriften erforderlich, Nutztemperaturen von über 60°C im Warmwasserspeicher zu erreichen. Bei den in der Entwicklung befindlichen PEM-Systemen sind diese Temperaturen nicht erreichbar.

Neben der direkten KWK-Nutzung zu Heizzwecken bietet eine verbesserte Wärmeauskopplung auch die Möglichkeit, die Wärme innerhalb von BZ-Gesamtsystemen, z. B. durch Einkopplung in ein Reformersystem, zur Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades zu nutzen.

Um eine maßgebliche Verbesserung der beiden dargestellten Nutzungseinschränkungen zu erreichen, bieten sich zwei unterschiedliche Lösungsansätze an:

- Weiterentwicklung von Hochtemperatur-Polymermembranbrennstoffzellen (< 200°C). Derzeit wird dieser Ansatz in der Grundlagenforschung verfolgt. Die Entwicklung geeigneter Membranen wird voraussichtlich noch einen langen Zeitraum in Anspruch nehmen, deren Erfolg und die Praxiseinführung heute auch noch nicht absehbar ist.
- Um die Nutzungseinschränkungen auf Basis heutiger PEM-BZs zu beseitigen, wird in diesem Vorhaben ein anderer technischer Ansatz zur Kühlung von PEM-BZs verfolgt: Der einfachste Weg zur Realisierung einer isothermen Wärmeabfuhr ist die Nutzung eines mit einer Energieaufnahme verbundenen Phasenwechsels des Kühlmediums, da dabei die abzuführende Wärme als latente Wärme von dem Medium aufgenommen wird.

Eine technisch sinnvolle Lösung stellt eine Verdampfungskühlung mit dem Phasenwechsel flüssig-gasförmig dar. Eine solche Kühlung erlaubt eine nahezu isotherme Betriebsweise des Stacks, da die Eintritts- und Austrittstemperatur des Kühlmediums im idealen Fall identisch sind. Die Verdampfungskühlung ist so auszulegen und zu konstruieren, dass sich das Kühlmedium an jeder Stelle im Stack und bei jedem möglichen Betriebszustand im Zweiphasengebiet, dem sog. Nassdampfgebiet, befindet. Dies ist wichtig, da im Stack lokal differierende Stromdichten und damit auch örtlich unterschiedlich hohe Wärmemengen vorherrschen, die durch die in dem Zweiphasengebiet immer vorhandene flüssige Phase des Kühlmediums isotherm abgeführt werden können.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben soll die Eignung der Verdampfungskühlung für den Betrieb von PEM-Stacks bei hohen Temperaturen (ca. 80°C) aufgezeigt werden. Sie bietet das Potenzial, eine homogene Temperaturverteilung im PEM-Stack unter Vermeidung von Hot-spots zu realisieren und damit einen langzeitstabilen Betrieb der Brennstoffzelle zu ermöglichen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung einer im PEM-BZ-Stack integrierten Verdampfungskühlung mit hoher Leistungsmodulation und deren Umsetzung in einer Musterlösung.

Das Forschungsvorhaben hat dabei die folgenden Entwicklungsschwerpunkte:

- Entwicklung eines dampfschlagfreien Verdampfers hoher Leistungsmodulation, der an die Bedürfnisse von PEM-BZs optimal angepasst ist und die Grundlage für eine spätere kostengünstige Fertigung legt.
- Entwicklung von Modellen des Wärmeübergangs beim Sieden in porösen Medien zur Auslegung und Konstruktion der Verdampfungskühlung in den PEM-BZs.
- Entwicklung eines verdampfungsgekühlten PEM-BZ-Stacks im Leistungsbereich von 200 Watt und Nachweis seiner Funktionsfähigkeit im Versuchsbetrieb.

## 3 Forschungsstelle IUTA

### 3.1 Aufgaben und Vorbereitungen

Die Hauptaufgaben der Forschungsstelle IUTA bei diesen Forschungsvorhaben bestanden zum Einem in der Auslegung, Konstruktion und Inbetriebnahme eines Teststandes zur Untersuchung von verdampfungsgekühlten Bipolarplatten und zum Anderen in der Durchführung der experimentellen Untersuchungen der Verdampfungskühlung in diesem Teststand mit unterschiedlichen porösen Medien und in der Auswertung der hierbei gewonnenen Daten.

Bei einem ersten Treffen der drei beteiligten Forschungsstellen wurde die genauere Vorgehensweise und Umsetzung der Arbeitspakete in diesem Projekt festgelegt. Dazu gehörte auch die Festlegung der Randbedingungen für die am IUTA aufzubauende Testapparatur. Der Teststand musste die Möglichkeit bieten, die Verdampfung des Kühlmediums in einer porösen Struktur, die in der Bipolarplatte eingearbeitet ist, genau zu vermessen. Grundlage für die Entwicklung der Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen bildete die bereits am Zentrum für Brennstoffzellentechnologie (ZBT) entwickelten wassergekühlten Brennstoffzellen. Die aus einem Graphit-Compound entwickelten Bipolarplatten dieses Brennstoffzellentyps wurden für die Verwendung mit der Verdampfungskühlung modifiziert und weiterentwickelt. Die verwendeten Bipolarplatten bestehen aus zwei einzelnen Hälften, in denen sich ein poröses Material einlegen lässt. Das poröse Material dient dazu, den Wärmeübergang von der Bipolarplatte auf die Verdampfungsflüssigkeit zu verbessern, aber auch, um eine dampfschlagfreie Verdampfung zu ermöglichen. Die äußeren Abmessungen der Bipolarplatte blieben erhalten und es wurden die in der Platte vorhandenen Strukturen geändert.

Bei dem Treffen sind die folgenden Randbedingungen für den Betrieb einer Einzelzelle festgelegt worden, die bei der Entwicklung des Teststands berücksichtigt werden mussten:

- Abmessungen Bipolarplatte: 137,5 x 62 x 4 mm
- thermische Leistung pro Zelle: 25 – 40 W
- Zelltemperatur: 75 – 85 °C

### 3.1.1 Entwicklung des Verdampfungskühlungsteststands

Mit den oben genannten Vorgaben ist am IUTA zunächst ein Konzept für den Aufbau eines Teststands entwickelt worden. Der Aufbau des Teststands wurde dabei so flexibel gestaltet, dass unterschiedliche poröse Materialien und unterschiedliche Verdampfungsflüssigkeiten untersucht werden konnten. Abbildung 3.1 zeigt eine Skizze des Versuchsaufbaus. Der Versuchstand bestand im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten, einem Vorratsbehälter für die Verdampfungsflüssigkeit, einem temperierbarem Kondensationsbehälter, in dem der Kühlmitteldampf wieder kondensierte, und der eigentlichen Testkammer. Die Testkammer bildete das Kernstück der gesamten Versuchsanordnung und war so aufgebaut, dass darin die Bipolarhalbplatten mit unterschiedlichen porösen Materialien vermessen werden konnten. Die Testkammer selbst wurde nach Vorgaben des IUTA von der Firma *adrop* gefertigt, welche auf die Entwicklung von Verdampfern und Feuchtegeneratoren spezialisiert ist.

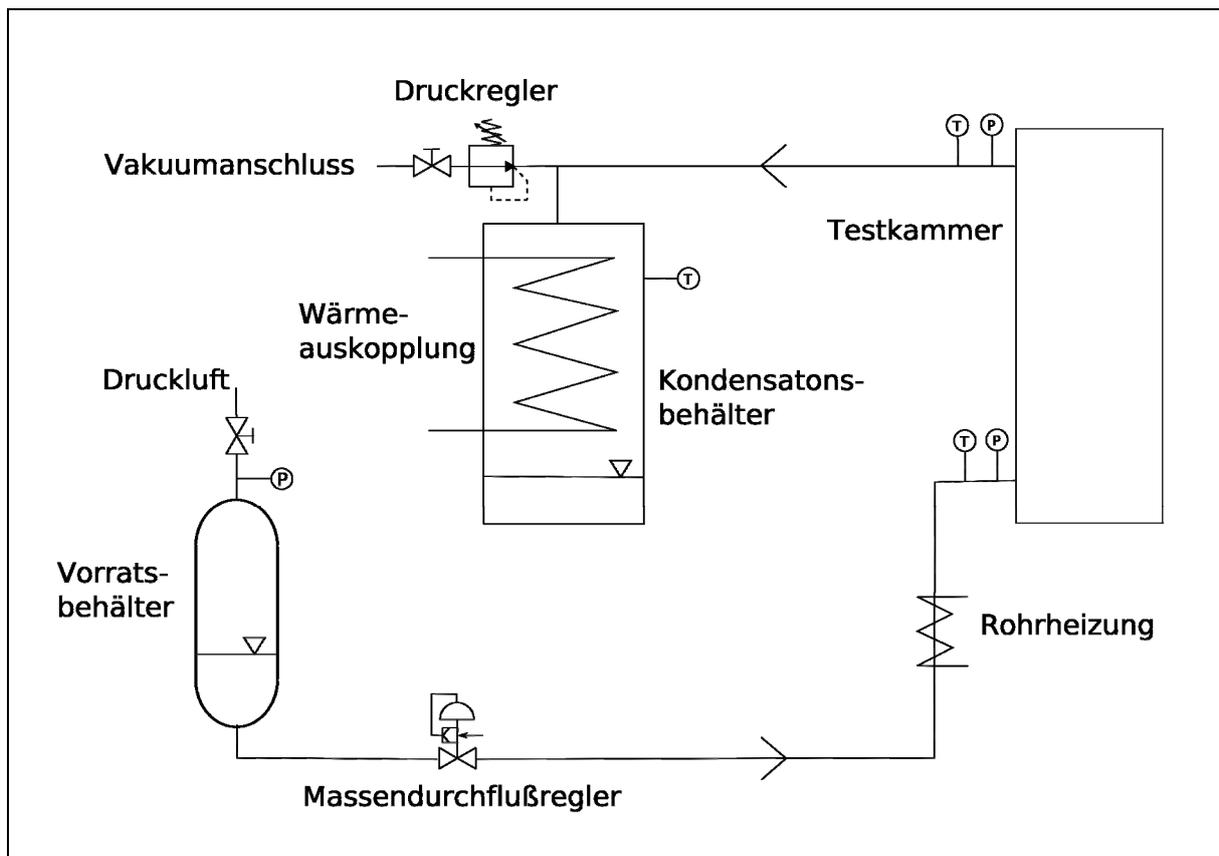
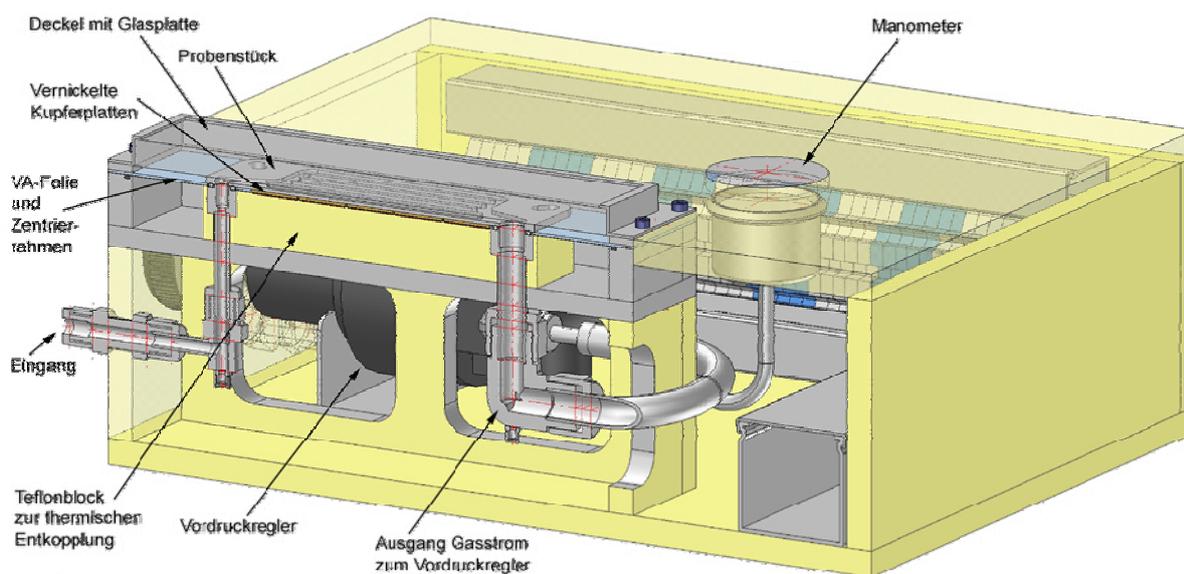


Abbildung 3.1: Skizze des Versuchsaufbaus

Die folgenden Kriterien lagen der Entwicklung der Testkammer zu Grunde:

Die Testkammer musste die Möglichkeit bieten, verschiedene Bipolarplatten mit den Abmessungen 137,5 x 62 x 4 mm an der Rückseite mit fünf Heizelementen (z.B. HR5595R19.2L12A von Minco) auf eine Temperatur zwischen 60 und 120 °C zu erwärmen. Die aktive Heizfläche betrug 50 mm x 100 mm. Die Heizelemente mussten für eine Betriebsspannung von 24 VDC ausgelegt und einzeln regelbar sein. Die Leistung eines einzelnen Heizelements wurde mit 30 W spezifiziert, was eine Gesamtleistung der Testkammer von 150 W ergab. Die Elemente mussten auf einer wärme isolierenden Trägerplatte mit einer möglichst geringen Wärmeleitfähigkeit (z. B. Keraflex) montiert sein. Um eine gegenseitige Beeinflussung der Elemente zu verhindern, mussten die Elemente jeweils durch einen kleinen Spalt (1mm) voneinander getrennt sein.

Die Abdeckung der Oberseite der Bipolarplatte musste aus einem durchsichtigen Material bestehen, um den Verdampfungsprozess visuell beobachten zu können und um Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera zu ermöglichen. Zwischen der Abdeckung und der Oberseite der Bipolarplatte bestand die Möglichkeit porösen Medien zu platzieren, in welchem ein Kühlmedium zum Verdampfen gebracht wurde.



**Abbildung 3.2:** Querschnitt der Testkammer

Um die Verdampfungstemperatur in einem weiten Feld frei vorwählen zu können, musste sich der Druck im Kühlmittelkreislauf zwischen 0,5 und 2,5 bar absolut einstellen lassen. Der Eintritts- und der Austrittspunkt der Bipolarplatte waren mit Temperatur- und Drucksensoren ausgestattet. Eine zusätzliche Heizung innerhalb der Kammer verhinderte ein vorzeitiges Kondensieren des Kühlmitteldampfes in den Rohrleitungen. Um die Wärmeverluste in der Kammer zu minimieren, war die gesamte Kammer mit einer Isolierschicht ausgestattet. Des Weiteren mussten sich alle Messwerte und Regelorgane der Testkammer über Rechner auslesen und steuern lassen. Abbildung 3.2. zeigt eine Querschnittszeichnung der von *adrop* gefertigten Testkammer.

Weiterhin war für den Versuchsstand ein Kondensationsbehälter für das Rückkondensieren des Kühlmitteldampfs erforderlich. Ein solcher Behälter, wie er für den Versuchsaufbau benötigt wurde, war in der erforderlichen Leistungsgröße nicht auf dem Markt verfügbar. Daher wurde von IUTA für diesen Zweck ein geeigneter Behälter (s. Abbildung 3.3) konstruiert.

Für die Regelung des Verdampfungsmediums wurde ein Regler nach dem Coriolis-Prinzip gewählt, da Untersuchungen mit unterschiedlichen Verdampfungsflüssigkeiten durchgeführt werden sollten. Diese messen direkt die Masse eines Fluids und arbeiten unabhängig von Temperatur und Dichte. Übliche Durchflussregler nach dem thermischen Messprinzip sind nur für eine bestimmte Substanz kalibriert und waren daher nicht geeignet.

Bei allen weiteren für den Versuchsaufbau benötigten Komponenten handelte es sich um Standardkomponenten. In Kapitel 3.2 ist der Versuchstand detailliert beschrieben.

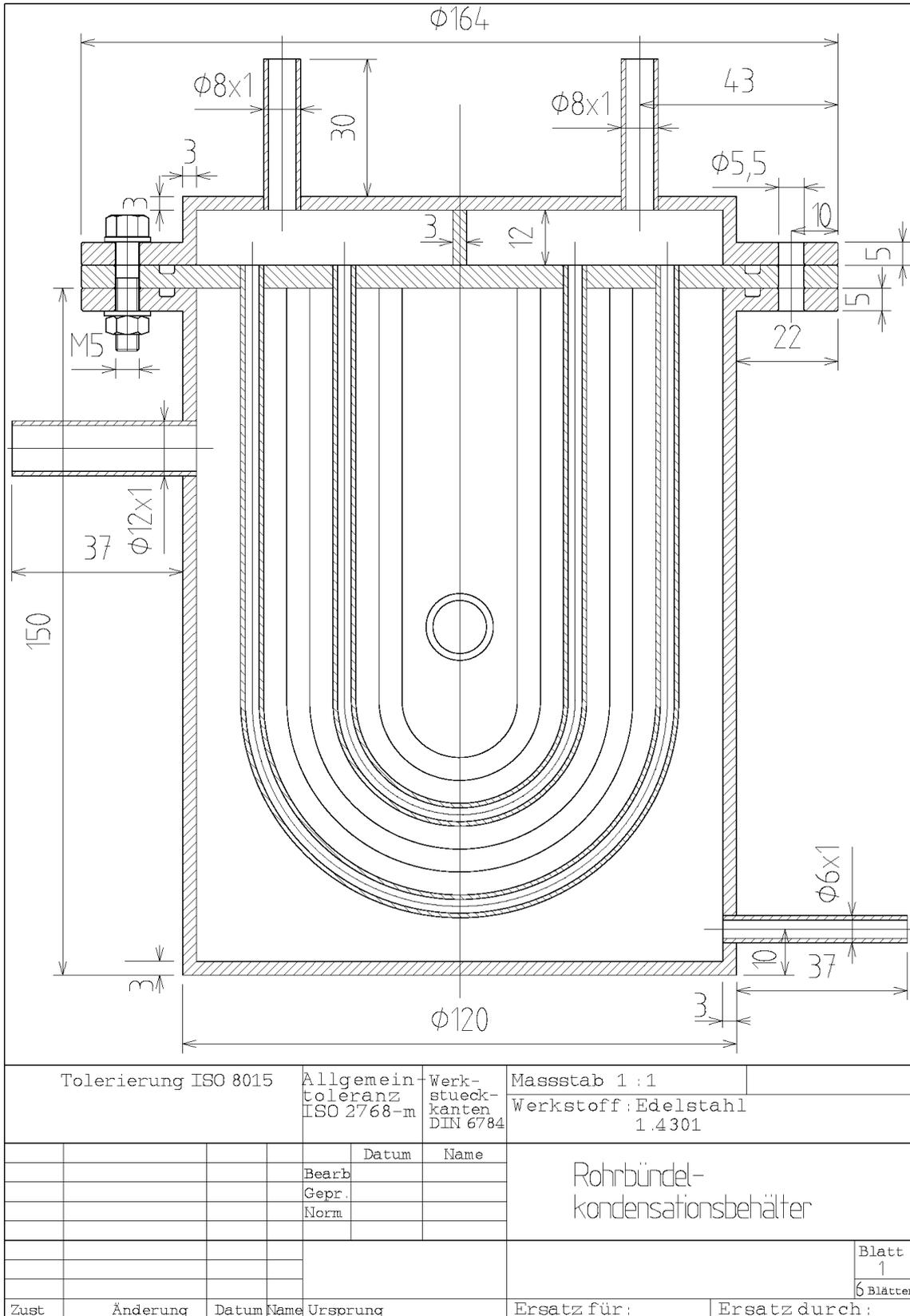


Abbildung 3.3: Konstruktionszeichnung des Kondensationsbehälter

### 3.1.2 Auswahl einer geeigneten Verdampfungsflüssigkeit

Durch die Festlegung der thermodynamischen Randbedingungen konnte nun ein geeignetes Verdampfungsmedium ausgewählt werden. Das Verdampfungsmedium sollte dabei möglichst viele der folgenden Eigenschaften besitzen:

- Verdampfungstemperatur bei Normaldruck nahe an der Betriebstemperatur
- Geringe elektrische Leitfähigkeit
- Chemisch stabil
- Hohe spezifische Verdampfungsenthalpie
- Geringer Anschaffungspreis
- Nicht toxisch
- umweltverträglich
- Keine korrosiven Eigenschaften mit den im Stack verwendeten Materialien

An Hand dieser Spezifikationen wurde die Auswahl auf sechs Medien eingegrenzt. Eine Übersicht über die wichtigsten Eigenschaften dieser sechs Medien gibt Tabelle 3.1 wieder.

**Tabelle 3.1:** Eigenschaften der ausgewählten Verdampfungsflüssigkeiten unter Normbedingungen

Verdampfungs- medium	Siedepunkt [°C]	Verdampfungsenthalpie [kJ/kg]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Preis
Wasser	100	2243	998	Niedrig
Methanol	65	729	787	Mittel
Ethanol	78	454	789	Mittel
HFE-7100	61	112	1494	Hoch
HFE-7200	72	119	1420	Hoch
HFE-7500	130	88	1610	Hoch

Bei den drei letztgenannten Flüssigkeiten handelt es sich um spezielle „Engineered Fluids“ der Fa. 3M™, die hauptsächlich in der Elektronikindustrie als Kühl- und Waschflüssigkeiten zum Einsatz kommen. Sie besitzen gute Eigenschaften bezüglich den Anforderungen als Verdampfungsmedium, sind jedoch in der Anschaffung relativ teuer.

Deionisiertes Wasser weist ebenfalls die erforderlichen Eigenschaften auf und besitzt vor allem auch eine sehr hohe Verdampfungsenthalpie. Beim Einsatz von Wasser treten jedoch je nach Material Korrosionseffekte auf. Es musste daher im Einzelnen geprüft werden, welche Materialkombinationen von Metallenschäumen und Wasser geeignet sind und welche nicht.

Die Alkohole Methanol und Ethanol liegen mit ihren thermodynamischen Eigenschaften etwa im Mittelfeld. Grundsätzlich sind sie als Kühlflüssigkeiten geeignet, sie haben jedoch die nicht erwünschte Eigenschaft der Brennbarkeit.

Keines der hier genannten Kühlmedien bereitet Probleme bezüglich der Verträglichkeit mit dem Material der Bipolarplatten. Von Seiten des ZBT wurden schon umfangreiche Untersuchungen zur Verträglichkeit der Bipolarplatten mit den verschiedenen Lösungsmitteln durchgeführt, so dass hier keine Probleme zu erwarten sind.

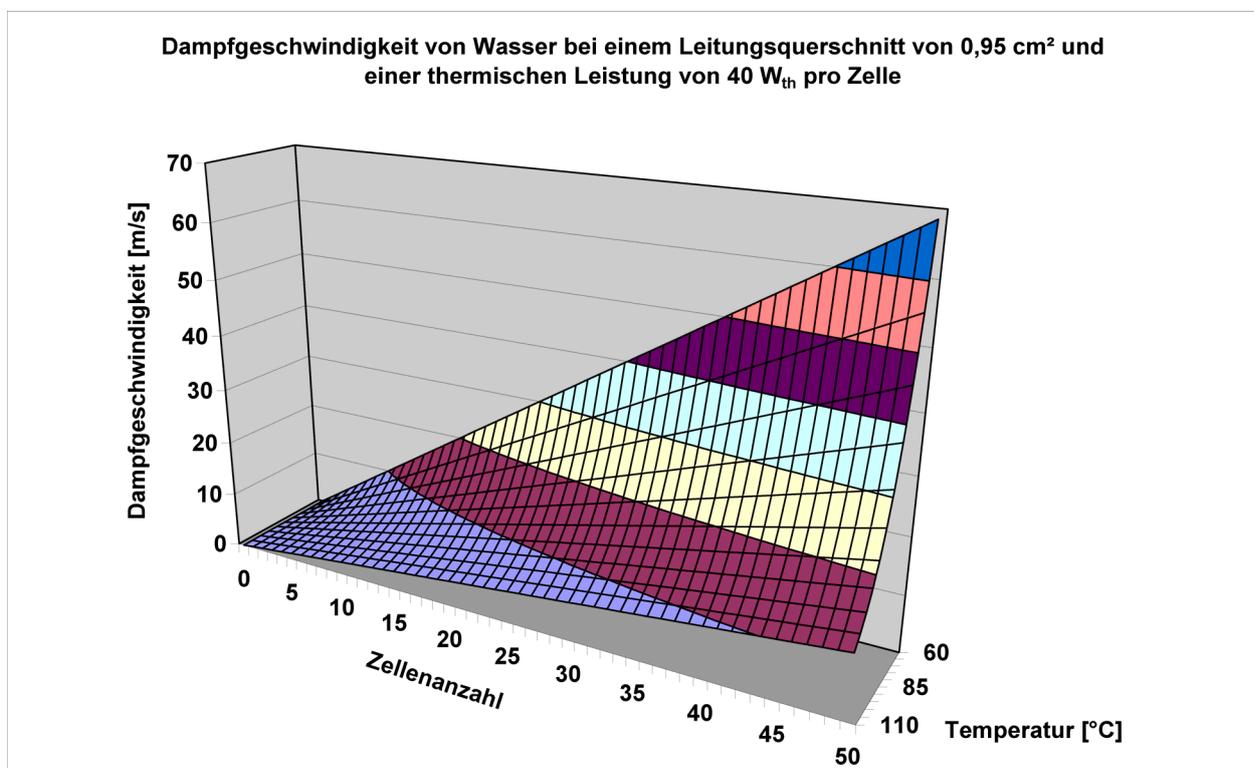
Um den Kühlmittelmassenstrom möglichst gering halten zu können, sollte das verwendete Medium eine möglichst hohe Verdampfungsenthalpie besitzen. Bei Wasser beträgt der Massenstrom für eine 40 W Zelle bei 80 °C Betriebstemperatur ca. 0,062 kg/h, bei Ethanol sind es 0,31 kg/h und für HFE-7200, auf Grund der wesentlich niedrigeren Verdampfungsenthalpie, 1,3 kg/h. Für die Volumenströme sieht es ähnlich aus. Durch die unterschiedlichen Dichten der Medien relativiert sich das Verhältnis nur leicht. In Tabelle 3.2 sind die Massen- und Volumenströme der Kühlmedien zusammengefasst. Diese Werte gelten für eine Betriebstemperatur der Zelle von 80 °C und dem zu dem jeweiligen Medium zugehörigen Sättigungsdampfdruck.

**Tabelle 3.2:** Massen- und Volumenströme der Medien bei 80°C Betriebstemperatur

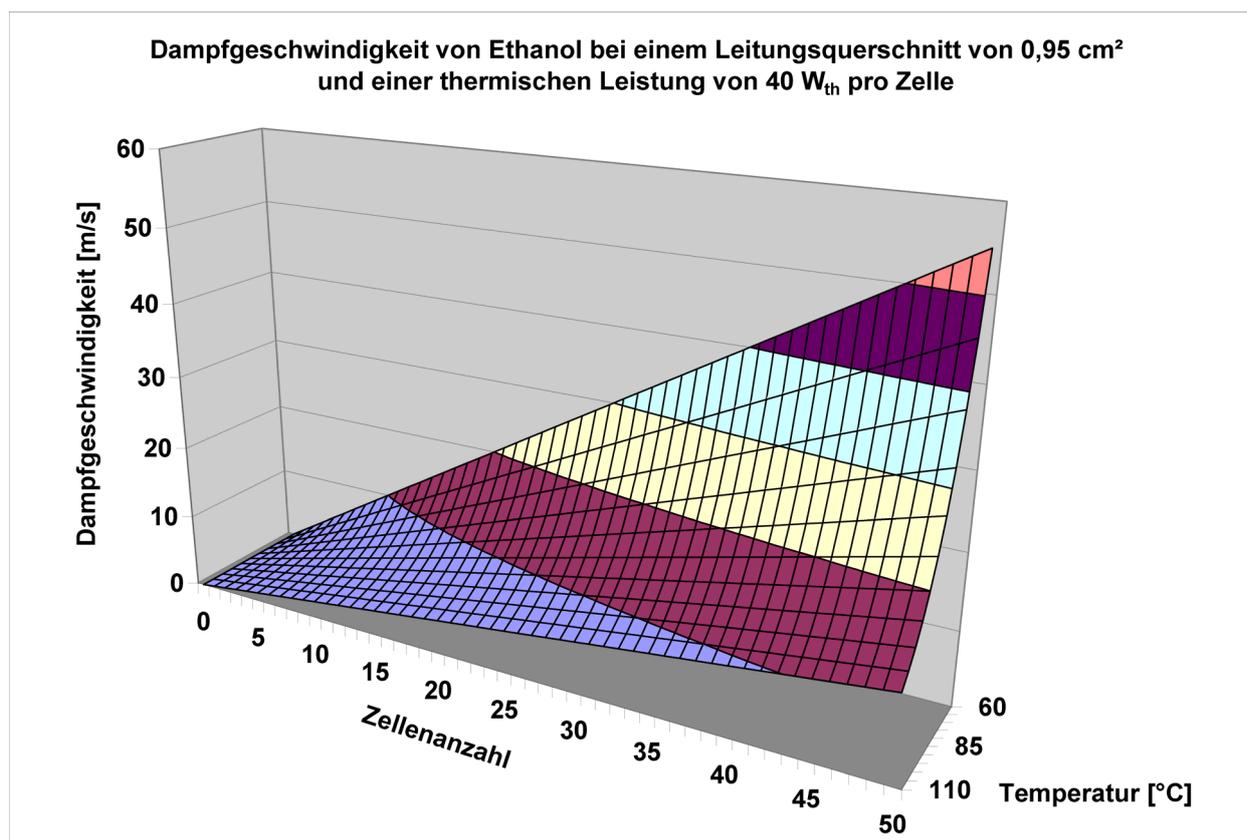
Verdampfungsmedium	Massenstrom [kg/h]	Volumenstrom (flüssig) [m <sup>3</sup> /h]	Volumenstrom (Dampf) [m <sup>3</sup> /h]
Wasser	0,062	0,065*10 <sup>-3</sup>	0,21
Methanol	0,21	0,28*10 <sup>-3</sup>	0,11
Ethanol	0,31	0,4*10 <sup>-3</sup>	0,19
HFE-7100	1,38	1,05*10 <sup>-3</sup>	0,075
HFE-7200	1,30	1*10 <sup>-3</sup>	0,12
HFE-7500	1,71	1,1*10 <sup>-3</sup>	n.b.

Ein weiterer Aspekt, der beachtet werden muss, ist die maximale Dampfgeschwindigkeit in dem Sammelkanal. Da der Kühlmitteldampf eines Stack durch eine einzige Sammelleitung abgeführt wird, addieren sich dort die Dampfvolumenströme aus den Einzelzellen.

Der Durchmesser der Sammelleitung in der Bipolarplatte ist konstruktiv bedingt auf ca. 11 mm begrenzt, was einer Querschnittsfläche von  $0,95 \text{ cm}^2$  entspricht. Um größere Druckverluste in dem Sammelkanal zu vermeiden, darf die Dampfgeschwindigkeit nicht größer als etwa  $1/10 \text{ Ma}$  werden. Die Schallgeschwindigkeit  $\text{Ma}$  ist eine Funktion des Isentropenexponenten, des Drucks und der Dichte des Mediums. Je nach gewähltem Kühlmedium und Betriebstemperatur ergeben sich somit unterschiedliche maximale Dampfgeschwindigkeiten im Sammelkanal. Für Wasser beträgt z. B. die Schallgeschwindigkeit bei  $80^\circ\text{C}$  und dem dazugehörigen Sättigungsdruck ca.  $461 \text{ m/s}$  und für Ethanol bei gleicher Temperatur  $226 \text{ m/s}$ . In den Abbildungen 3.4 und 3.5 sind die Dampfgeschwindigkeiten von Wasser und Ethanol in einem Kanal mit einem Querschnitt von  $0,95 \text{ cm}^2$  für verschiedene Temperaturen und Zellanzahlen aufgetragen.



**Abbildung 3.4:** Geschwindigkeit von Wasserdampf in einem Kanal mit  $0,95 \text{ cm}^2$  Querschnitt

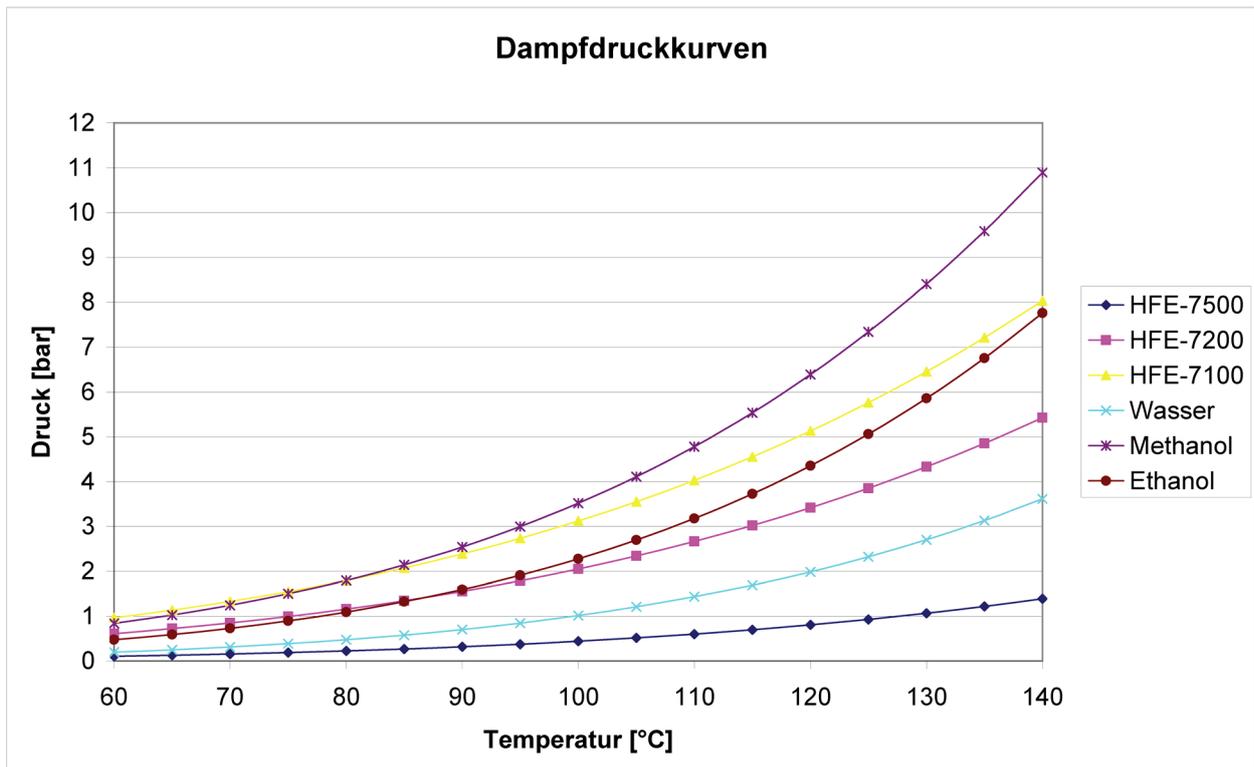


**Abbildung 3.5:** Geschwindigkeit von Ethanoldampf in einem Kanal mit 0,95 cm<sup>2</sup> Querschnitt

Wie aus den Abbildungen zu ersehen, liegen die Dampfgeschwindigkeiten bei einem Stack mit bis zu 20 Zellen, wie er im Rahmen dieses Projektes geplant ist, unterhalb dieser Grenze.

Um Dichtigkeitsproblemen in der gesamten Kühlanlage vorzubeugen, musste die Druckdifferenzen zwischen dem System und der Umgebung möglichst gering gehalten werden. Daraus folgte, dass das Kühlmedium einen Siedepunkt bei Atmosphärendruck besitzen muss, der nahe der Betriebstemperatur der Zelle liegt. Abbildung 3.6 zeigt die Dampfdruckkurven der Flüssigkeiten über der Temperatur aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass für den gewählten Betriebstemperaturbereich der Brennstoffzelle von 75 bis 85 °C Ethanol und HFE-7200 die am Besten geeigneten Medien sind, da ihre Verdampfungsdrücke dem des Umgebungsdrucks von 1 bar am Nächsten liegen.

Die Engineered Fluids von 3M sind bei den Versuchen nicht berücksichtigt worden, da ihr Preis von ca. 150 € pro Liter nicht mit dem Ziel einer kostengünstigen Serienlösung der Verdampfungskühlung vereinbar ist.



**Abbildung 3.6:** Dampfdruckkurven der in Frage kommenden Verdampfungsflüssigkeiten (Quelle: NIST Chemistry Webbook, 3M)

### 3.1.3 Auswahl der porösen Materialien

Die Auswahl eines geeigneten porösen Metallschaums oder Vlies, welches in die Bipolarplatte eingelegt wird, ist entscheidend für Effizienz der Verdampfungskühlung. Sie sorgt dafür, dass durch eine möglichst große Kontaktfläche ein guter Wärmetransport von der Platte zur Verdampfungsflüssigkeit gewährleistet wird.

Für die Versuchsreihen sind drei Metallschäume sowie zwei Vliese (s. Abbildung 3.7) ausgewählt worden, die mit der Verdampfungskühlung getestet werden sollten. Es handelte sich dabei um einen Nickelschaum (1) von *Inco* mit einer sehr feinen Porenstruktur und zwei Aluminiumschäumen (2 und 3) von *m-pore*.

Als Ausgangsmaterial für den Nickelschaum diente ein 2,5 mm dicker Schaum von *Inco*, der je nach Strukturtiefe der verwendeten Bipolarplatte auf die gewünschte Dicke komprimiert wurde.

Die Aluminiumschäume von *m-pore* wurden aus einem offenporigen Ausgangsmaterial durch Verpressen hergestellt. Er lag in zwei unterschiedlichen Varianten vor. Zum Einem wurde ein 5 mm Schaum und zum Anderen ein 10 mm dicker Schaumstück auf 1,5 mm zusammengepresst.

Bei den Vlieswerkstoffen handelte es sich um ein Kohlefasern. Material 4 stammte von *Freudenberg* und Material 5 von *Frenzelit*. Sie unterschieden sich in der der Dicke des Materials und in der Art der Herstellung.



**Abbildung 3.7:** Für die Verdampfungskühlung vorgesehene poröse Materialien

### 3.1.4 Untersuchte Bipolarhalbplatten

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die im Rahmen des Projekts untersuchten Bipolarhalbplatten. Die genaue Entwicklung und Fertigung der Bipolarplatten für die Verdampfungskühlung ist in den Kapiteln 4.1, 4.2 und 4.3 beschrieben.

Die erste Generation von Platten ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Diese Platten mit einer Dicke von 4 mm sind aus einem vollkommen unstrukturierten Rohling hergestellt worden. Die Nuten für die porösen Materialien und Dichtungen wurden nachträglich mit einer Fräsmaschine erstellt. Für die unterschiedlichen porösen Materialien wurde die Platte mit Nuttiefen von 0,5, 1 und 1,5 mm gefertigt. Die Rückseite der Platte besaß keinerlei Struktur und wurde lediglich plan geschliffen.



**Abbildung 3.8:** Bipolarhalbplatte der ersten Generation



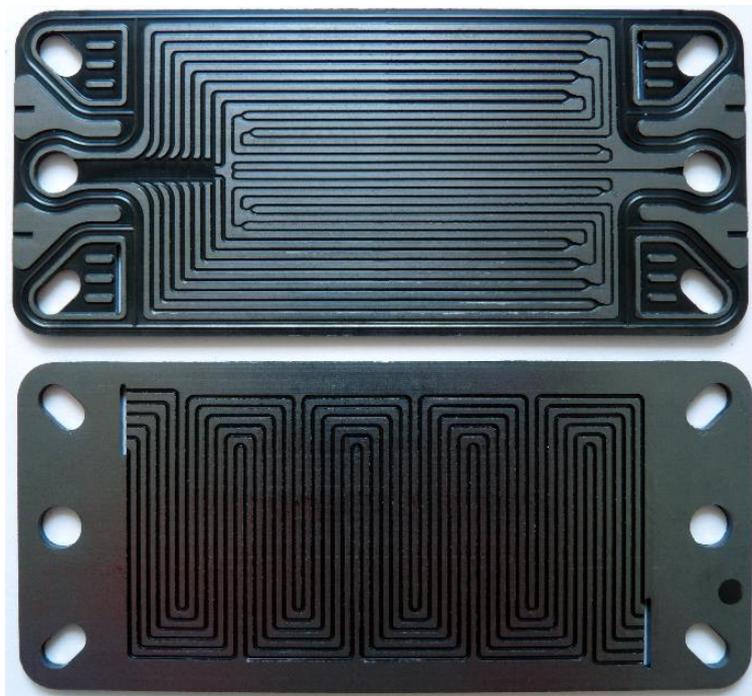
**Abbildung 3.9:** Abgewandeltes Design der Wasserkühlung

Eine weitere untersuchte Bipolarplatte zeigt Abbildung 3.9. Dabei handelt es sich um ein Design, welches von den Bipolarplatten mit Wasserkühlung abgeleitet wurde. Die Platte hatte eine Dicke von 2 mm und die Nuttiefe betrug 0,8 mm. Die Rückseite der

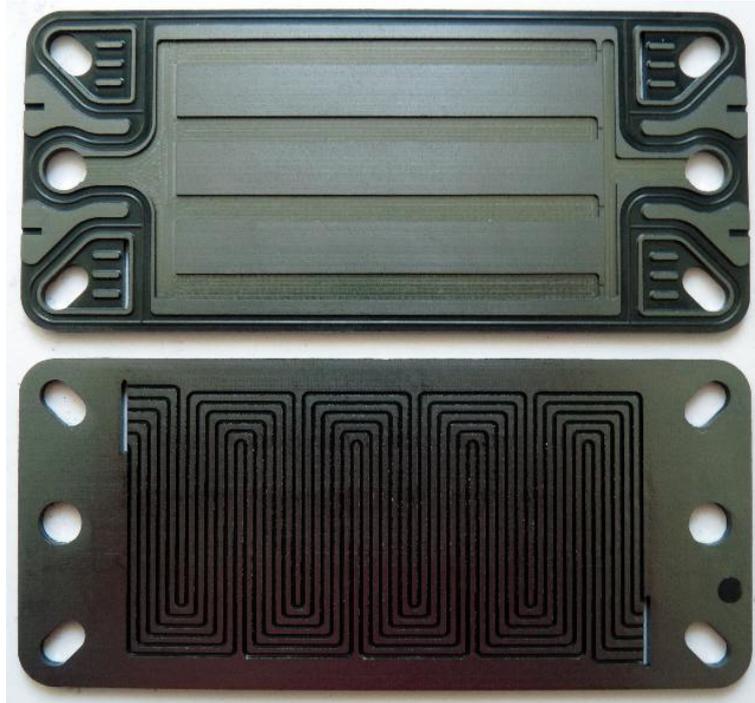
Platte war mit Gaskanälen ausgestattet. Die Herstellung der Platte erfolgte im Spritzgussverfahren, lediglich der Verdampfungskanal wurde mit einer Fräse nachträglich weiter aufgebohrt.

Bei dem Design in Abbildung 3.10 handelt es sich um einen Entwurf einer Bipolarplatte, bei der die Verdampfungskühlung ohne Einsatz eines porösen Materials untersucht werden sollte. Dazu wurde ein sich immer weiter auffächernder Strömungskanal in die Platte eingeprägt. Die Platte hatte ebenfalls eine Dicke von 2 mm und war auf der Rückseite mit Gaskanälen versehen. Die Nuttiefe der Kanäle betrug 0,5 mm.

Die letzte Abbildung 3.11 zeigt das endgültige Design der Bipolarhalbplatte für die Verwendung mit porösen Materialien. Die Versuche mit den Bipolarplatten der ersten Generation waren vielversprechend, so dass dieses Design weiter verfeinert wurde. Die Platte wurde im Spritzgussverfahren hergestellt. Die Nuten für das poröse Material hatten eine Tiefe von 0,8 mm und wurden nachträglich eingefräst. Die Gesamtdicke der Platte betrug ebenfalls 2 mm.



**Abbildung 3.10:** Design mit Kapillarstruktur



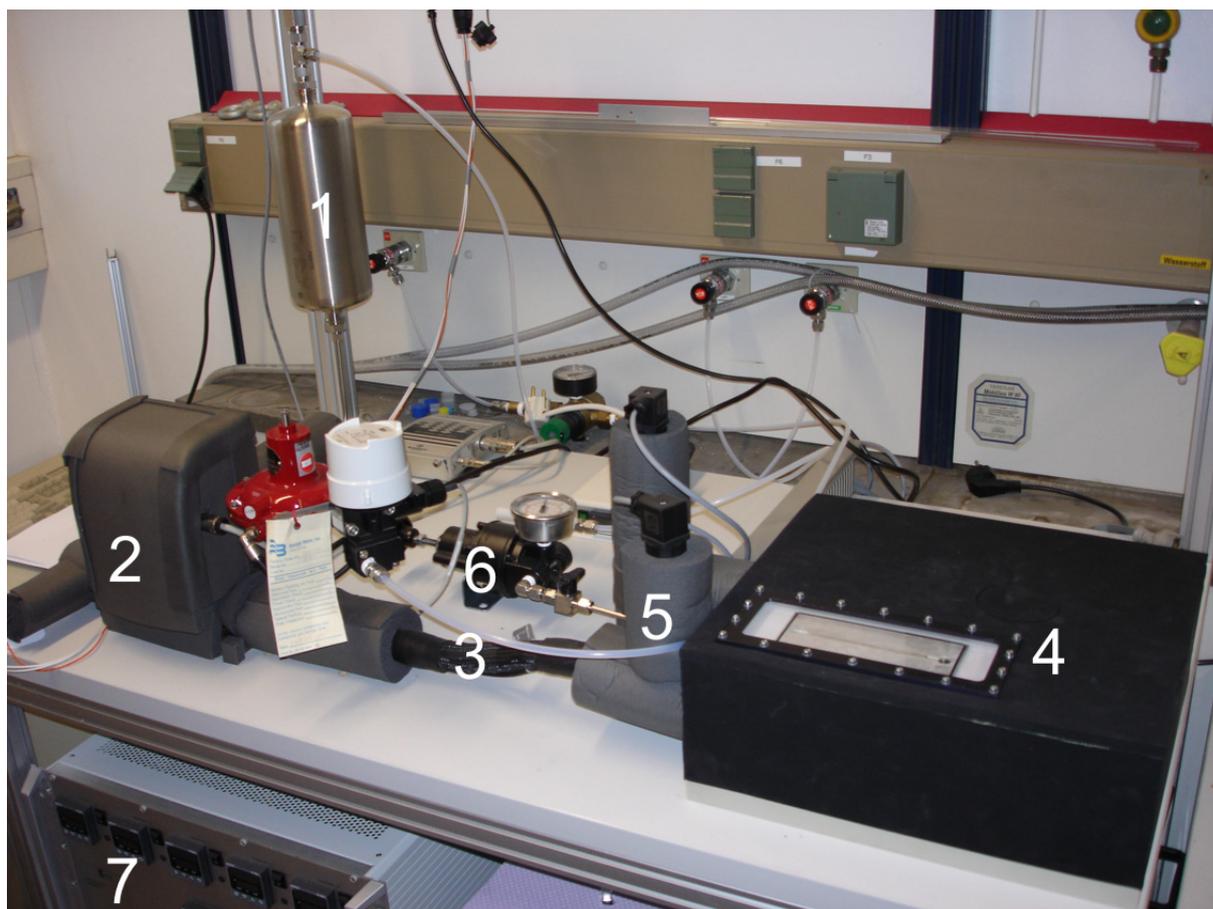
**Abbildung 3.11:** Finales Design für poröse Materialien

### 3.2 Beschreibung und Aufbau des Teststands

Zur Untersuchung der Wirksamkeit von verdampfungsgekühlten Brennstoffzellen ist am IUTA ein Teststand entwickelt und aufgebaut worden. Das Herzstück des Teststandes ist die Testkammer, in der die Bipolar-Platten eingebaut und vermessen werden konnten. Die Testkammer selbst wurde von ADROP Feuchtemesstechnik GmbH in Fürth nach Vorgaben des IUTA hergestellt.

Die weiteren Bestandteile des Teststands sind die folgenden Komponenten:

- Vorratsbehälter aus Edelstahl für die Verdampfungsflüssigkeit
- Massendurchflussregler
- Heizschlauch zur Vorwärmung der Verdampfungsflüssigkeit
- Kondensationsbehälter
- Thermobad zur Temperierung des Kondensationsbehälters
- Druck und Temperatursensoren
- Mess- und Steuerelektronik
- PC zur Steuerung und Messdatenerfassung
- Edelstahlrohrleitungen unterschiedlicher Durchmesser



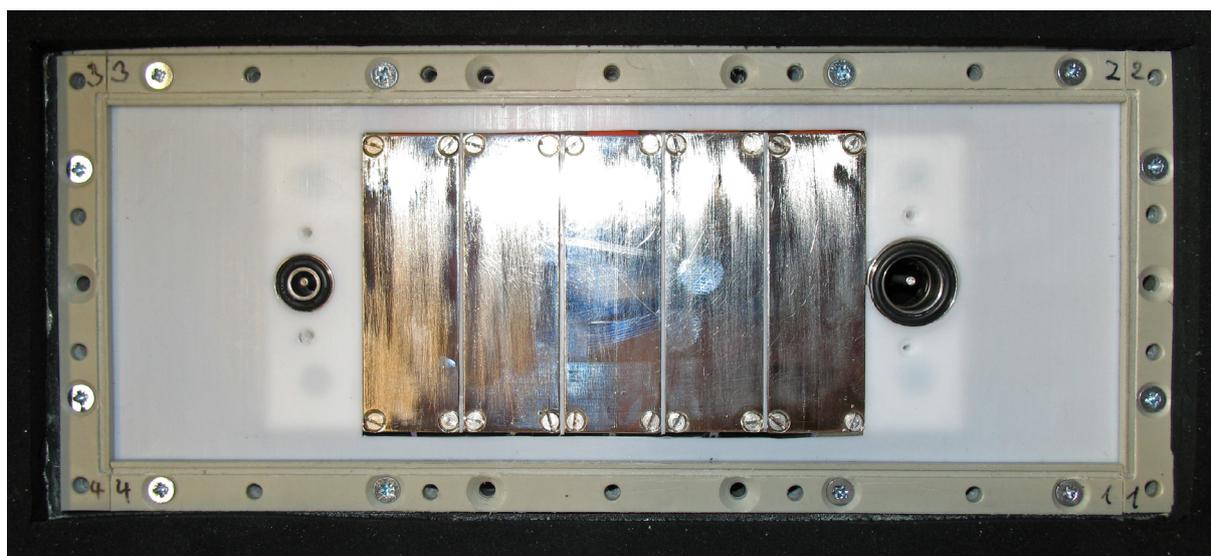
**Abbildung 3.12:** Teststand Verdampfungskühlung

Der Versuchstand wurde in einem flexiblen Gestell aus Aluminium-Profilen aufgebaut. Abbildung 3.12 zeigt den fertig aufgebauten Versuchstand.

Der Vorratsbehälter (1) dient zur Aufnahme der zu verdampfende Flüssigkeit. In dem Behälter wird ein Vordruck von 3 bis 4 bar eingestellt, um den Druckverlust in den Leistungen und Massendurchflussregler zu kompensieren. Durch den Massendurchflussregler (2) kann der Massenstrom des Verdampfungsmediums im Bereich von 0,1 und 1 kg/h eingestellt werden. Der Massendurchflussregler arbeitet nach dem Coriolis-Messverfahren, wodurch der Regler unabhängig von Dichte und Temperatur des verwendeten Mediums arbeitet. Der Regler besitzt eine abgesetzte Messelektronik, was es ermöglicht Medien bis 120 °C einzusetzen.

Der Heizschlauch (3) in der Leitung kurz vor Eintritt in die Testkammer erwärmt das Verdampfungsmedium bis kurz unterhalb der Verdampfungstemperatur. In der Testkammer (4) selbst befinden sich fünf Heizelemente, welche jede einzeln durch einen Temperaturregler individuell angesteuert werden kann. Die Steuerelektronik hierfür befindet sich in einem separaten Gehäuse (7).

Abbildung 3.13 zeigt die Oberseite der Testkammer mit abgenommenem Deckel. Deutlich zu erkennen sind die fünf Heizelemente in der Mitte. Links davon befindet sich der Eintrittskanal und rechts der Austrittskanal. Jeweils am Eintritt und am Austritt werden die Temperatur und der Druck des Fluids gemessen und aufgezeichnet. Über die fünf Heizelemente ist es möglich die Bipolarplatte entweder mit einer bestimmten Temperatur zu beaufschlagen oder die Platte mit einer bestimmten Leistung zu erwärmen.



**Abbildung 3.13:** geöffneter Testkammer mit Heizelementen und ein- und Austrittsöffnungen

In der Testkammer selbst befindet sich noch eine separate Heizung, um das Innere der Testkammer aufzuheizen. Dadurch wird ein vorzeitiges Kondensieren des Dampfes schon in den Rohrleitungen verhindert. Nach Eintritt in die Testkammer verdampft das Fluid entlang der Bipolarplatte und gelangt anschließend in den Kondensationsbehälter (auf Abbildung 3.12 nicht sichtbar), worin es wieder kondensiert. Ein Thermalbad regelt die Temperatur im Kondensationsbehälter.

Der Druck im gesamten System wird über ein Vordruckventil (6) geregelt. Je nach verwendetem Verdampfungsmedium und der gewünschten Verdampfungstemperatur kann der entsprechende Verdampfungsdruck eingestellt werden.

Die Testkammer ist mit einem Deckel aus Plexiglas versehen, wodurch der Verdampfungsvorgang von Außen beobachtet werden kann. Die Druck- (5) und Temperatursensoren, sowie der Massendurchflussregler sind an Fieldpoint Modulen angeschlossen.

Zur Regelung der Anlage und zur Messdatenaufnahme wurde unter Labview eine Steuerung programmiert. Abbildung 3.14 zeigt die Labviewoberfläche. Darüber können die fünf Heizkreise einzeln geregelt werden, sowie die Temperatur in der Testkammer. Des Weiteren wird die Durchflussmenge eingestellt. Zusätzlich werden die Temperaturen im Ein- und Austritt der Kammer sowie die Drücke angezeigt. Alle Messwerte werden für die spätere Auswertung mitgeloggt.

Nach Fertigstellung des Aufbaus und den ersten Testläufen stellte sich heraus, dass der Aufbau noch nicht optimal war. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wurden noch verschiedene Optimierungen vorgenommen. So war z. B. die Platzierung des Vordruckreglers innerhalb der Testkammer ungünstig gewählt worden, da dadurch ein unterschiedlicher Druck in der Testkammer und in dem Kondensationsbehälter herrscht. Der Regler ist daher aus der Testkammer genommen und wie in der Skizze in Abbildung 3.1 ersichtlich in die Rohrleitung gesetzt worden, so dass der Dampf ungehindert von der Testkammer in den Kondensator gelangen kann.

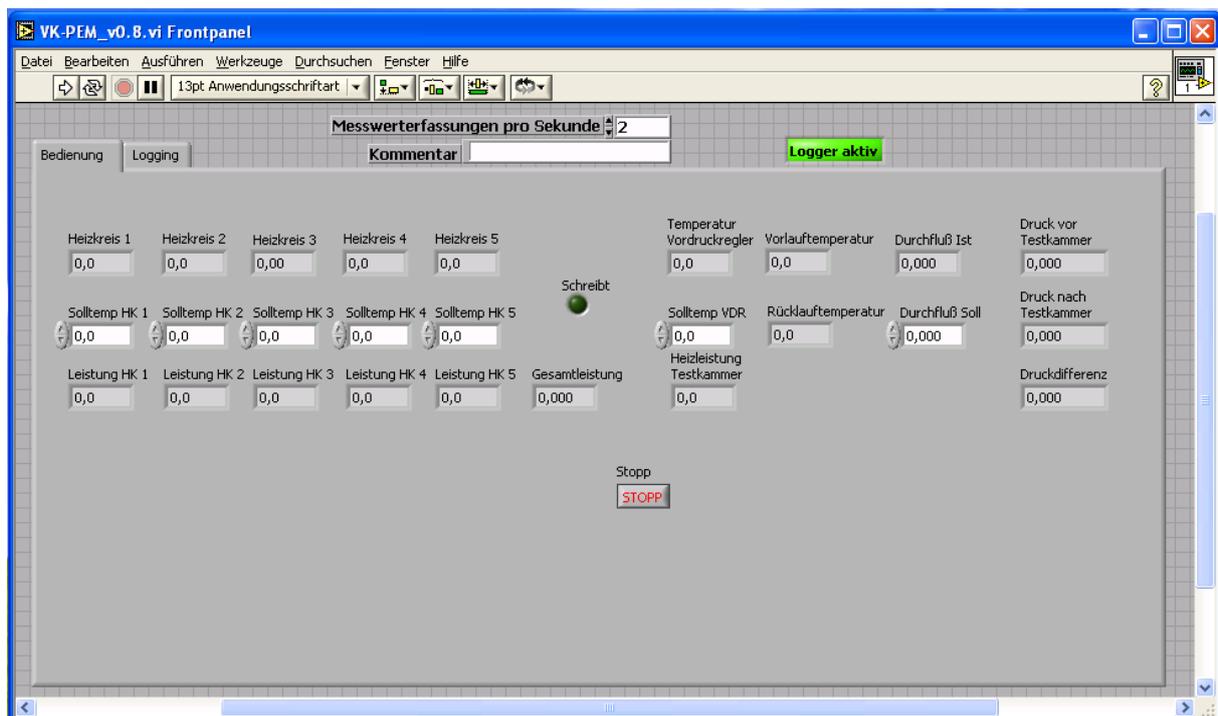
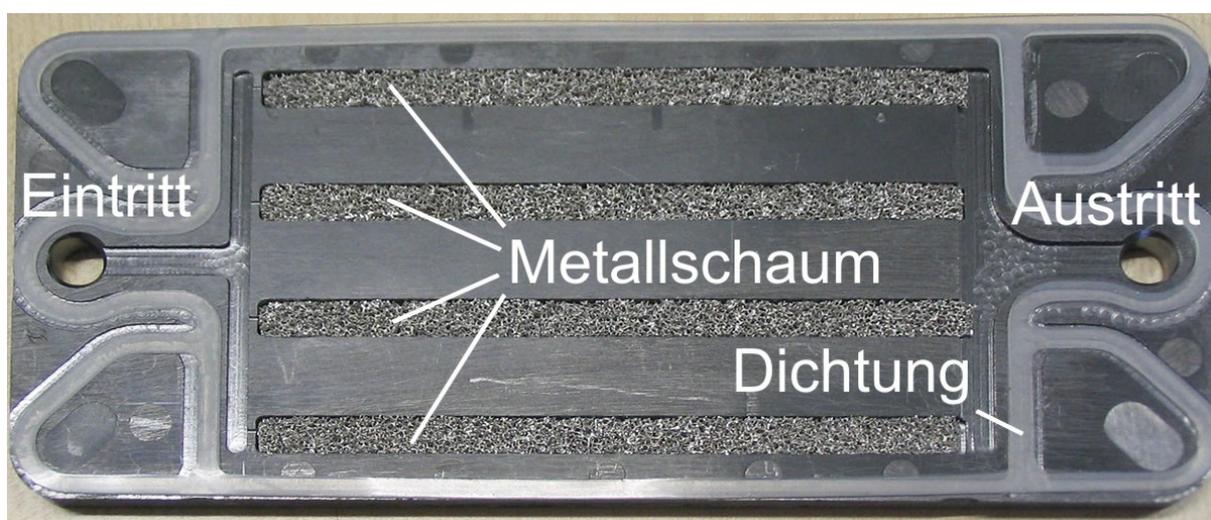


Abbildung 3.14: Programmoberfläche zur Anzeigen und Steuern der Anlage

### 3.3 Durchführung der Versuche

Die Durchführung eines Versuches beansprucht jeweils ca. 4 bis 5 Stunden. Dazu muss zunächst eine Bipolarhalbplatte vorbereitet. Entsprechend der Dicke des porösen Materials, welches untersucht werden soll, ist eine Bipolarplatte mit geeigneter Nuttiefe zu wählen. Das poröse Material wird in 68 x 5 mm langen Streifen geschnitten und in die Nuten der Bipolarplatte eingelegt. Zum Abdichten der Platte in der Testkammer muss noch eine Dichtung in die dafür vorgesehene Aussparung gelegt werden. Abbildung 3.15 zeigt eine fertig präparierte Bipolarplatte.



**Abbildung 3.15:** Für einen Versuch präparierte Bipolarplatte

Als nächstes wird die Platte in die Testkammer eingebaut. Dazu muss zunächst die mit 18 Schrauben fixierte Glasabdeckung von der Testkammer entfernt und die Platte exakt in Position in die Kammer eingelegt werden, so dass die Ein- und Austrittsöffnungen genau übereinstimmen. Mit der Glasabdeckung wird die Testkammer wieder geschlossen. Im nächsten Schritt wird der Vorratsbehälter mit ca. ein Liter der zu verdampfenden Flüssigkeit befüllt und mit Heliumgas auf einem Druck von etwa 4 bar gebracht. Der Vordruck ist notwendig, um die Druckverluste im Massenstromregler und in den Rohrleitungen zu kompensieren.

Anschließend wird das System einer Dichtigkeitsprüfung unterzogen. Mit Hilfe einer Vakuumpumpe wird das System evakuiert und der Druck für ca. eine halbe Stunde beobachtet. Steigt der Druck in dieser Zeit nur unwesentlich an, so ist das System für den Versuch ausreichend abgedichtet.

Zum Abschluss der Vorbereitungen muss die Versuchsanlage auf Betriebstemperatur gebracht werden. Dazu wird zum Einem der Kondensationsbehälter mit Hilfe des Thermobads auf die gewünschte Temperatur erwärmt und zum Anderen die interne Heizung der Testkammer eingeschaltet. Nach ca. ein bis eineinhalb Stunden hat das System die erforderliche Temperatur von 75 °C erreicht und die Versuchsreihe kann gestartet werden. Dazu muss der Massenstrom des Verdampfungsmediums eingestellt. Die Durchflussmenge richtete sich dabei je nach verwendetem Medium:

Wasser: 2 g/min

Ethanol: 3 g/min

Des Weiteren wird der Heizschlauch, welcher das Verdampfungsmedium vorheizt, eingeschaltet und auf etwa 70 °C eingestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Temperatur im Schlauch nicht zu hoch gewählt wird, so dass sich nicht schon im Schlauch Dampfbläschen bilden, die zu Druckstößen im System führen können. Zuletzt wurden die fünf Heizelemente eingeschaltet. Jedes Element wird auf eine Leistung von 4 Watt eingestellt.

Die Randbedingungen werden während der gesamten Versuchsdauer und bei allen Versuchen konstant gehalten, um die Ergebnisse untereinander vergleichen zu können.

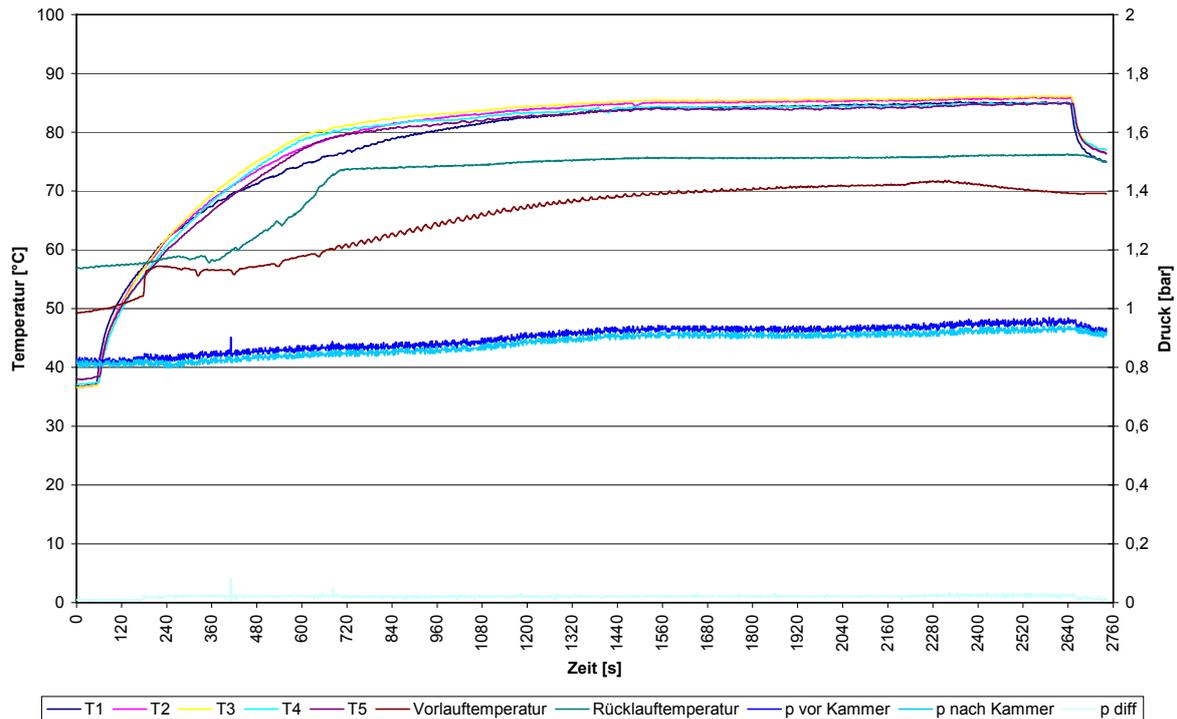
Diese waren:

Temperatur im Kondensator: 75 °C

Gesamtleistung der Heizplatten: 20 W

Die folgenden Messgrößen sind während eines Versuchs aufgezeichnet worden:

- Temperatur der Heizelemente  $T_1 - T_5$  [°C]
- Temperatur in der Testkammer  $T_K$  [°C]
- Vorlauftemperatur Eintritt Bipolarplatte  $T_V$  [°C]
- Rücklauftemperatur Austritt Bipolarplatte  $T_R$  [°C]
- Leistungsaufnahme der Heizelemente  $P_1 - P_5$  [W]
- Gesamtleistung der Heizelemente  $P_{ges}$  [W]
- Leistungsaufnahme der Testkammerheizung  $P_K$  [W]
- Durchfluss Sollwert [g/min]
- Durchfluss Istwert [g/min]
- Druck vor Kammer  $p_v$  [bar]
- Druck nach Kammer  $p_r$  [bar]
- Druckdifferenz  $p_{diff}$  [bar]



**Abbildung 3.16:** Temperatur- und Druckverlauf während einer Versuchsdurchführung

Abbildung 3.16 zeigt den Verlauf der Temperaturen und der Drücke während eines Versuchsdurchlaufs. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Temperatur T1 bis T5 der fünf Heizelemente zu Beginn des Versuchs, der sich mit Einsetzen der Verdampfung bei Zeitindex 720 s merklich abflacht und für den Rest der Versuchsdauer konstant bleibt. Das Einsetzen der Verdampfung ist auch am Verlauf der Rücklauftemperatur (grüne Linie) gut zu erkennen

Eines der größten Probleme bei der Durchführung der Versuche war die Abdichtung der Bipolarplatten in der Versuchsapparatur. Die Bipolarplatte wird mit einer Glasplatte von oben abgedeckt. Zum Abdichten wird eine Silikondichtung in eine gefräste Nut in die Bipolarplatte eingelegt. Die von Hand befräste Bipolarplatten der ersten Generation wiesen Fertigungstoleranzen auf, die zu Undichtigkeiten führten. Außerdem zeigten sich an einigen Platten feine Haarrisse wodurch ebenfalls immer wieder Luft in das System eindringen konnte. Diese Probleme führten immer wieder zu Verzögerungen bei den Arbeiten. Die zweite Generation von Bipolarplatten wurde mit einer Präzisionsfräse gefertigt. Diese Platten haben eine geringere Fertigungstoleranz und bereiten von daher weniger Probleme bei der Abdichtung.

### 3.4 Messergebnisse

Während der Projektlaufzeit wurden am IUTA vier verschiedene Designvarianten von Bipolarhalbplatten bezüglich ihrer Eignung für einen verdampfungsgekühlten PEM-BZ-Stack untersucht (vgl. Kapitel 3.1.4).

Als poröse Materialien wurden drei verschiedene Metallschäume und zwei Vliese aus Kohlefasern untersucht (vgl. Kapitel 3.1.3). Bei dem Vlies von *Frenzelit* stellte sich aber schon zu Beginn heraus, dass es für die Verdampfungskühlung nicht geeignet ist, da sich ein darin enthaltenes Bindemittel bei Temperaturen über 70 °C auflöste.

Die Versuche wurden mit Wasser und mit Ethanol als Verdampfungsflüssigkeiten durchgeführt. Bei Wasser liegt der Dampfdruck für 75 °C bei 0,386 bar absolut, was eine gute Dichtigkeit des gesamten Systems voraussetzt. Der Dampfdruck von Ethanol bei dieser Temperatur beträgt 0,9 bar absolut und entspricht nahezu Umgebungsdruck, was die Abdichtung vereinfacht.

Auf den nachfolgenden Seiten sind die Ergebnisse der einzelnen Messreihen grafisch wiedergegeben. Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Verdampfungskühlung sind maßgeblich zwei Größen entscheidend. Zum Einen die Temperaturdifferenz zwischen der Ein- und Austrittsöffnung der Bipolarplatte und zum Anderen der über der Platte entstehende Druckverlust. Die Temperaturdifferenz gibt Auskunft darüber, wie effektiv die anfallende Wärme von der Bipolarplatte abtransportiert werden kann. Je niedriger der Wert, desto besser ist der Wärmetransport von der Platte an die Verdampfungsflüssigkeit. Der Druckverlust ist ein Indikator für den Widerstand, der hauptsächlich durch das poröse Material verursacht wird. Das verwendete Verdampfungsmedium hat ebenfalls einen Einfluss auf den Druckverlust. Ein geringer Druckverlust begünstigt die Verdampfungskühlung, da ein höherer Druckverlust auch einen höheren Temperaturgradienten über der Platte bedeutet.

In den Abbildungen 3.17 und 3.18 sind die Temperaturdifferenz und der Druckverlust für die Bipolarhalbplatten des Standarddesigns mit einer Strukturtiefe von 1,5 mm dargestellt. Die Versuche wurden mit Wasser und Ethanol als Verdampfungsflüssigkeit mit unterschiedlichen porösen Materialien durchgeführt. Daran ist deutlich zu erkennen, dass mit Ethanol als Verdampfungsflüssigkeit bessere Ergebnisse erzielt werden als mit Wasser. Sowohl die Temperaturdifferenz als auch der Druckverlust sind geringer. Dieses Ergebnis zeigt sich auch bei den Versuchen mit Bipolarplatten nach dem Wasserkühlungsdesign (s. Abbildung 3.19

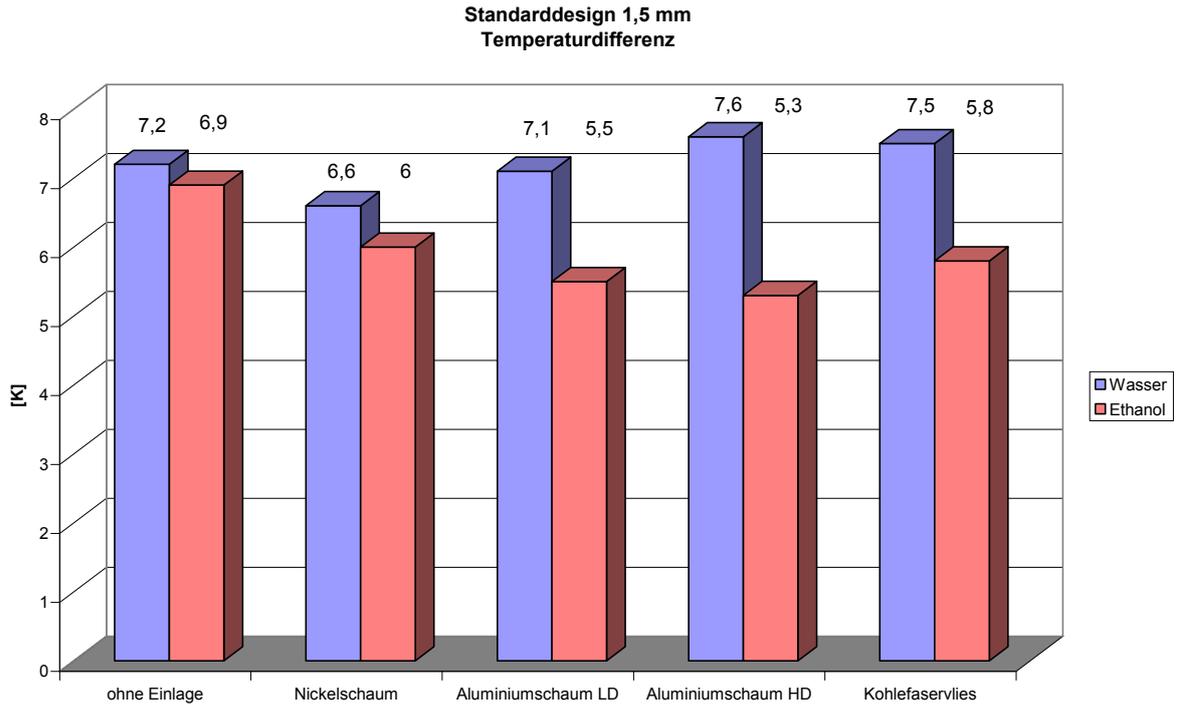
und Abbildung 3.20). Auch hier konnten mit Ethanol bessere Ergebnisse erzielt werden als mit Wasser. Aus diesem Grund wurde für alle weiteren Versuche auf Wasser als Verdampfungsflüssigkeit verzichtet und die Versuche nur noch mit Ethanol durchgeführt.

Die Messergebnisse mit dem Standarddesign hinsichtlich der verwendeten porösen Materialien ergeben ein differenzierteres Bild. Ohne eine poröse Einlage ist der Druckverlust erwartungsgemäß am geringsten. Mit steigender Dichte des eingelegten porösen Materials steigt auch der Druckverlust stetig an. Den größten Druckverlust verursacht das Kohlefaservlies. Bei der Temperaturdifferenz ist dieser Zusammenhang jedoch so nicht aufgetreten. Hier liefern die Aluminiumschäume die geringste Temperaturdifferenz. Hier macht sich die gute Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums bemerkbar, welche von den getesteten Materialien die Beste ist.

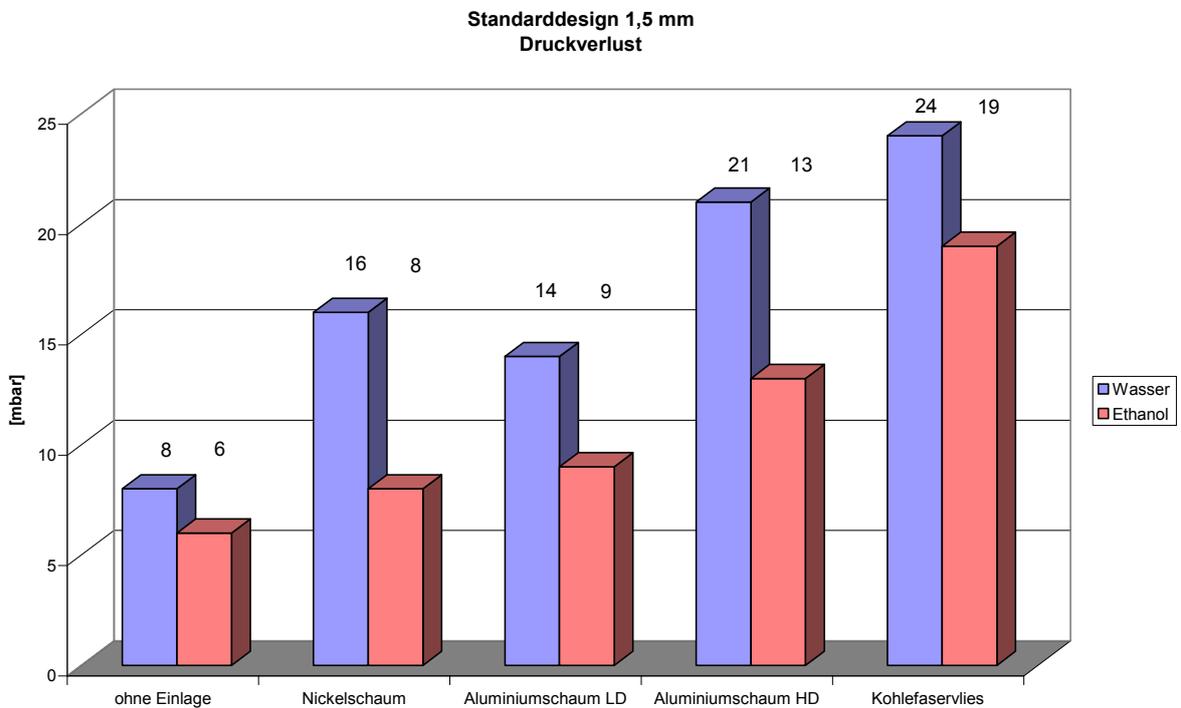
Bei den Versuchen mit der Bipolarplatte mit 1 mm Strukturtiefe (s. Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22) konnten die Aluminiumschäume nicht eingesetzt werden, da sich diese nicht weiter komprimieren ließen. Es wurden daher nur Versuche mit dem Nickelschaum, dem Kohlefaservlies sowie ohne eine Einlage durchgeführt. Es zeigt sich auch hier das gleiche Bild wie schon zuvor bei den Versuchen mit der Bipolarplatte mit 1,5 mm Strukturtiefe. Der Druckverlust steigt mit der Dichte des eingelegten Materials an, während bei der Temperaturdifferenz der Nickelschaum gegenüber dem Kohlefaservlies oder ohne eine Einlage einen leichten Vorteil hat.

Die Abbildungen 3.23 und 3.24 zeigen die Ergebnisse der Versuche mit dem Kapillardesign. Hierbei wurde kein poröses Material verwendet. Im Vergleich zu den vorherigen Ergebnissen mit porösem Material blieb das Kapillardesign hinter den Erwartungen zurück. Der Wert der Temperaturdifferenz liegt im Vergleich im mittleren Bereich und der Wert für den Druckverlust im oberen Bereich.

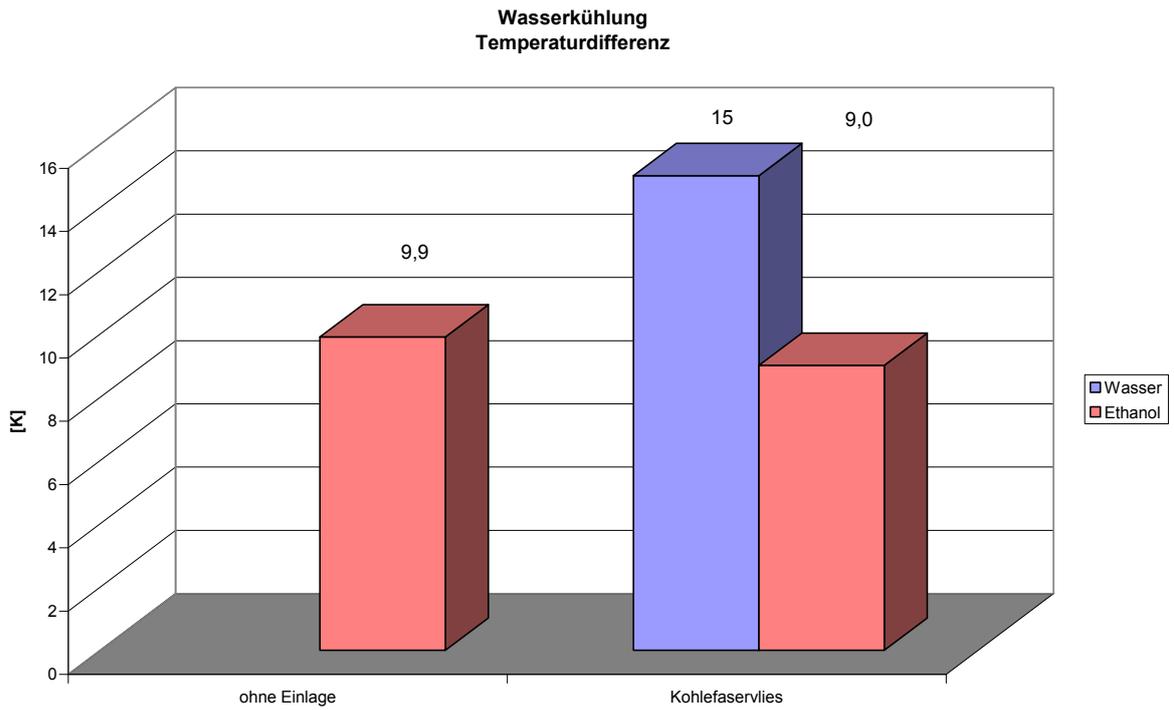
Die letzten beiden Abbildungen 3.25 und 3.26 zeigen die Ergebnisse, die mit dem finalen Design mit einer Strukturtiefe von 0,8 mm durchgeführt wurden. Diese Platten wurden für den Aufbau des Demonstrationsstacks gefertigt. Die Werte sind gegenüber dem Standarddesign mit 1 mm Strukturtiefe etwas schlechter, was hauptsächlich an der Dichte der weiter komprimierten porösen Materialien liegt.



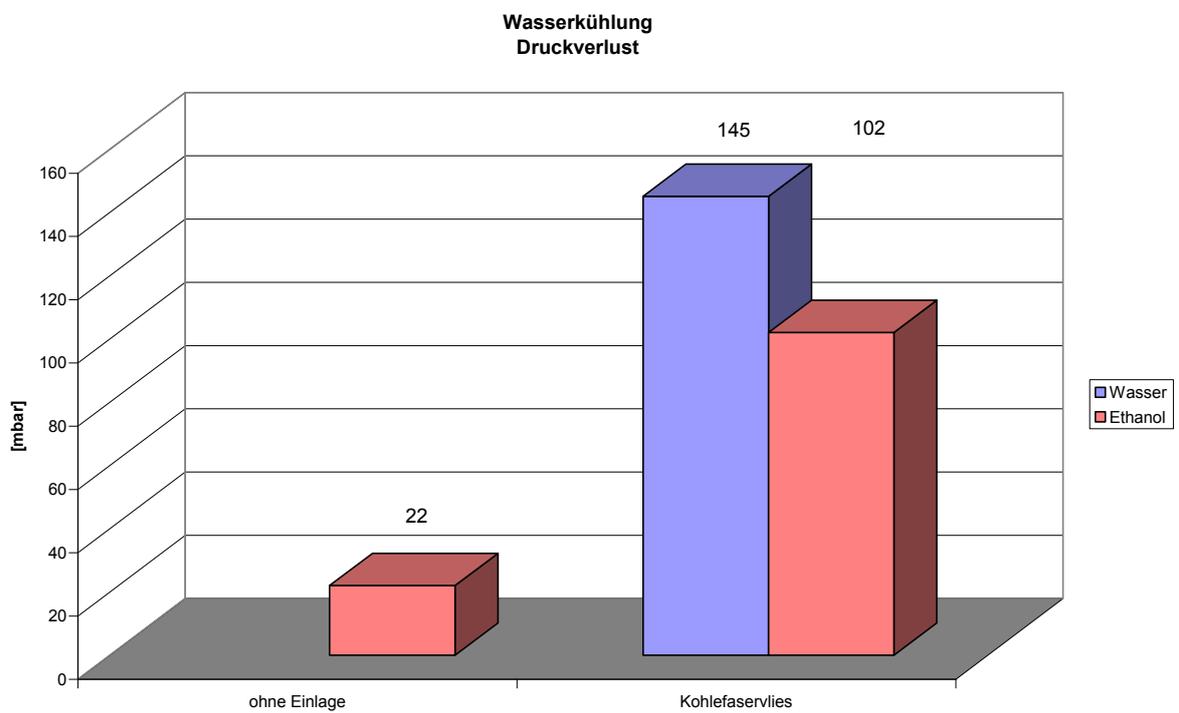
**Abbildung 3.17:** Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt für das Standarddesign mit 1,5 mm Strukturtiefe



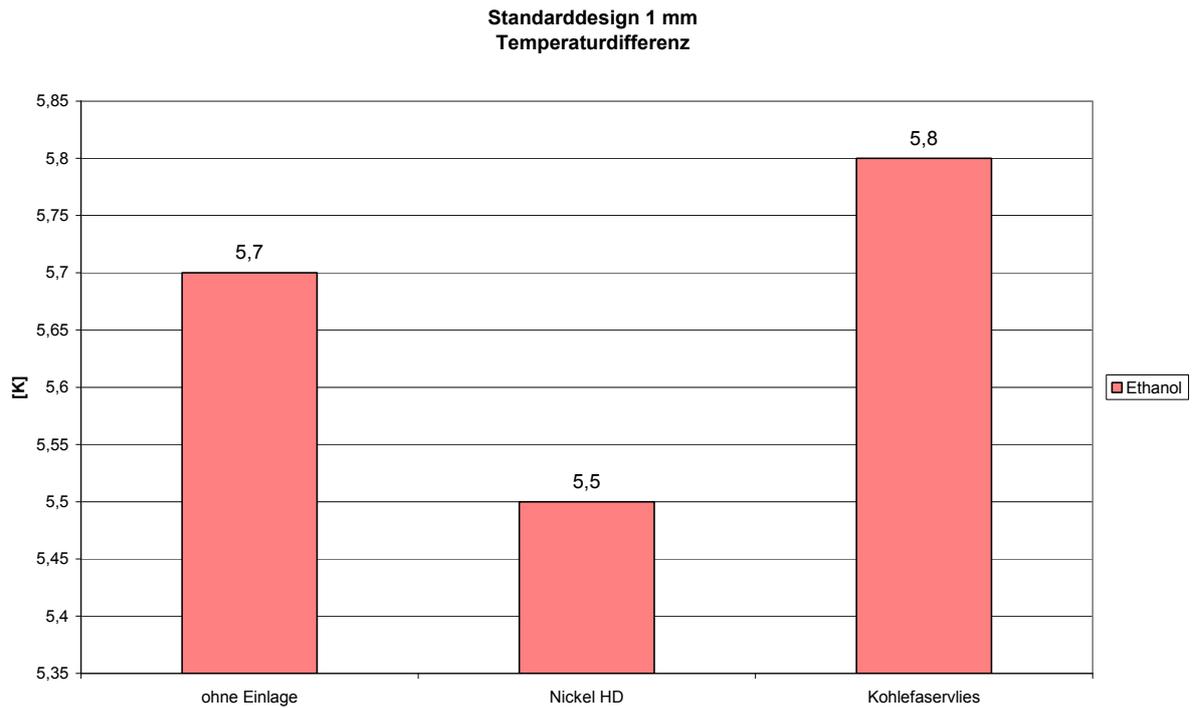
**Abbildung 3.18:** Druckverlust über der Bipolarplatte für das Standarddesign mit 1,5 mm Strukturtiefe



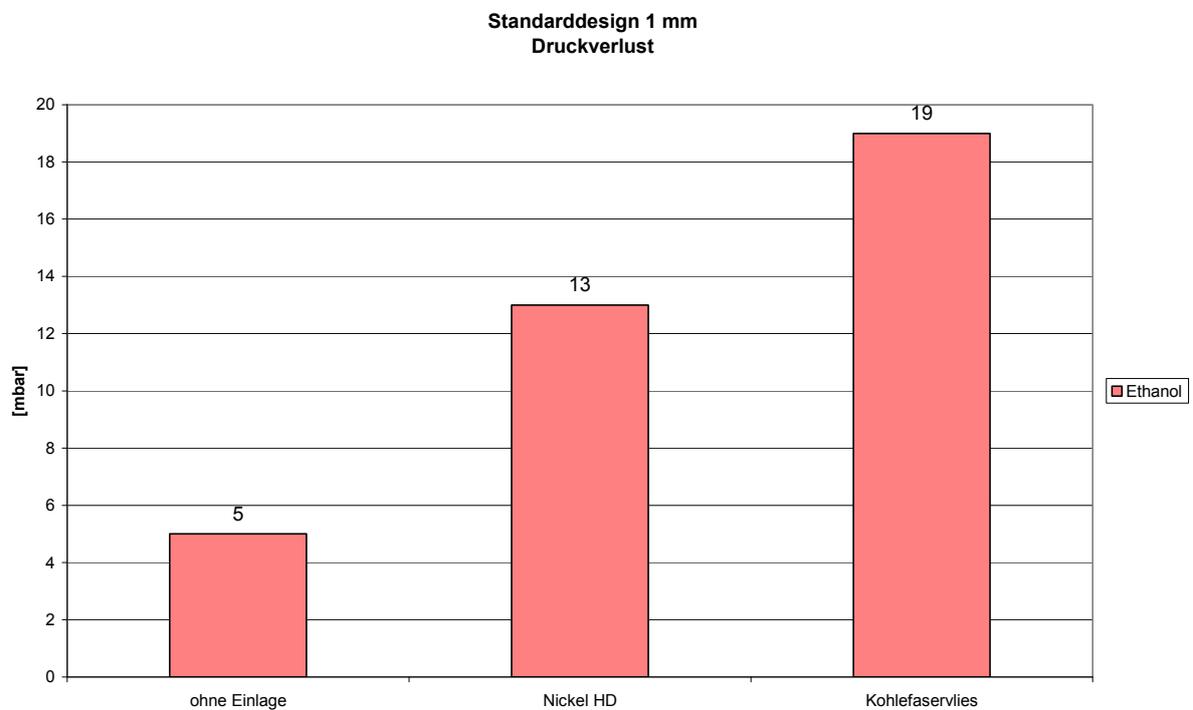
**Abbildung 3.19:** Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt für Wasserkühlung



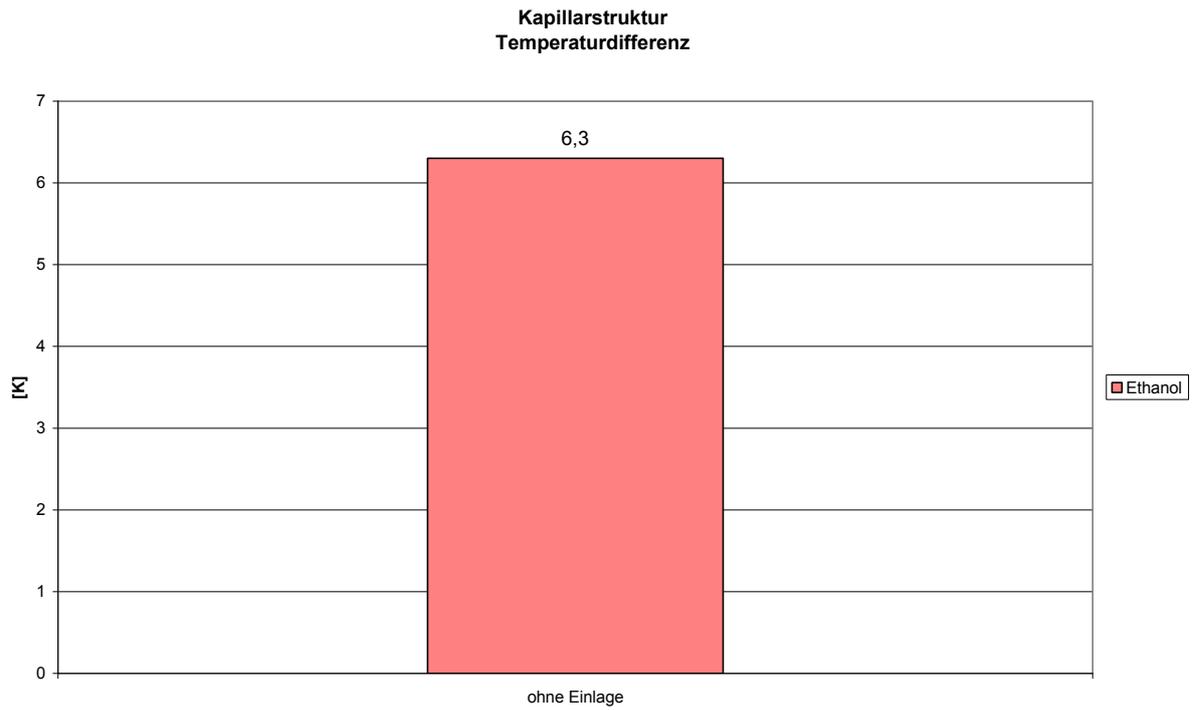
**Abbildung 3.20:** Druckverlust über der Bipolarplatte für Wasserkühlung



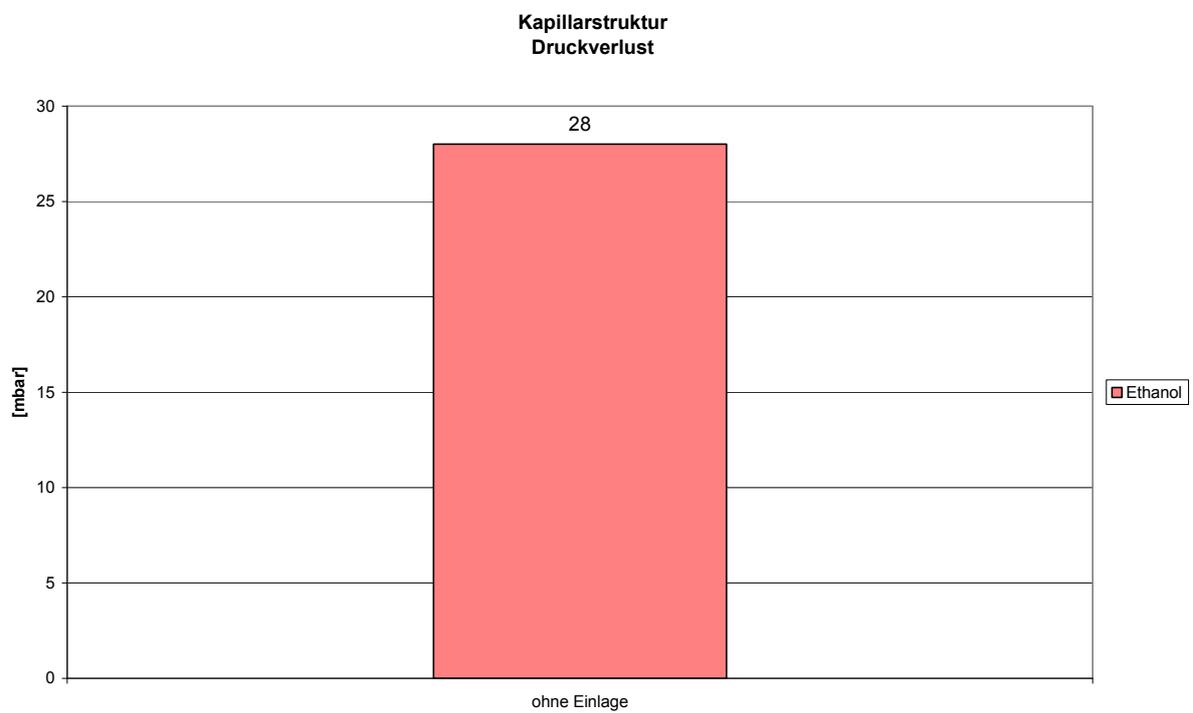
**Abbildung 3.21:** Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt für das Standarddesign mit 1 mm Strukturtiefe



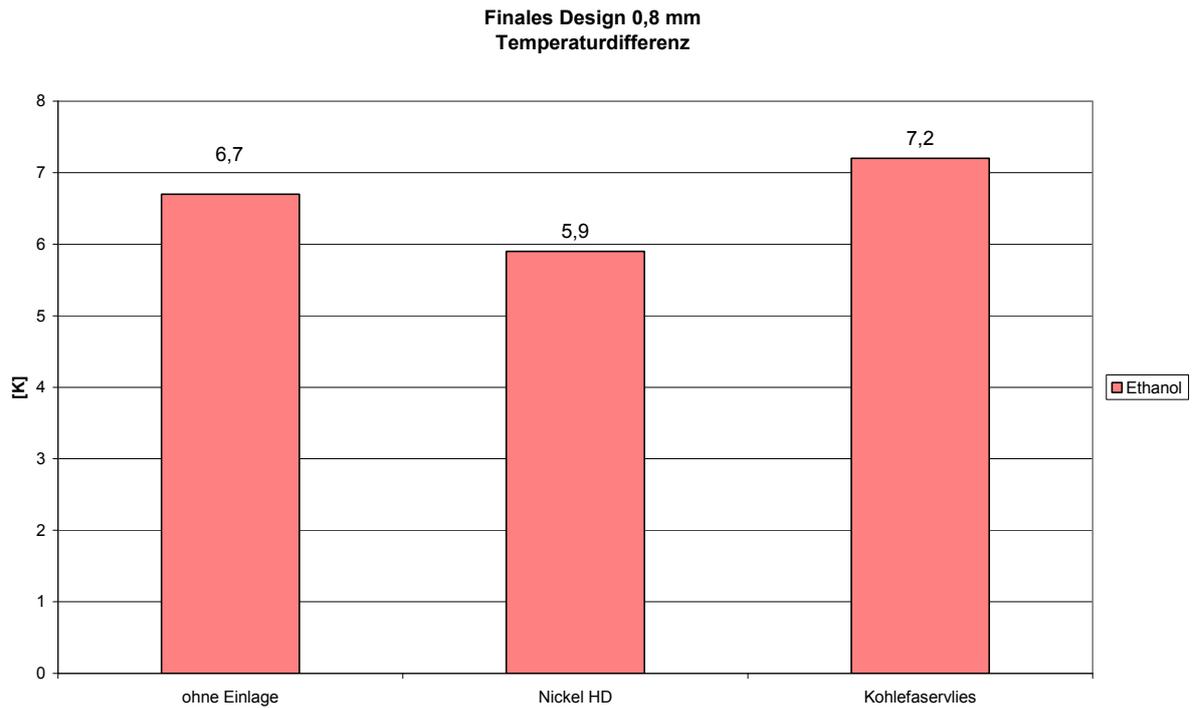
**Abbildung 3.22:** Druckverlust über der Bipolarplatte für das Standarddesign mit 1 mm Strukturtiefe



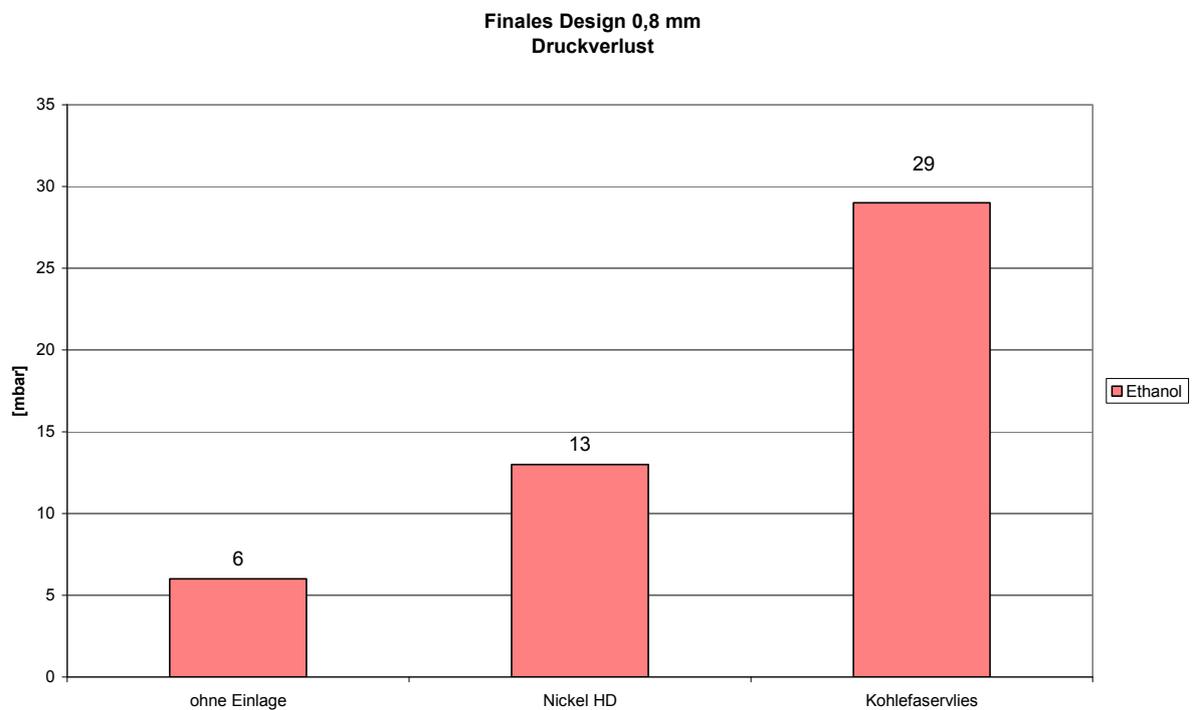
**Abbildung 3.23:** Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt für Kapillarstruktur



**Abbildung 3.24:** Druckverlust über der Bipolarplatte für Kapillarstruktur



**Abbildung 3.25:** Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt für das finale Design mit 0,8 mm Strukturtiefe



**Abbildung 3.26:** Druckverlust über der Bipolarplatte für das finalen Design mit 0,8 mm Strukturtiefe

### 3.5 Fazit

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass mit allen getesteten porösen Materialien eine gute bis sehr gute Kühlleistung der Bipolarplatten erreicht werden kann. Die beste Kühlleistung ist mit den Bipolarplatten im Standarddesign mit 1,5 mm Strukturtiefe und mit den Metallschäumen als poröses Medium erreicht worden. Die Kühlleistung des Kohlefaservlieses ist ebenfalls als gut zu bewerten, jedoch verursacht das Vlies einen im Vergleich zu den Metallschäumen größeren Druckverlust. Der über der Platte auftretende Druckverlust ist hauptsächlich von der Porosität des verwendeten porösen Materials abhängig und ist bei den Kohlefaservliesen erwartungsgemäß am größten.

Als Verdampfungsflüssigkeit hat sich Ethanol als am besten geeignet herausgestellt. Gegenüber Wasser kann damit eine deutlich bessere Kühlleistungen erzielt werden. Ethanol besitzt gegenüber Wasser ein geringeres Dampfvolumen bei gleicher Kühlleistung, wodurch in den Kanälen der Bipolarplatte auch eine geringere Dampfgeschwindigkeit auftritt, was einen geringeren Druckverlust zur Folge hat.

Bei dem Design der Bipolarplatten hat sich die Variante mit den Kanälen zum Einlegen von porösen Materialien gegenüber den anderen getesteten Varianten als klar überlegen erwiesen. Versuche mit den modifizierten wassergekühlten Bipolarplatten haben die schlechtesten Ergebnisse aller Tests geliefert. Auch die Platte mit dem Kapillardesign, mit der ein Design erprobt wurde, welches ohne poröse Einlagemedien auskommt, konnte bei den Tests nicht überzeugen. Diese beiden Plattenvarianten zeigen ein wesentlich schlechteres Kühlverhalten mit einem deutlich größeren Druckverlust als das eigens für die Verdampfungskühlung neu entwickelte Plattendesign.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Verdampfungskühlung erfolgreich zur Kühlung von Niedertemperatur-PEM-BZ eingesetzt werden kann. Durch die Verdampfungskühlung wird eine weitestgehende homogene Temperaturverteilung über der Bipolarplatte erreicht.

Das Design der Bipolarplatten ist hinsichtlich Kühlleistung und Druckverlust noch nicht gänzlich ausgereift, so dass hier noch weiterer Optimierungsbedarf besteht. Ebenso muss der Metallschaum bezüglich seiner Dichte und Porosität weiter optimiert werden, um eine Steigerung der Wärmeübertragung zu erreichen.

## **4 Forschungsstelle ZBT**

### **4.1 Entwicklung & Konstruktion**

Die Entwicklung und Konstruktion eines verdampfungsgekühlten Brennstoffzellenstacks und der dazugehörigen Bipolarplatten mit Verdampfungsstrukturen vollzog sich in mehreren Iterationsschritten, da Zwischenergebnisse, sei es aus Simulationsrechnungen oder Teststandsversuchen, kontinuierlich in die Entwicklung der Bipolarplatten einfließen. Es wurden parallel mehrere Konzepte erarbeitet und auf ihre Tauglichkeit zum Einsatz in PEM Brennstoffzellen untersucht.

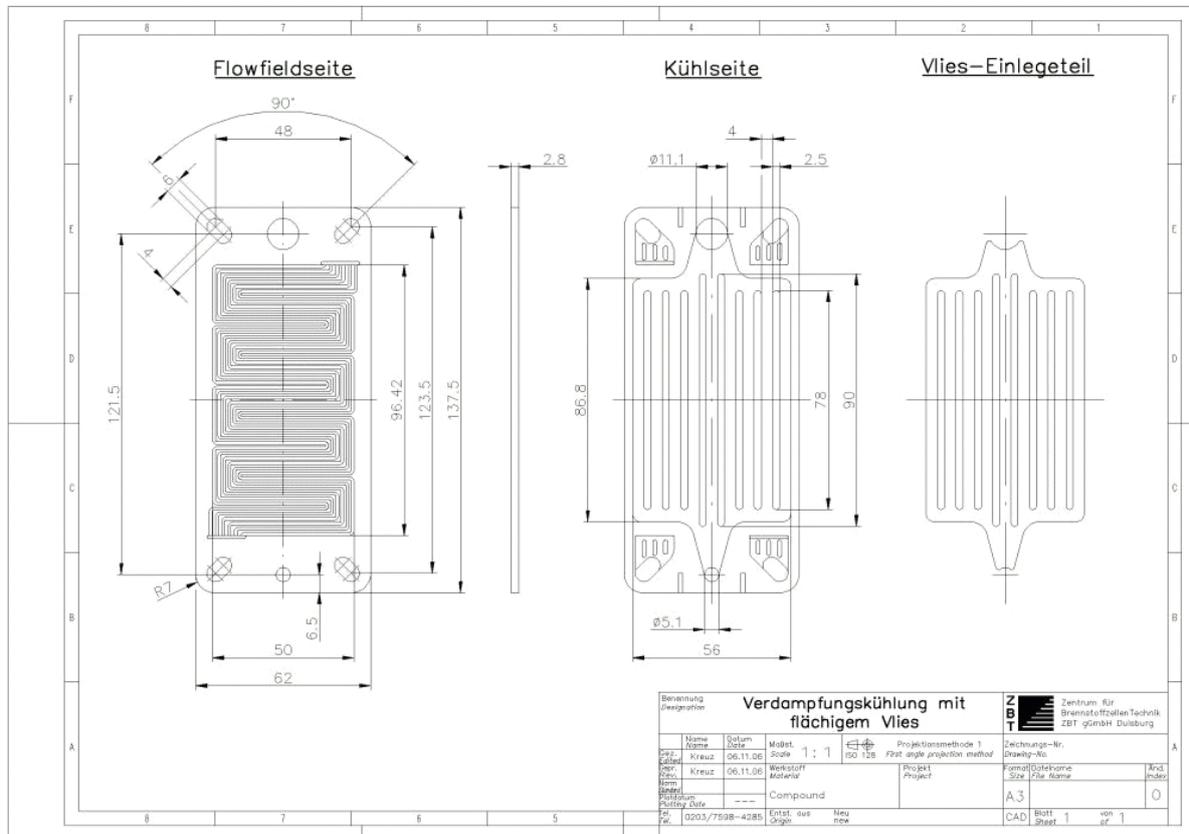
Das erste Projekttreffen zwischen den Forschungsstellen IUTA und ZBT zur Initialisierung und Abstimmung der Projektthemen fand am 11.09.2006 im ZBT zwischen Jens Wartmann (IUTA), Jens Burfeind und Can Kreuz (beide ZBT) statt. Im Rahmen dieses Treffens wurden erste Überlegungen für eine konstruktive Auslegung einer Bipolarplatten-Kühlstruktur ausgearbeitet. Der wichtigste Punkt bei der Auslegung einer Verdampfungskühlung ist es, einen gleichmäßigen und sich allmählich vollziehenden Phasenwechsel des Kühlmediums über der Kühlfläche zu erreichen. Aus diesem Grunde sollten nach ersten Vorgesprächen zwischen der Forschungsstelle IUTA und TU Bergakademie Freiberg poröse Medien wie Nickelschäume oder Carbon-Vliese untersucht und verwendet werden, um einen guten Wärmeübergang über eine große Oberfläche zu erreichen.

Parallel dazu kam die Idee auf, die Verdampfung über feine Kapillarstrukturen zu realisieren und somit auf die Verwendung poröser Medien zu verzichten. Nachfolgend werden die drei verschiedenen Konzepte, Verwendung von Carbonvliesen, Verwendung von Metallschäumen und die Kapillarstruktur, näher beleuchtet.

#### **4.1.1 Konzept 1 – Verwendung von porösen Medien**

Auf Basis der Vorüberlegungen wurden vom ZBT in einem ersten Schritt zwei Konzepte erarbeitet, die die Verwendung von Carbonvliesen in der Kühlstruktur einer Graphit-Compound-Bipolarplatte gewährleisten. Der erste Entwurf (Abbildung 4.1) basiert auf dem bekannten ZBT-Bipolarplattendesign, da das spätere Projektziel

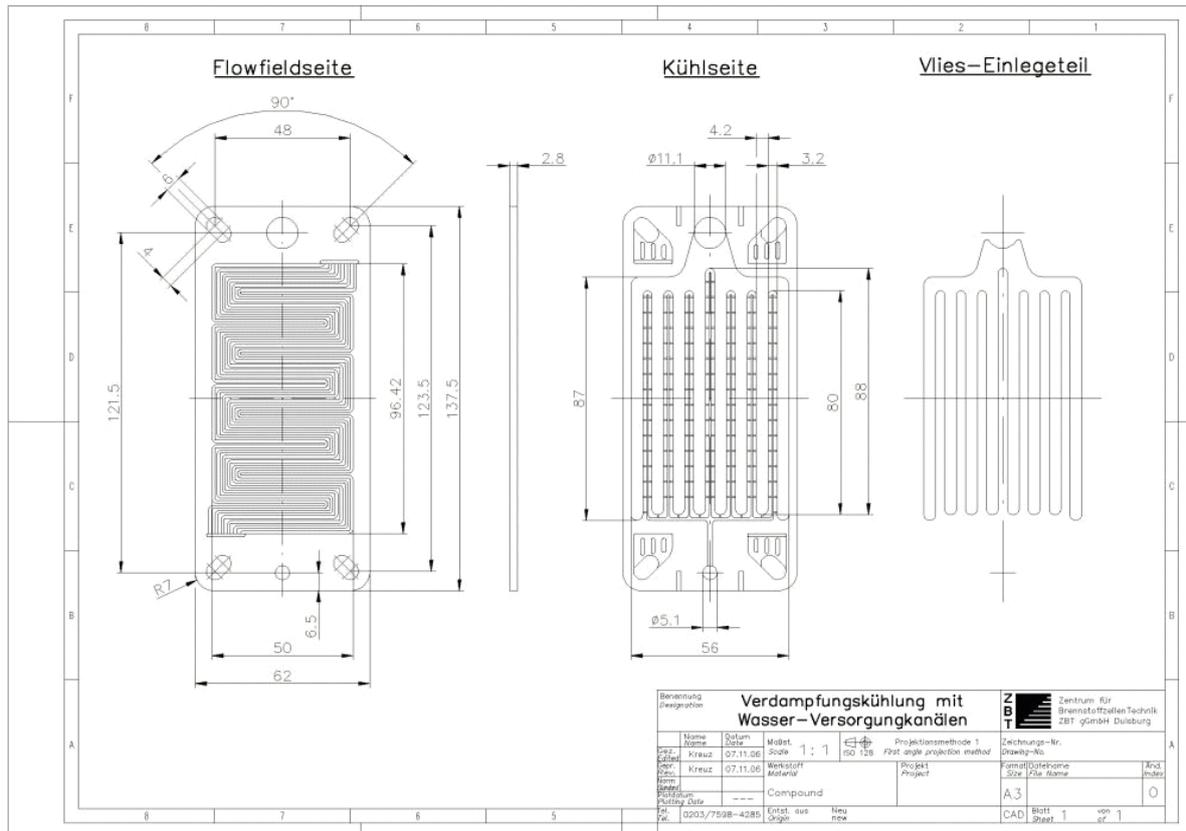
besteht, die entwickelten Bipolarplatten mit Hilfe der Spritzgießtechnologie massenproduktions-tauglich herzustellen.



**Abbildung 4.1:** Zeichnung des Entwurfs eines flächigen Vlieseinlegeteils auf der Kühlseite einer Bipolar-Halbplatte nach ZBT Design

Als Vlies sollte dabei ein großes, flächiges Einlege teil verwendet werden, das direkt an den unteren Kühlmedium-Zulauf ( $\varnothing 5,1$ ) und den oberen Dampf-Auslass ( $\varnothing 11,1$ ) anschließt. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Kühlmedium sich schon in der flüssigen Phase gleichmäßig im Vlies verteilt und über dem Fließvolumen von unten nach oben steigend allmählich verdampft.

Das zweite Design sollte eine Alternative darstellen und die flächige Verteilung des flüssigen Kühlmediums in die Vliesstruktur sicherstellen - Abbildung 4.2



**Abbildung 4.2:** Zeichnung des Alternativ-Entwurfs eines "kammartigen" Vlieseinlegeteils mit feinverteilten Kühlmedium-Versorgungsstrukturen

ber die feinen Kanäle der Kühlmedium-Versorgungsstrukturen soll das flüssige Kühlmedium einen möglichst großen Bereich der Vliesstruktur erreichen und benetzen können. Dabei wird vorgesehen, dass das Kühlmedium aufgrund eines erhöhten Druckes in der flüssigen Phase erst durch den Druckabfall in der porösen Struktur verdampfen kann.

Diese ersten Konzepte wurden aufgrund mehrerer Nachteile verworfen. Zum einen ist die Kontaktfläche der Bipolarhalbplatten zueinander sehr gering, weshalb sich höhere Kontaktwiderstände einstellen, was zu einer schlechteren Performance der Brennstoffzelle führt und zum anderen sind diese Konzepte nur zum Einsatz mit Carbonvliesen geeignet. Parallel zu den Carbonvliesen sollen jedoch auch Metallschäume untersucht werden, was bei den aufgezeigten Konzepten aufgrund der zuzuschneidenden Geometrie nicht möglich ist.

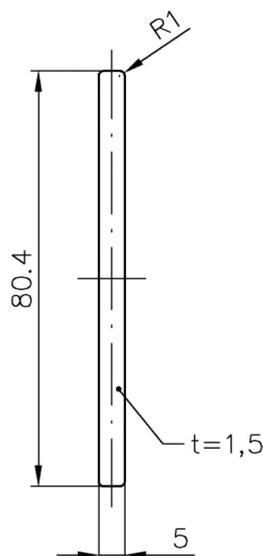
Um den aufgezeigten Problemen entgegen zu kommen wurde eine Bipolarplatte entwickelt, welche die Möglichkeit bietet, beide Arten poröser Medien aufzunehmen. Der zu diesem Thema ausgearbeitete Entwurf seitens des ZBT sieht dabei vier

schmalere Einzelporenkörper vor. In enger Absprache mit der TU Bergakademie Freiberg wurde vereinbart, dass das Kühlmedium über sehr feingliedrige Düsen in den Porenkörper strömen soll. Über die Düsen kommt es zu einem großen und definierten Druckabfall im flüssigen Kühlmedium, so dass es im Falle von Druckstößen durch Verdampfungen innerhalb der Porenkörper keine Rückstöße in den Einlassbereich geben kann. Ein erster Entwurf nach diesen Vorgaben wurde an die TU Bergakademie Freiberg gesendet, bei dem eine sehr schmale Nut zweifach symmetrisch aufgespaltet wird, um alle vier Porenkörper zu versorgen. Nach Rücksprache wurde von Seiten der Projektkollegen aus Freiberg der Düseneinlassbereich nochmals überarbeitet, da die Aufspaltung der Kühlmedium-Ströme im Kapillarbereich nicht gleichmäßig und homogen erfolgen kann. Der überarbeitete Entwurf führte zu unten stehender Form des Kühlmedium Verteil- und Einströmbereiches:



Gut zu erkennen ist im überarbeiteten Entwurf der veränderte Einlassbereich des flüssigen Kühlmediums in die roten Porenkörper-Strukturen. Über einen breiten Verteilerkanal wird das flüssige Kühlmedium nah an die Porenkörper-Strukturen geführt und über vier sehr kurze Düsen mit einem halbkreisförmigen Querschnitt (Durchmesser: 0,6 mm) in die Poren geleitet. Über die Querschnittsverengung der Düsen fällt ein Druckverlust im flüssigen Kühlmedium an, der wiederum dazu führt, dass Druckstöße durch die Verdampfung des Kühlmediums, dieses nicht wieder in den Einlassbereich zurückdrücken.

Vorteil dieser Entwicklung ist die einfache Geometrie der Porenkörper (Abbildung 4.3). Die vorliegende Geometrie kann aus beliebigen Porenkörpern mit einfachsten Mitteln hergestellt werden und ist somit auch für die Nutzung von Metallschäumen sehr gut geeignet.



**Abbildung 4.5:** Geometrie der Porenkörper-Struktur

Der Entwurf mit vier parallel angeordneten Porenkörpern wurde von Seiten aller Projektpartner für die weiteren Versuche ausgewählt und sollte im Folgenden am ZBT praktisch umgesetzt werden. Für die ersten Vorversuche wurden 4 mm dicke, spritzgegossene Compound-Platten ohne jegliche Strukturen als Substrat verwendet, da mit Hilfe dieser Platten lediglich die ersten Verdampfungsversuche am IUTA vollzogen werden sollten. Da zudem die Spritzgießplatten nur von einer Seite spanend bearbeitet werden, sind Undichtigkeiten durch feine Haarrisse in der Platte nicht zu befürchten. Der größte Anspruch in der praktischen Umsetzung der Spanarbeiten lag in der reproduzierbar präzisen Herstellung der sehr feinen Düsen. Dazu wurde ein Kugelkopffräser mit einem Durchmesser von 0,6 mm beschafft. Während der Spanarbeiten musste auf eine präzise Einstellung des Höhen-Verfahrweges (Z-Richtung) geachtet werden, damit alle Düsen den gleichen Querschnitt aufweisen.

Da zum Zeitpunkt der spanenden Bearbeitung der Versuchsplatten keine Klarheit über die benötigte Kanaltiefe für die Nickelschäume und Carbonvliese bestand, wurden Compoundplatten mit Nuttiefen von 0,5 – 1,0 und 1,5 mm hergestellt

Von Seiten des ZBT wurden die Kontakte zur Firma Freudenberg genutzt, wo wir mit freundlicher Unterstützung von Frau Dr. Puri Roh-GDLs (**Gas Diffusion Layer**), wie sie zur Herstellung von Gasdiffusionsmedien für Brennstoffzellen benutzt werden, erhalten haben. Diese Roh-Filze weisen keinerlei Beschichtungen (z.B. zur Hydrophobisierung der Oberfläche) auf und sind unverpresst. Das Material ist elektrisch und thermisch leitfähig, was es, wie die Metallschäume, interessant für den Einsatz als Porenkörper-Struktur in der zu entwickelnden Verdampfungskühlung macht. Widerstandsmessungen sollen den Einfluss der Porenkörper auf die Widerstände der Bipolarplatte ermitteln.

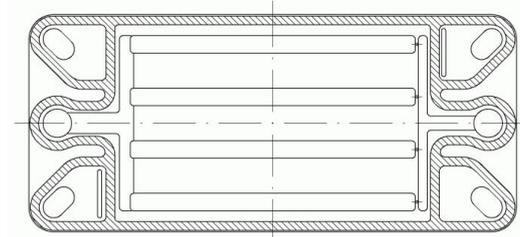
Proben dieser Filze wurden ebenfalls an die TU Bergakademie Freiberg gesandt, damit Untersuchungen hinsichtlich der Porosität der Filze vorgenommen und diese Informationen in den fluiddynamischen Berechnungen berücksichtigt werden können. Die Platten, zusammen mit den Porenkörpern, wurden für erste Tests zum IUTA gebracht, um in dem dort aufgebauten Verdampfungsteststand untersucht zu werden. Da die erste Charge gefräster Platten keine Dichtungsabsätze hatten, konnten die ersten Tests nicht mit einer Abdichtung des Kühlraumes vollzogen werden. Um dennoch Versuchsergebnisse zu erhalten, wurden zunächst ein befeuchteter Porenkörper, später vier befeuchtete Porenkörper, in die Aussparungen der gefrästen Compound-Platten gelegt und diese wiederum in den Verdampfungsteststand eingesetzt. Anschließend wurde die Messvorrichtung auf 100 °C aufgeheizt und das Verdampfen des Wassers in den befeuchteten Porenkörpern beobachtet.

Es war gut zu erkennen, dass das Kühlwasser in den Porenkörper-Strukturen verdampft und sich dieser als Kondensat an der abdeckenden Kontrollscheibe niederschlägt. Anhand des Verlaufs der Kondensatbildung konnte auf die Strömungen innerhalb des Verdampfungsraumes geschlossen werden.

Von Seiten des IUTA wurde eine Nickelschaumfolie mit einer Dicke von etwa 1,5 mm beschafft, die eine weitere Option für eine Porenkörper-Struktur darstellen und mit einer Geometrie wie in Abbildung 4.5 gezeigt, in den Compound-Platten integriert werden kann.

Um weitere Versuche mit einer angepassten Abdichtung des Verdampfungsraumes vornehmen zu können, wurden am ZBT neue Compoundplatten gefräst. Dabei wurde auf die am ZBT etablierte Abdichtungstechnik für wassergekühlte Stacks zurückgegriffen, da entsprechende Dichtungen als Stanzteile zur Verfügung stehen.

Die Variation der Kanaltiefen (0,5 – 1,0 – 1,5 mm) wurde beibehalten und alle Compoundplatten erhielten einen abgesetzten Rahmenbereich in dem die Dichtung der Wasserkühlung eingelegt werden kann:



**Abbildung 4.6:** Ansicht der Compoundplatte mit schraffierter Dichtung, welche am ZBT zur Abdichtung der Wasserkühlseite verwendet wird.

Die folgenden Abbildungen zeigen die neuen Compoundplatten zusammen mit der verwendeten Flachdichtung:



**Abbildung 4.7:** Compound-Platte mit eingelegten GDL-Filzen und aufgelegter Dichtung



**Abbildung 4.8:** Compoundplatte mit vier eingelegten Streifen aus einem Nickelschaum und aufgelegter Dichtung

Am 22. November 2007 trafen sich alle drei Forschungsstellen am IUTA in Duisburg, um die bis dahin erreichten Ergebnisse zu besprechen. Hierbei wurde von Seiten der TU Bergakademie Freiberg auf die Wichtigkeit einer definierten Porenstruktur hingewiesen. Die GDL-Filze konnten nicht hinsichtlich ihrer Porosität untersucht werden. Zudem werden die Filze im Inneren der Compoundplatte gestaucht, was sich auf ihre Porosität auswirkt. Die für Simulationsberechnungen benötigten

Eingabedaten können daher nicht ermittelt werden. Auf der anderen Seite müssen die Porenstrukturen bündig und möglichst dicht mit den Kanalwänden abschließen, damit es nicht zu "Strömungskurzschlüssen" kommen kann. Dabei würde das Kühlmedium nicht durch den Porenkörper fließen, sondern auch daran vorbei strömen, was die fluiddynamische Simulation des Verdampfungsverhaltens erschwert. Vor diesem Hintergrund können ausschließlich Teststandsversuche die Praxistauglichkeit der GDL-Filze für die Verdampfungskühlung nachweisen.

Von Seiten des ZBT wurden weitere der zwischen den Projektpartnern abgesprochenen Versuchsplatten mit Düseneinlässen und vier Verdampfungsräumen frästechnisch hergestellt und dem Projektpartner IUTA für weitergehende Versuche übergeben. Dabei wurden nach wie vor drei unterschiedliche Typen von Platten (mit 0,5 - 1,0 - 1,5 mm Nuttiefe) hergestellt, um verschiedene Porenmaterialien verwenden zu können.

Mit diesen Versuchsplatten und unter Verwendung verschiedener poröser Medien, wurden beim Projektpartner IUTA Versuche zur Verdampfungskühlung durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die verwendete Stanzdichtung eine sichere Abdichtung ermöglichen, was bei den Versuchen mit Wasser als Verdampfungs-Kühlmedium, bei einem Druck von 0,4 bar<sub>abs</sub>, außerordentlich wichtig ist. Dennoch konnte dieser Unterdruck nicht über längere Zeiträume gehalten werden, so dass dieser durch regelmäßigen Einsatz einer Vakuumpumpe immer wieder eingestellt werden musste. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, wurde auch die Verwendung der am ZBT hergestellten, wassergekühlten Spritzgieß-Bipolarplatten in Betracht gezogen. Um das normale Wasserkühlungs-Flowfield für eine Verdampfungskühlung mit einem porösen Medium auszurüsten, wurden die elliptischen Nutquerschnitte rechteckig aufgefräst und für diese spezielle Form ein Stanzwerkzeug beschafft, welches z.B. aus einer Gas-Diffusionslage (GDL) einen geeigneten Porenkörper herstellt:



**Abbildung 4.9:** Spritzgegossene, wassergekühlte Bipolar-Halbplatte mit Dichtung und passendem Porenkörper



**Abbildung 4.10:** Einlassbereich der Versuchsplatte mit eingelegtem Porenkörper und platzierter Dichtung

Diese Versuchsplatten wurden dem Projektpartner IUTA ebenso für Verdampfungsversuche mit verschiedenen Kühlmedien zur Verfügung gestellt und zeigten dabei eine sehr gute Dichtfähigkeit des Kühlmedienraumes. Somit war sichergestellt, dass die von der ZBT Wasserkühlung adaptierte Dichtungstechnik auch bei der Verdampfungskühlung einwandfrei funktioniert. Daher konnte die Konstruktion der Formeinsätze zum Spritzgießen der verdampfungsgekühlten Bipolarplatten auf diese Geometrie festgelegt werden. Die Versuche mit den aufgefästen wassergekühlten Bipolarplatten am Versuchsstand des IUTA zeigten jedoch auch, dass die GDL Filze einen nicht unerheblichen Strömungswiderstand bieten und somit hohe Anforderungen an die Peripheriekomponenten stellen. Aufgrund der geringen Kanalquerschnittsfläche dieses Entwurfs war zudem die Kühlleistung nicht ausreichend. Die Verwendung des GDL-Filzes und der vorhandenen Wasserkühlung erwiesen sich somit als nicht geeignet, weswegen im weiteren Projektverlauf nicht mehr auf diese zurückgegriffen wurde.

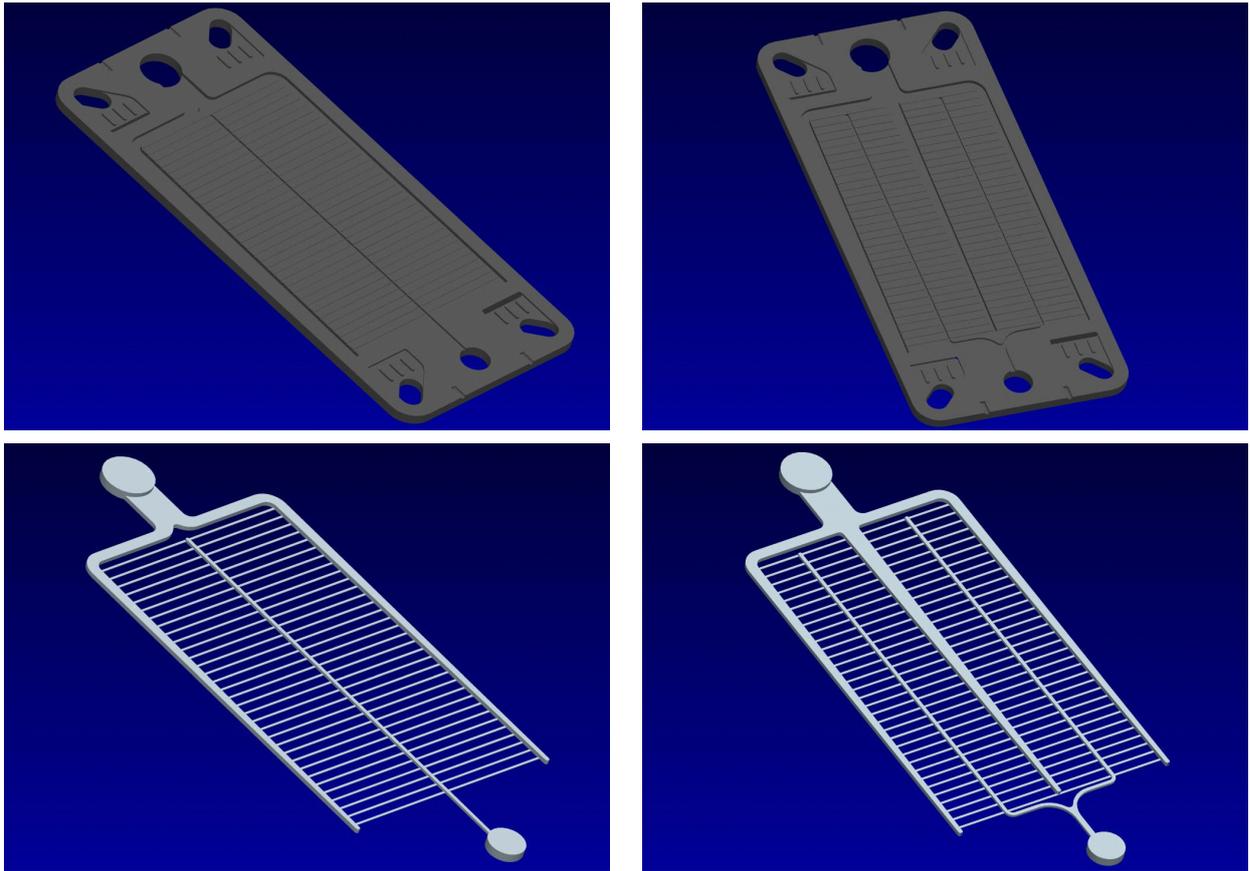
#### 4.1.2 Konzept 2 – Kapillar-Verdampfungsstruktur

Parallel zur Entwicklung der Verdampfungsstruktur mit porösen Medien wurde die Entwicklung einer Bipolarplatte mit feinen Kapillarstrukturen zur Verdampfungskühlung favorisiert. Die Nutzung von Kapillarkanälen gegenüber porösen Medien bietet nach Überlegungen der ersten Projekttreffen folgende Vor- und Nachteile:

**Tabelle 4.1:** Vergleich der Vor- und Nachteile eine Kapillarstruktur-Kühlung

<b>Vorteile</b>	<b>Nachteile</b>
<p>Keine zusätzlichen Einlegeteile. Im Spritzguss lassen sich feine Strukturen abbilden. Die für den elektrischen Kontakt wichtige interne Kontaktierungsfläche zwischen den beiden Bipolar-Halbplatten wird nicht durch großflächige Einlegeteile eingeschränkt. ⇒ Geringere Widerstände der Bipolarplatte führen zu einem besseren Systemwirkungsgrad der Brennstoffzelle.</p>	<p>Massenproduktionsfertigung wird erheblich aufwändiger, da die notwendige Nachbearbeitung der Kühloberfläche deutlich genauer ausfallen muss, zumal die kleinen Kühlkanalquerschnitte keine großen Toleranzschwankungen aufweisen dürfen. Die fluiddynamische Berechnung des Verdampfungsverhaltens ist seitens der Forschungsstelle TU Bergakademie Freiberg nicht optimal zu bearbeiten.</p>

Auf Basis dieser Überlegungen wurden zwei Entwürfe für eine Verdampfungskühlung über Kapillarstrukturen erarbeitet. Diese Entwürfe wurden mittels 3D-CAD angefertigt, damit die 3D-Daten direkt für die fluiddynamische Berechnung benutzt werden können - Abbildung 4.11:



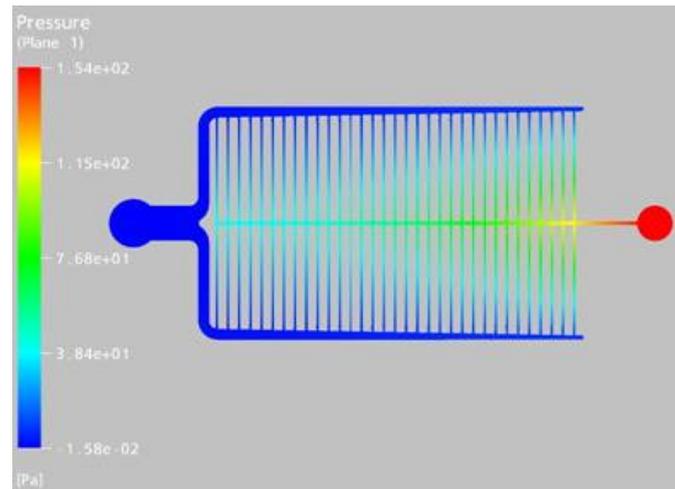
**Abbildung 4.11:** Zwei verschiedene Konzepte zu Kapillar-Kühlstrukturen

Oben: Bipolar-Halbplatte

Unten: Kühlmediumraum

Diese 3D-Daten wurden an die Forschungsstelle TU Bergakademie Freiberg zur fluiddynamischen Untersuchung gesendet.

Sehr interessant waren die Ergebnisse der Berechnungen, um ein tiefer gehendes Verständnis der Medienverteilung in den komplexen Kapillarstrukturen zu erhalten. Es ist gut zu erkennen, dass die Druckverteilung an den Kapillar-Eingängen über die Plattenlänge ungleichmäßig ist, was demzufolge auch zu Änderungen der Verdampfungsneigung und somit der Wärmeaufnahme des Kühlmediums führen wird (siehe Abbildung 4.12).



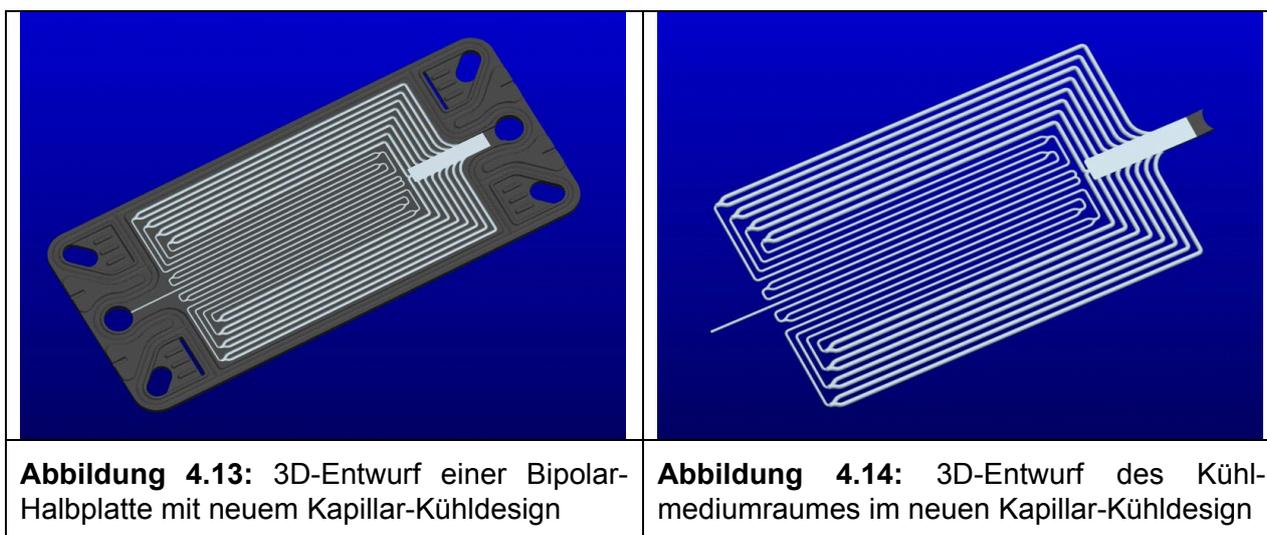
**Abbildung 4.12:** Berechnungsergebnis der TU Bergakademie Freiberg zur "Einkanal" Kapillarkühlung: Druckverteilung einer Ein-Phasen-Strömung im Kühlraum

Die Berechnungen des "Einkanal" wie auch des "Doppelgabel" Designs zeigten deutliche Inhomogenitäten des Druckverlaufs einer Ein-Phasen-Strömung. Der Hintergrund zur Entwicklung solcher Kapillar-Kühlstrukturen seitens des ZBT liegt im einfacheren Aufbau der Bipolarplatten sowie in der Notwendigkeit, eine möglichst große Kontaktfläche in der Kühltrenebene der Bipolarplatte zu realisieren. Großflächige Aussparungen innerhalb der Bipolarplatte zur Integration poröser Körper bewirken relativ kleine Kontaktflächen der Bipolar-Halbplatten zueinander. Dies würde dazu führen, dass der interne Kontaktübergangswiderstand signifikant steigt, was sich dementsprechend negativ auf den Gesamtwiderstand der Bipolarplatte und damit auf die Stackperformance auswirken wird.

Aufgrund der Erkenntnisse der Strömungssimulation und ausgiebiger Diskussion im projektbegleitenden Ausschuss wurde entschieden, die ersten beiden Entwürfe nicht zu realisieren.

Daraufhin wurde seitens des ZBT eine neue Kapillar-Verdampfungsstruktur entwickelt. Dieses Design sieht vor, dass das Kühlmedium über lediglich eine Kapillare in die Kühlfläche geleitet wird. Die Kapillare wird mehrfach aufgespaltet, so dass in den Auslassbereich insgesamt 16 Kapillaren münden. Zudem vergrößert sich der Kapillarquerschnitt im Auslassbereich, wodurch die Gesamt-Querschnittsfläche der 16 Auslasskapillaren um den Faktor 44,4 größer ist als der Einlasskapillarquerschnitt.

Die Grundlage zu diesem Entwurf bildet die Modell-Idee ein Kühlmedium-Gemisch (z.B. aus Ethanol und Wasser) oder aber reines Ethanol mittels Pumpe in die Brennstoffzelle zu fördern und die Kanalquerschnittsvergrößerung zu nutzen, um bei entsprechend geringem Druck im Kühlmedium, Verdampfungen zu erreichen. Dabei soll jedoch nicht das komplette Kühlmedium verdampfen, sondern nur ein bestimmter Anteil, so dass es zu einem Zwei-Phasen-Gemisch im Kühlmedium kommt, das auch zweiphasig aus der Brennstoffzelle tritt. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen den neuen Kapillarkühlungs-Entwurf:



Durch das Zwei-Phasen-Gemisch soll sichergestellt werden, dass die entstehenden Gasblasen durch die flüssige Phase aus dem Stack geleitet werden. Der Entwurf basiert auf dem wassergekühlten Bipolarplatten-Konzept des ZBT und kann damit wiederum auf die vorhandenen Dichtungen zurückgreifen. Alle weiteren Plattenabmessungen sowie Position und Größe der Medienführungslöcher sind mit dem ZBT-Plattendesign identisch. Dieser Umstand ist besonders für die Integration des Designs in die bestehende Spritzgießtechnik, ebenso wie für die spätere Assemblierung der Platten zum Brennstoffzellen-Stack von großer Bedeutung.

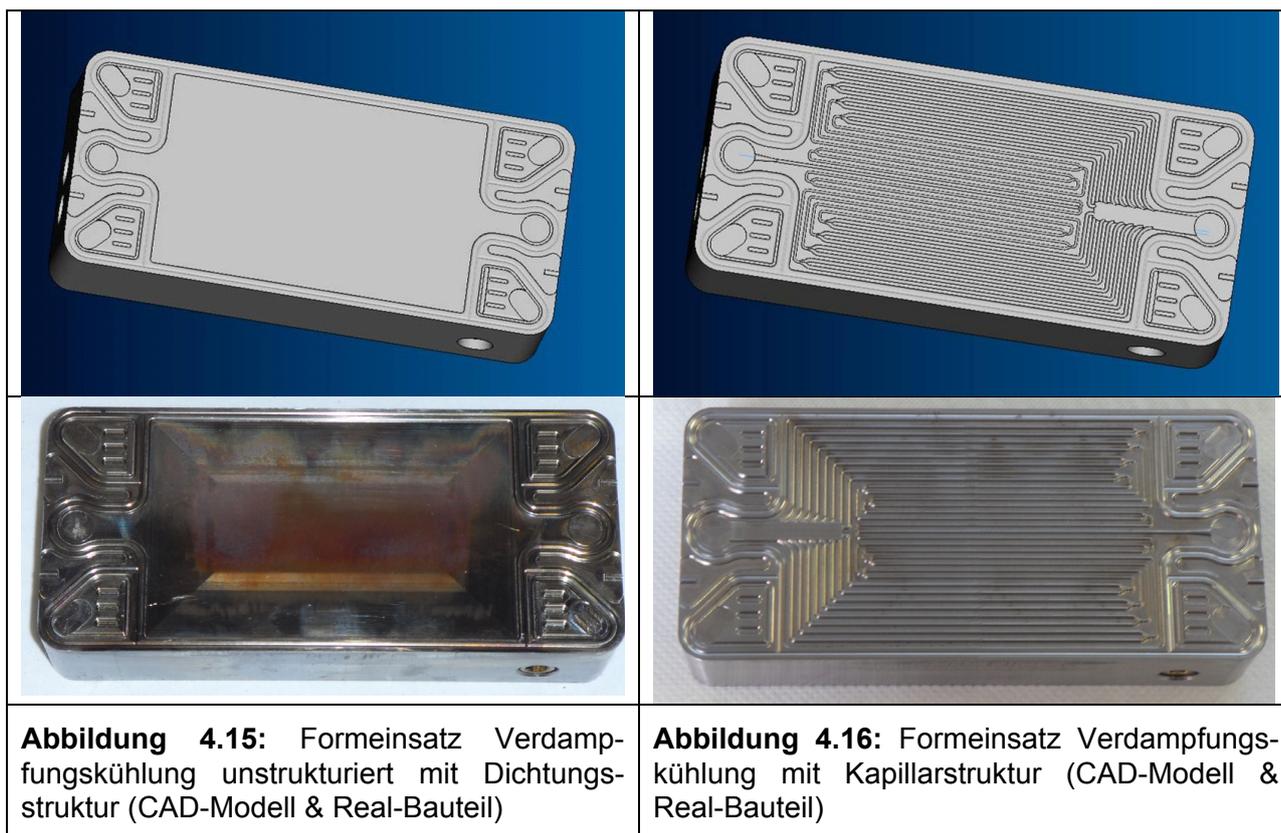
Der sicherlich größte Nachteil dieses Entwurfes liegt in den sehr feinen und komplexen Kanal- sowie Stegstrukturen, die nur eingeschränkt im Kleinserienmaßstab per CNC-Fräsung herzustellen sind. Da zudem eine hohe Geometriegenauigkeit notwendig ist, um ein präzises Übereinanderliegen der Kühlkapillaren zu gewährleisten, bietet die spritzgießtechnische Umsetzung dieses Entwurfes besondere Vorteile. Am ZBT kann dieses Design, sofern ein entsprechender

Werkzeug-Formeinsatz für die Düsenseite vorhanden ist, spritzgießtechnisch in einer größeren Stückzahl umgesetzt werden und Versuche nicht nur an wenigen, sondern direkt an einer größeren Anzahl von Platten, bis hin zu einer funktionierenden Brennstoffzelle durchgeführt werden.

## **4.2 Spritzgießen verdampfungsgekühlter Bipolarplatten**

Zum Spritzgießen verdampfungsgekühlter Bipolarplatten wurden entsprechende Formeinsätze beschafft. Ein Formeinsatz enthält die in Abschnitt 4.1.2 dargestellte Kapillar-Verdampfungsstruktur. Der zweite Formeinsatz wurde, abgesehen von den Geometrien, welche zum Abdichten benötigt werden, unstrukturiert ausgeführt. Diese Ausführung war zwingend notwendig, da andernfalls ein spaltfreies Einbringen von Porenkörpern, welches laut Simulationen für die Funktion essentiell ist, nicht realisierbar wäre. Spritzgießtechnisch können nur Strukturen realisiert werden, welche über Entformungsschrägen und Verrundungen verfügen. Da die Porenkörper nicht als negativ einer solchen Geometrie zugeschnitten werden können, sondern nur mit orthogonalen Flankenwinkeln, müssen die benötigten Geometrien spanend in die partiell unstrukturierten, spritzgegossenen Bipolarplatten eingebracht werden. Diese Vorgehensweise birgt den zusätzlichen Vorteil, dass für Versuchszwecke nahezu beliebige Strukturen eingefräst werden können. Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16 zeigen die beschafften Formeinsätze.

Die Formeinsätze wurden so ausgelegt, dass 1,5 bis 3 mm Dicke Bipolarplatten hergestellt werden können. Die unstrukturierten Bipolarplatten wurden in 3,0 mm Stärke hergestellt, um die Gefahr von Undichtigkeiten und Permeationslecks aufgrund des Einfräsens von Strukturen zu vermeiden. Die Bipolarplatten mit Kapillarstruktur konnten mit 2,5 mm dünner ausfallen, da eine spannende Bearbeitung der Kernstruktur entfällt und die Nuttiefen geringer ausfallen. Eine weitere Reduktion der Plattendicke wäre möglich, ist jedoch nicht zweckmäßig, da bereits in der gewählten Ausführung 200 bar höhere Einspritzdrücke benötigt wurden, als bei der luftgekühlten ZBT-Standardvariante, um eine vollständige Formfüllung zu erreichen.



Die derart konfektionierten Werkzeugvarianten konnten auf der neuen Spritzgießmaschine KM 500 (Abbildung 4.17) erfolgreich betrieben werden.

Die Variante mit Kapillarstruktur musste manuell aus dem Werkzeug entnommen werden, da für den Angriff von Sauggreifern keine ausreichende Fläche zur Verfügung stand.

Die unstrukturierte Variante konnte mittels Linearroboter und Sauggreifern aus dem Werkzeug entnommen und bis zur Bandablage gehandhabt werden. Somit war eine präzise reproduzierbare Anfertigung der Bipolarplatten sichergestellt.



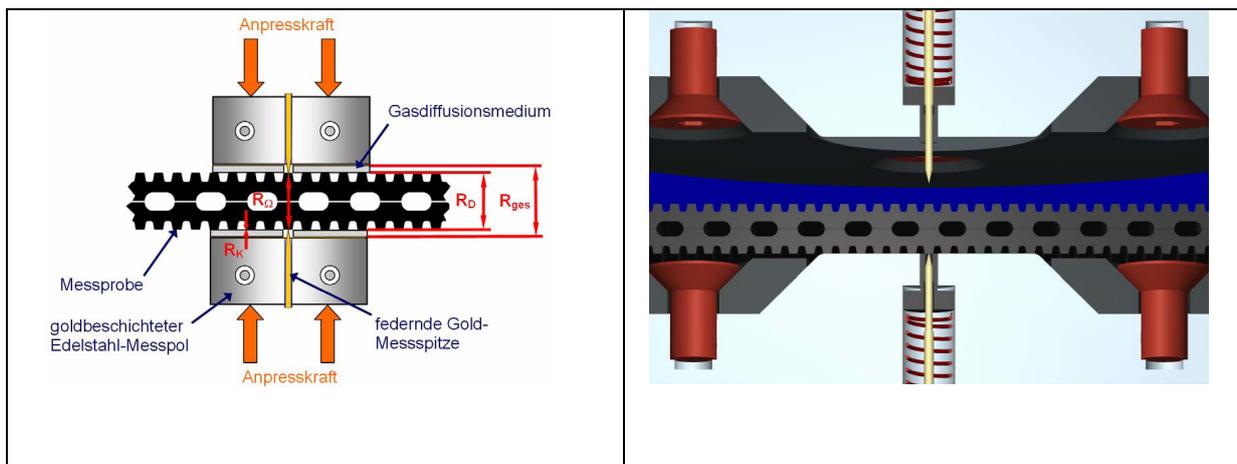
**Abbildung 4.17:** Spritzgießmaschine KM500 mit Linearroboter LR 150

### **4.3 Qualitätssicherung der Bipolarplatten**

Bevor Bipolarplatten in einem Brennstoffzellenstack eingesetzt werden, durchlaufen sie eine Reihe von Qualitätssicherungsmaßnahmen, um die wichtigsten Eigenschaften zu charakterisieren. Die Charakterisierung erfolgt je nach Relevanz vor und / oder nach Nachbearbeitungsmaßnahmen. Allen voran steht die Bestimmung der elektrischen Eigenschaften (Widerstände) der Bipolarplatten, da diese die Performance der Brennstoffzelle direkt beeinflussen. Daneben ist aber auch die Bestimmung von Form- und Lagetoleranzen mittels eines 3D-Messsystems von großer Bedeutung für die Qualitätssicherung.

### 4.3.1 Widerstandsmessung

Die Widerstandsmessung der nachbearbeiteten Bipolarplatten stellt ein sehr wichtiges Qualitätskriterium dar. Am ZBT ist eine Messapparatur vorhanden, welche die Widerstände sehr zellrealistisch bestimmt. Die Messung der Widerstände erfolgt durch die Bestimmung des Spannungsabfalls bei einem konstant an der Probe angelegtem Strom. Die Probe wird zwischen zwei in Ihrer Anpresskraft durch Druckluft linear steuerbarer, Goldpole ( $A = 4 \text{ cm}^2$ ) eingespannt. Auf den Polen wird zuvor jeweils ein Gasdiffusionsfilz, dessen Anpresskraft- bzw. druckabhängiger Widerstandsverlauf bekannt ist, appliziert, wodurch die Messstrecke sehr nah an der realen Widerstandskette (GDL-BPP-BPP-GDL) in einer Brennstoffzelle orientiert ist. Der Strom wird über die Goldpole über die gesamte Messstrecke geführt und durch einen Galvanostaten konstant gehalten. Durch die Goldpole und die GDL sind mittig, elektrisch isoliert, jeweils zwei federnd gelagerte, zueinander coaxial stehende Messspitzen geführt, welche selbst stromlos sind (Abbildung 4.18).



**Abbildung 4.18:** Modelldarstellungen der Messeinheit mit assemblierten Bipolar-Halbplatten

Durch diesen Aufbau lassen sich folgende Widerstandswerte bestimmen:

**Gesamtwiderstand  $R_{ges}$ :**

Dieser beschreibt den Widerstand der gesamten Messstrecke.

**Durchgangswiderstand  $R_D$ :**

Beschreibt den Widerstand der Probe (= Gesamtwiderstand abzüglich der GDL-Widerstände)

**Bulkwiderstand  $R_\Omega$ :**

Dieser beschreibt den Widerstand, welcher über die passiv messenden, in die Bipolarplatten eindringenden Messspitzen gemessen wird. Des Weiteren beinhaltet dieser an zwei assemblierten BPP gemessene Bulkwiderstand den internen Kontaktübergangswiderstand der BPP, der durch die Messung des Bulkwiderstandes einer einzelnen Halbplatte bestimmt werden kann.

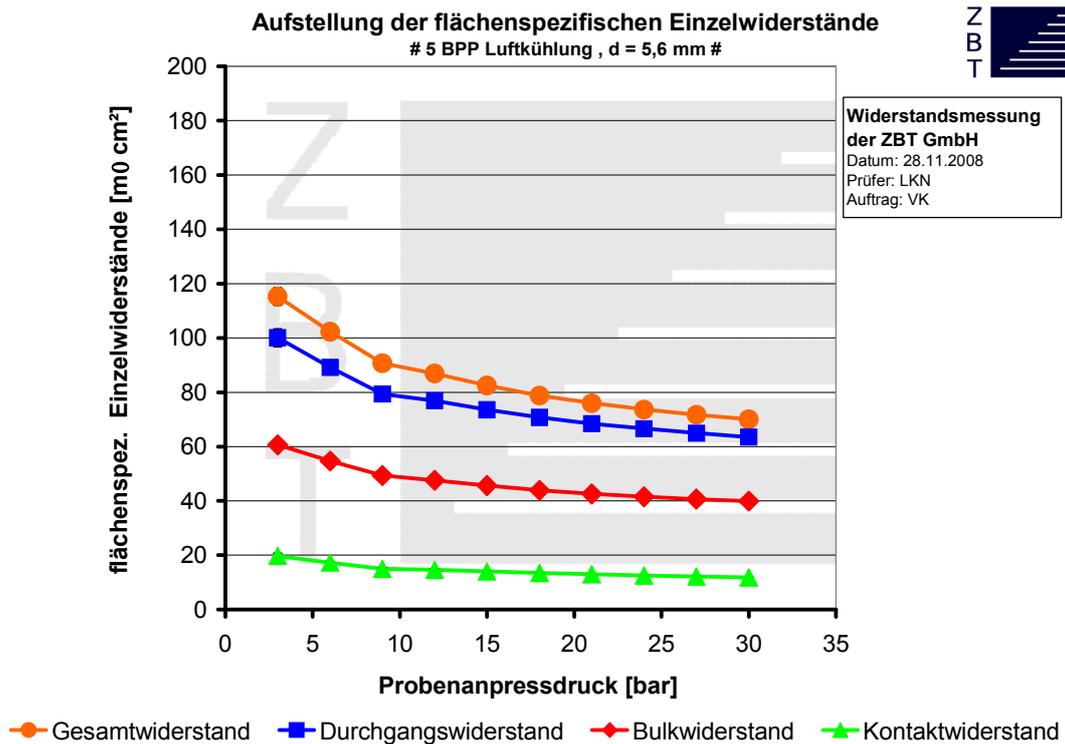
**Kontaktwiderstand  $R_K$**

Dieser beschreibt den einfachen Kontaktwiderstand von GDL zu BPP.

$$\left[ R_K = \frac{R_D - R_\Omega}{2} \right]$$

Softwaregesteuert werden verschiedene Anpressdrücke (3-30 bar) angefahren. Bei jedem Druck werden 4 verschiedene Ströme (0.5, 1, 1.5, 2 A) angelegt und der Spannungsabfall an den Messpolen sowie den Messspitzen gemessen. Im Anschluss werden die Widerstände gemäß dem ohmschen Gesetz berechnet und jedem Druck ein aus vier Werten gemittelter Widerstand zugeordnet. Darüber hinaus werden in einer Messreihe fünf Bipolarplatten gleichen Typs vermessen, um Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten.

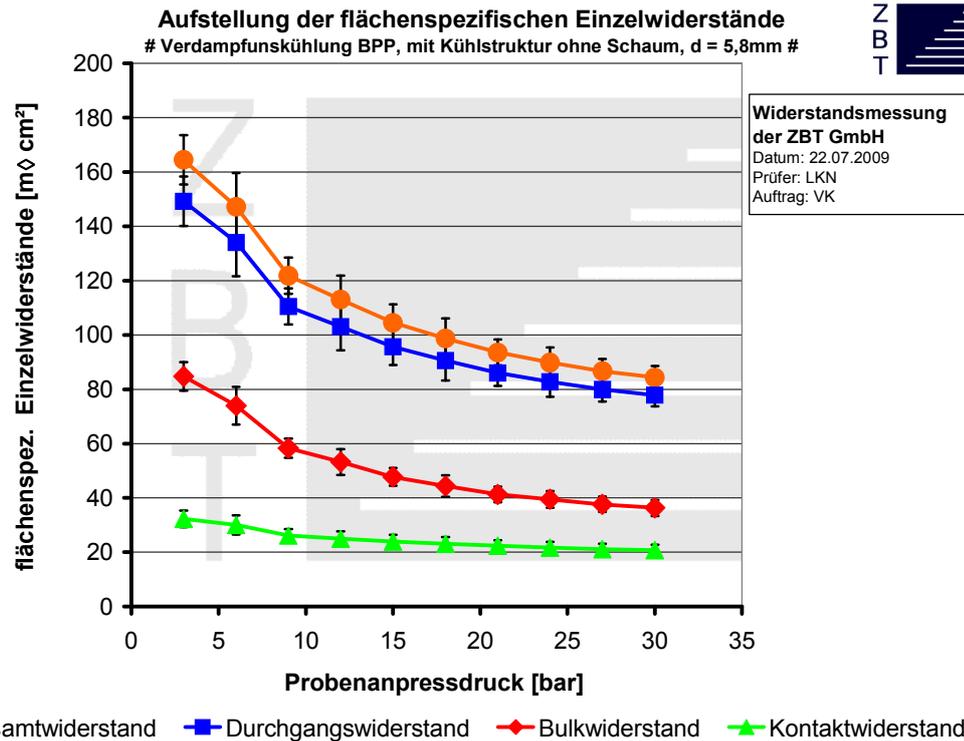
Nachfolgend ist die Widerstandsmessung einer luftgekühlten ZBT-Standard Bipolarplatte dargestellt, um als Referenz zur Begutachtung verdampfungsgekühlter Bipolarplatten zu dienen (Abbildung 4.19).



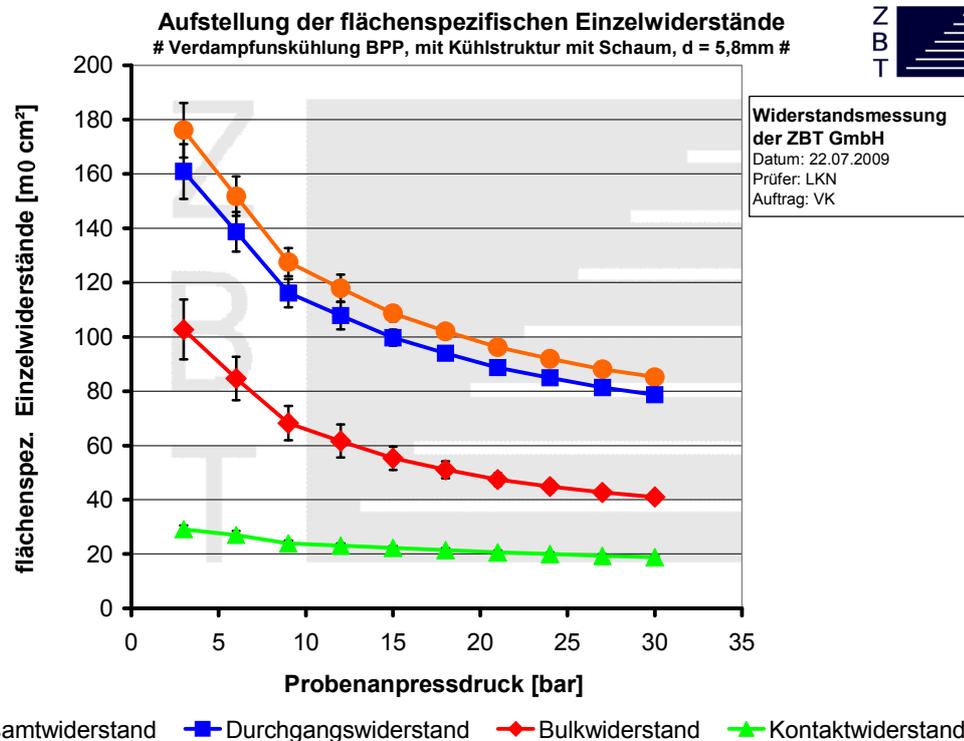
**Abbildung 4.19:** Widerstände von 5 nachbearbeiteten, luftgekühlten Bipolarplatten

Deutlich zu erkennen ist der anpressdruckabhängige Widerstandsverlauf aller Widerstandswerte. Als Referenz wird am ZBT der Gesamtwiderstandswert bei 21 bar herangezogen. Dieser sollte unter  $100 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  liegen. Zudem sollte die Streuung der Werte möglichst gering sein, weil dies auf eine homogen reproduzierbare Qualität der Bipolarplatten hinweist. Der Widerstandsverlauf der spritzgegossenen und unstrukturierten Bipolarplatten, vor dem Einfräsen der Verdampfungsstrukturen ist, trotz der größeren Kontaktfläche, nahezu deckungsgleich mit den Widerständen der luftgekühlten Variante und wird deshalb nicht gesondert dargestellt. Der Verlauf deutet daraufhin, dass die Bipolarplatten geringfügig verzogen sind und sich dadurch erst bei höheren Anpressdrücken besser kontaktieren. Zudem sind die Platten mit 3 mm, etwa 0,3 mm dicker als die luftgekühlte Variante, was zu höheren Widerständen und zu einer geringeren mechanischen Flexibilität führt.

Nach Einfräsen der Verdampfungsstrukturen zur Aufnahme von Porenkörpern steigen die Widerstandswerte deutlich über das Niveau der luftgekühlten Bipolarplatten (Abbildung 4.20), was auf die reduzierte Kontaktfläche zurückzuführen ist. Der definierte Grenzwert von  $100 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$  Gesamtwiderstand bei 21 bar wird jedoch eingehalten.



**Abbildung 4.20:** Widerstände von 5 nachbearbeiteten, verdampfungsgekühlten Bipolarplatten, mit eingefräster Struktur



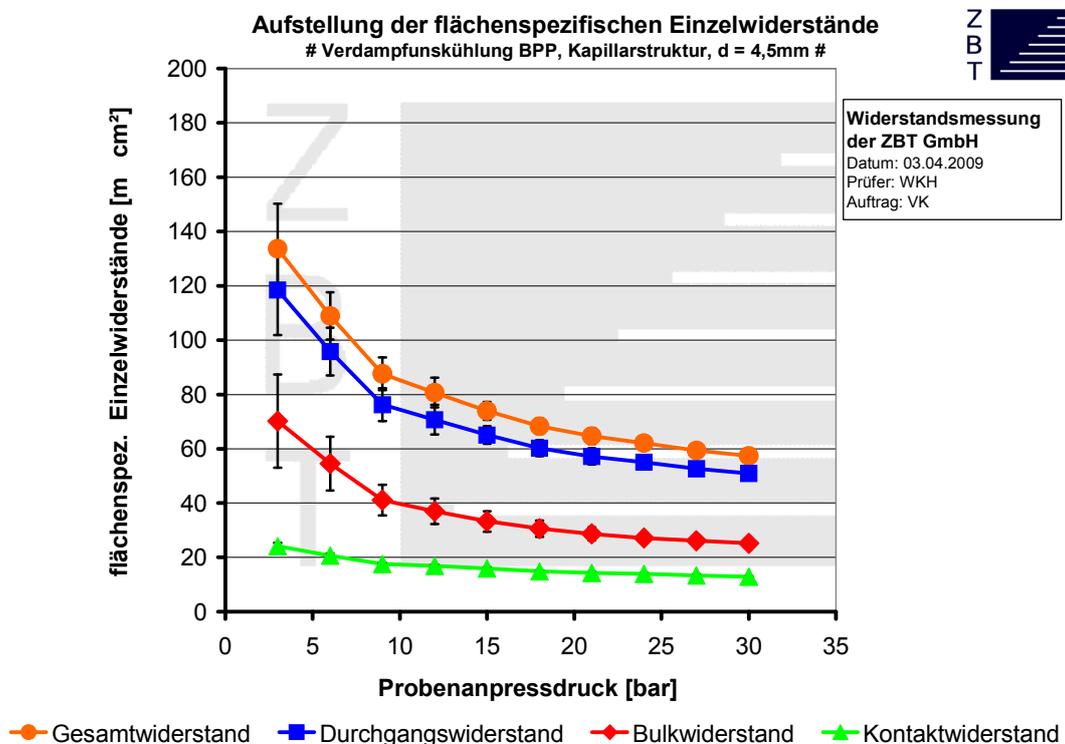
**Abbildung 4.21:** Widerstände von 5 nachbearbeiteten, verdampfungsgekühlten Bipolarplatten, mit eingefräster Struktur und eingelegten Nickelschäumen

Ein weiterer zu untersuchender Aspekt ist der Einfluss von eingelegten Porenkörpern auf die Widerstandscharakteristik der Bipolarplatten.

Abbildung 4.21 zeigt den Widerstandverlauf der verdampfungsgekühlten Bipolarplatten unter Verwendung von Nickelschäumen. Der Widerstandsverlauf unterscheidet sich nur geringfügig von dem ohne Nickelschäume. Bei geringen Anpressdrücken werden höhere Widerstände erreicht, was auf nicht vollständig verpresste Nickelschäume zurückzuführen ist. Positiv zu werten ist, dass die Streuungen im Bereich hoher Anpressdrücke abnehmen, was zu präziser reproduzierbaren Ergebnissen führt. Insgesamt stellt sich der Einfluss der elektrisch leitfähigen Nickelschäume auf das Widerstandsverhalten der Bipolarplatte als gering heraus.

Vergleichend mit der Luftkühlung ist der Gesamtwiderstand der verdampfungsgekühlten Bipolarplatte mit Porenkörpern etwa 20 % schlechter. Aufgrund dessen ist mit geringen Performanceeinbußen zu rechnen. Aufgrund des erwarteten besseren Kühlverhaltens sollten diese jedoch wieder ausgeglichen werden.

Abbildung 4.22 zeigt die Widerstandsverläufe der nachbearbeiteten Bipolarplatten mit Kapillarstruktur.



**Abbildung 4.22:** Widerstände von 5 nachbearbeiteten verdampfungsgekühlten Bipolarplatten mit Kapillarstruktur

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Widerstände bei geringen Anpressdrücken höhere Werte und Streuungen aufweisen als die luftgekühlte Variante aus Abbildung 4.19. Mit steigenden Anpressdrücken werden jedoch geringere Widerstände als bei den luftgekühlten Bipolarplatten erreicht. Der Gesamtwiderstand bei 21 bar liegt bei  $65 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ , somit sollte aus Sicht der Widerstände die Performance der verdampfungsgekühlten Variante mit Kapillarstruktur tendenziell besser sein. Die signifikante Anpressdruckabhängigkeit ist auf eine geringfügige Krümmung der Bipolarplatten zurückzuführen, welche nachfolgend durch eine 3D-Messung sichtbar gemacht wurde. Durch steigenden Anpressdruck wird die Krümmung reduziert und somit die Kontaktfläche erhöht, was zu sinkenden Widerständen führt.

### 4.3.2 3D-Geometrie Messung

Zur Kontrolle der Geometrie spritzgegossener und nachbearbeiteter Bipolarplatten setzt das ZBT das optische 3D Messsystem FRT Micro Prof. TTV ein.

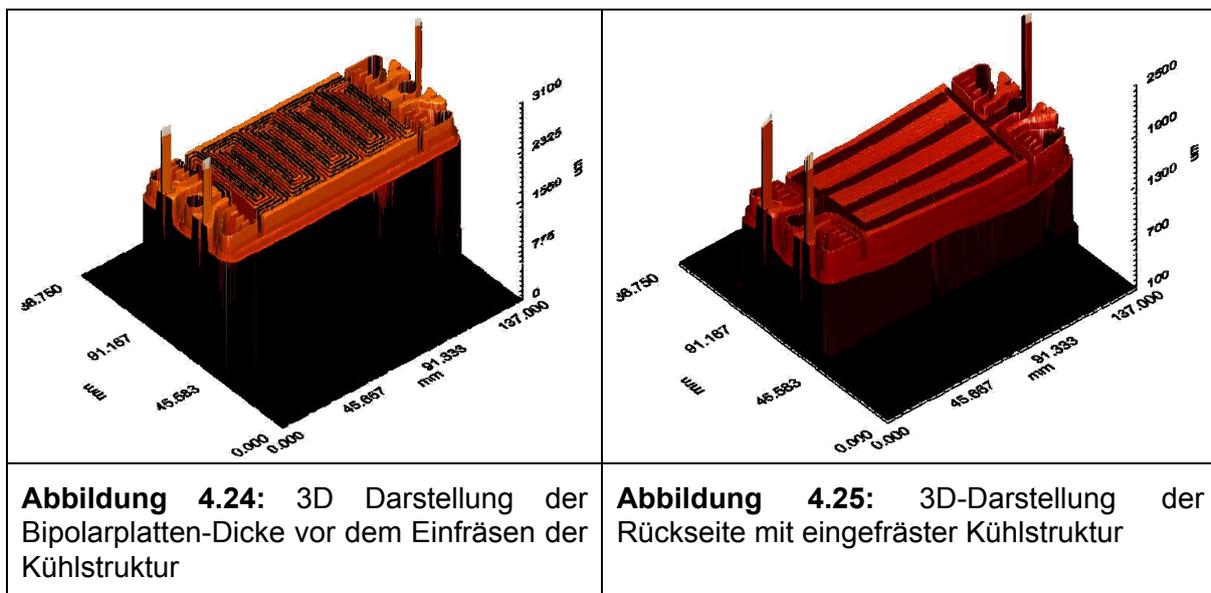


**Abbildung 4.23:** FRT Micro Prof. TTV

Es ermöglicht die beidseitige Messung von Profilen, Konturen und der Topographie. Darüber hinaus ermöglichen exakt gegenüberstehende Sensoren eine Messung der Wandstärke bzw. Probendicke. Die Positioniergenauigkeit in x-/y-Richtung beträgt  $5 \mu\text{m}$ . Die Messgenauigkeit in z-Richtung liegt bei  $100 \text{ nm}$ . Das Messgerät wird verwendet, um zum einen hochauflösende Detailscans von interessanten Bereichen

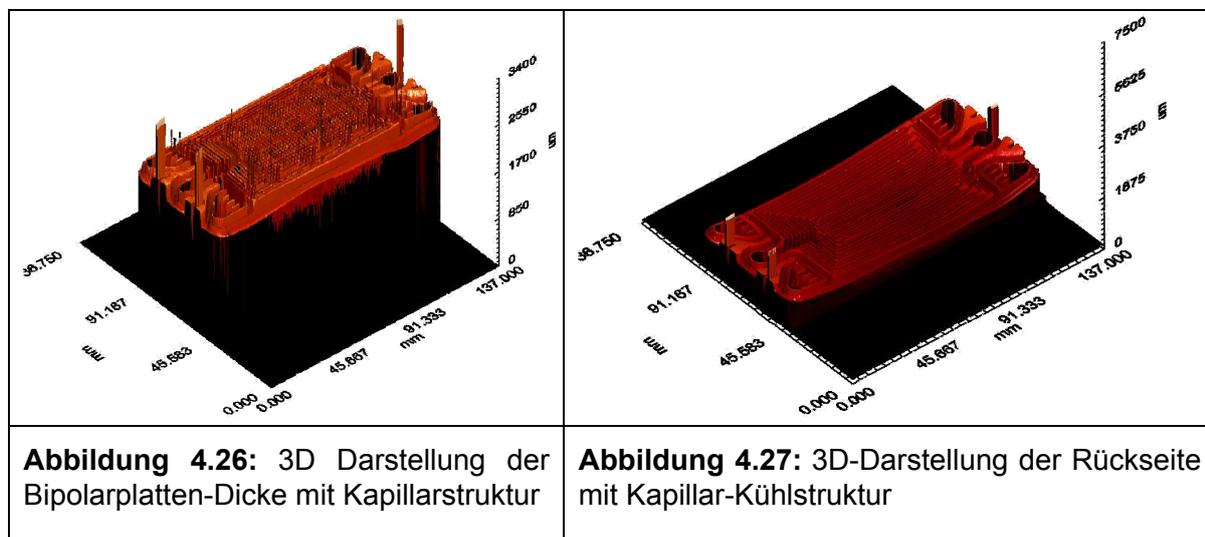
oder ganzen Bipolarplatten vorzunehmen und um zu anderen vorprogrammierte Messungen automatisiert durchzuführen. Die vorprogrammierten Messungen dienen der Ermittlung unterschiedlichster geometrischer Kennwerte, wie Nuttiefen, Plattendicke oder Restwandstärke. Bezüglich Nuttiefen des Flowfields und der Gaszuführungen befanden sich die produzierten und nachbearbeiteten Bipolarplatten innerhalb des Toleranzbereichs der luftgekühlten Bipolarplatten. Eine Performance-Beeinträchtigung seitens dieser Parameter ist somit nicht zu erwarten.

Aufgrund der gemessenen Widerstandsverläufe ist jedoch mit einer leichten Krümmung der Bipolar-Halbplatten zu rechnen. Abbildung 4.24 zeigt einen sehr homogenen Dickenverlauf der Bipolarplatte, was auf eine präzise Nachbearbeitung zurückzuführen ist. (Die drei zu sehenden Peaks sind Auflagepunkte.) Dies ist wichtig, um eine homogene Flächenpressung zu erreichen.



In Abbildung 4.25 wird die Krümmung der Halbplatte aufgrund der überhöhten Darstellung deutlich sichtbar, welche dazu führt, dass das Widerstandsverhalten nicht optimal ist. Die leichte Krümmung ist auf den Auswerfprozess und auf das Abkühlverhalten nach dem Spritzgießen zurückzuführen. Da leichte Verzugserscheinungen beim Spritzgießen von Formteilen unumgänglich sind und keine weiteren Nachteile ersichtlich sind, werden die produzierten Bipolarplatten als Gutteile eingestuft und können zum Aufbau eines Brennstoffzellenstacks herangezogen werden.

Die Bipolarplatten mit Kapillarstruktur weisen gleichfalls gute Dickentoleranzen auf (Abbildung 4.26), was im Stack eine homogene Flächenpressung gewährleistet.



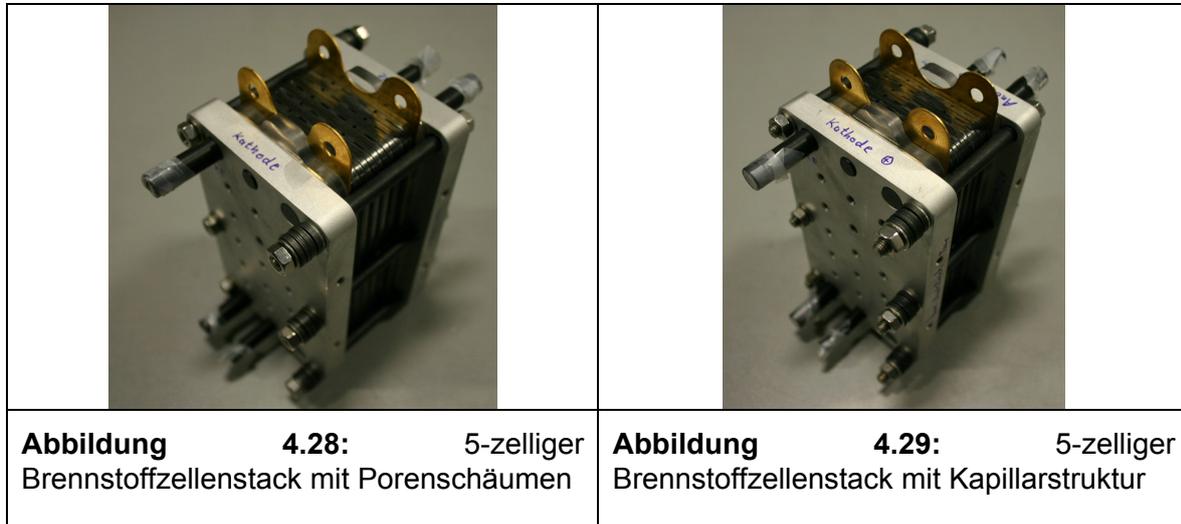
Wie aus den Widerstandsmessungen erwartet ist auch die Bipolarplatte mit Kapillarstruktur verzogen (Abbildung 4.27). Bei dieser Variante kam erschwerend hinzu, dass die Kühlseite sehr fein strukturiert ist, was bereits beim Öffnen des Spritzgießwerkzeugs zu Verformungen führen kann.

Der negative Einfluss verformter Platten kann bei dieser Variante drastischer sein als beim Einsatz von Porenkörpern, weil das Kapillarprinzip darauf angewiesen ist, dass die Platten dicht zueinander abschließen, um Querströmungen zu vermeiden. Querströmungen würden dazu führen, dass die Randbereiche der Bipolarplatte, welche erst über mehrere Umlenkungen erreicht werden, nicht mehr mit Kühlmedium versorgt werden und somit überhitzen. Diesen Umstand gilt es mit Hilfe von thermographischen Aufnahmen zu untersuchen.

#### 4.4 Stackaufbau

Im Rahmen des Projektes wurden zwei verschiedene Designs von Verdampfungsstrukturen erarbeitet und die benötigten Bipolarplatten erfolgreich spritzgegossen und bearbeitet. Zum Abgleich der Vorversuche und Simulationen mit dem Realverhalten müssen Brennstoffzellenstacks aufgebaut und untersucht werden. Da am ZBT zu Versuchszwecken in der Regel 5-zellige Brennstoffzellenstacks aufgebaut werden, sollte dies auch zum Test der

Verdampfungskühlung der Fall sein. Somit wurde je ein 5-zelliger verdampfungsgekühlter Brennstoffzellenstack mit Kapillarstruktur bzw. Nickelschäumen aufgebaut.



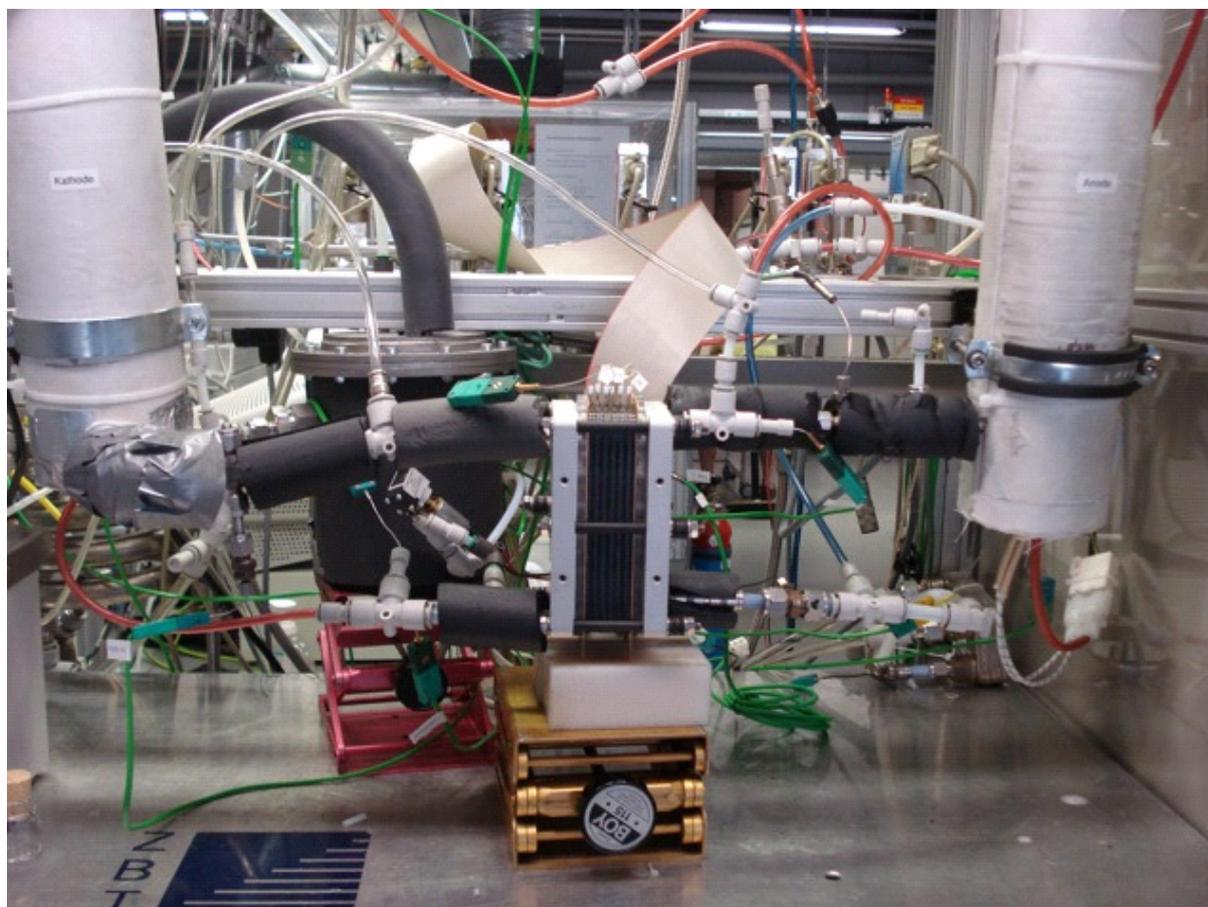
Darüber hinaus wurde ein zusätzlicher verdampfungsgekühlter Stack aufgebaut, welcher aus Bipolarplatten mit eingefräster Struktur besteht. Die Geometrie ist, bis auf das Weglassen der Düsen, identisch mit der Bipolarplatte für Metallschäume. Beim Aufbau des Stacks wurde zusätzlich auf die Montage von Metallschäumen verzichtet. Hintergrund ist, dass die Düsen den Durchfluss hindern und einen Strömungswiderstand darstellen, wodurch eine erhöhte Pumpleistung erforderlich wird. Ebenso verhält es sich mit den Metallschäumen, weshalb sie bei diesem Stack weggelassen werden. Wird der Stack senkrecht aufgestellt und mit einem konstanten Kühlmediumfluss beaufschlagt ist zu erwarten, dass die Dampfblasen nach oben steigen. Ist die Kontaktfläche der Bipolarplatte homogen mit flüssigem Kühlmittel benetzt, kann davon ausgegangen werden, dass sich eine gleichmäßige Temperaturverteilung einstellt. Zudem gibt dieser Stack Aufschluss über die Wirkung der Metallschäume bei der Verdampfungskühlung.

## 4.5 Versuchsdurchführung

### 4.5.1 Versuchsaufbau

Für die Durchführung von Testläufen der drei 5-Zeller mit jeweils unterschiedlicher Plattenstruktur für die Verdampfungskühlung wurde ein Teststand des ZBT umge-

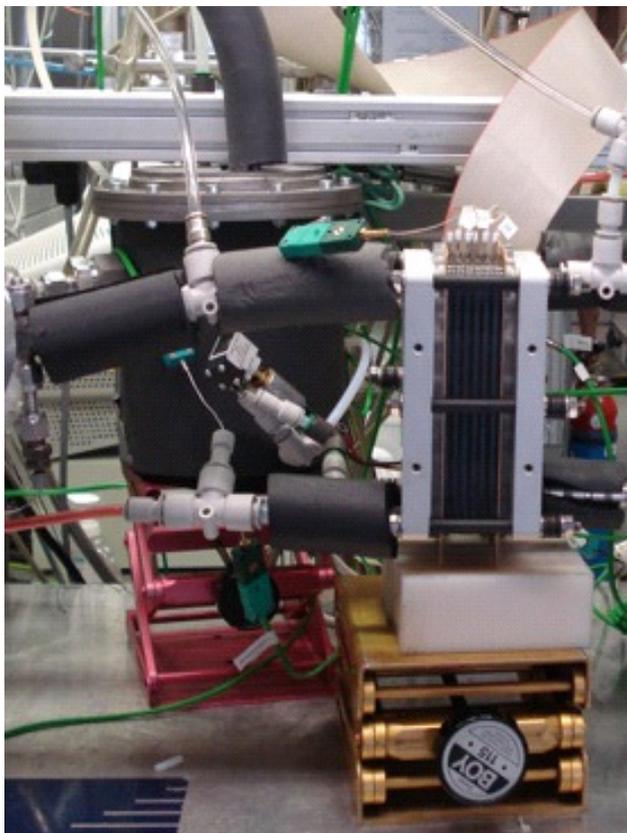
baut und an die benötigten Versuchsbedingungen angepasst (Abbildung 4.30). Der Kühlkreislauf besteht aus einem Kondensator vom IUTA, einer Membranpumpe sowie einem Wasserbad zur Aufheizung des Kondensators.



**Abbildung 4.30:** Versuchsaufbau Gesamtübersicht

Im unteren Bereich des Kondensators befindet sich der Ausgang für den Kühlvolumenstrom. Hinter dem Ausgang wurde die Membranpumpe integriert, die das Kühlmedium zum Eingang des Stack fördert. Der Stack ist so aufgestellt, dass sich der Eingang für das Kühlmedium am unteren Bereich des Stacks befindet, so dass das Kühlmedium demnach im oberen Bereich des Stacks wieder austreten kann. So kann gewährleistet werden, dass sich das leichtere Flüssig/Dampfgemisch jeweils aufwärts ausbreitet und das Kühl Flowfield gleichmäßig durchströmt. Im Kondensator befindet sich eine Heizspirale, durch die Wasser geleitet wird. Das Wasser wird durch ein angeschlossenes Wasserbad mit integrierter Pumpe erhitzt

und somit der Kondensator auf die gewünschte Temperatur vorgeheizt. Abbildung 4.31 zeigt einen Ausschnitt des Teststandes mit Kondensator und Stack.



**Abbildung 4.31:** Kondensator und Stack

Die Temperatur des Wassers liegt bei Austritt aus dem Wärmebad bei 78 °C. Als Kühlmedium für den Stack wird Ethanol verwendet, da der Siedepunkt dieses Alkohols um 78 °C liegt. Dieser Siedepunkt entspricht in etwa der optimalen Betriebstemperatur der PEMFC. Der Kondensator wird bis zur Hälfte mit Ethanol befüllt. Am Kondensator werden Temperatur- und Druckmessstellen integriert. Weitere Messstellen befinden sich direkt vor, unter und hinter dem Stack im Kühlkreislauf. Die Membranpumpe fördert 760 g Ethanol pro Stunde. Somit kann durch den Ethanolvolumenstrom eine maximale Kühlleistung von ca. 176 W erzielt werden.

Die Versorgung mit Wasserstoff und Druckluft wird standardmäßig durchgeführt. Vor Eintritt von Wasserstoff und Luft werden die Gase durch einen Verdampfer befeuchtet und dann auf die Zelle geleitet. Temperaturmessstellen wurden am Ein- und Austritt der Zelle integriert. Eine weitere Temperaturmessstelle wird in eine

Bohrung einer Bipolarplatte in der Stackmitte eingelassen. Die gesamte Messanalytik und Betriebsdurchführung wird mit LabView vorgenommen und ausgewertet.

Das Gasflowfield der Bipolarplatten sowie die MEA und alle weiteren Stackkomponenten unterscheiden sich nicht vom Standarddesign der ZBT-Stacks.

Bei allen Versuchen werden Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera vorgenommen, um die Temperaturverteilung an der Oberfläche des Stacks zu beobachten.

#### 4.5.2 Testlauf

Ein erster Testdurchlauf zur Überprüfung der Dichtheit und Betriebsfähigkeit der Zelle ergab Probleme beim Kontakt des Ethanol mit der Membran. Aufgrund des konstruierten Kühlflowfieldprofils ließ sich an einigen Stellen der Kontakt mit Ethanol und der Membran nicht verhindern. Die Membran ist nicht resistent gegen Ethanol und somit ergaben sich Ablösungen der Membran, die in den SMC-Verbindern festgestellt wurden. Abbildung 4.32 zeigt diese Ablagerungen.



Abbildung 4.32: Ablagerung der MEA

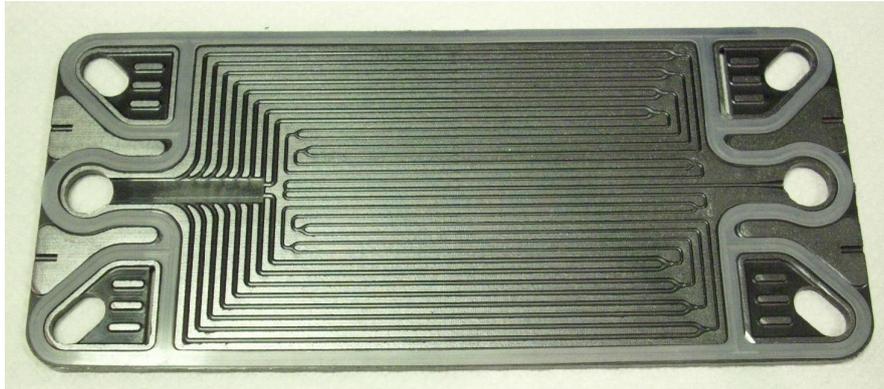
Es bleibt allerdings festzuhalten, dass diese Kontaktstellen nur lokal und außerhalb der aktiven Flächen auftraten, so dass die Performance der Zelle nicht beeinflusst wurde.

### 4.6 Ergebnisse

#### 4.6.1 Versuchsdurchlauf Kapillarstruktur

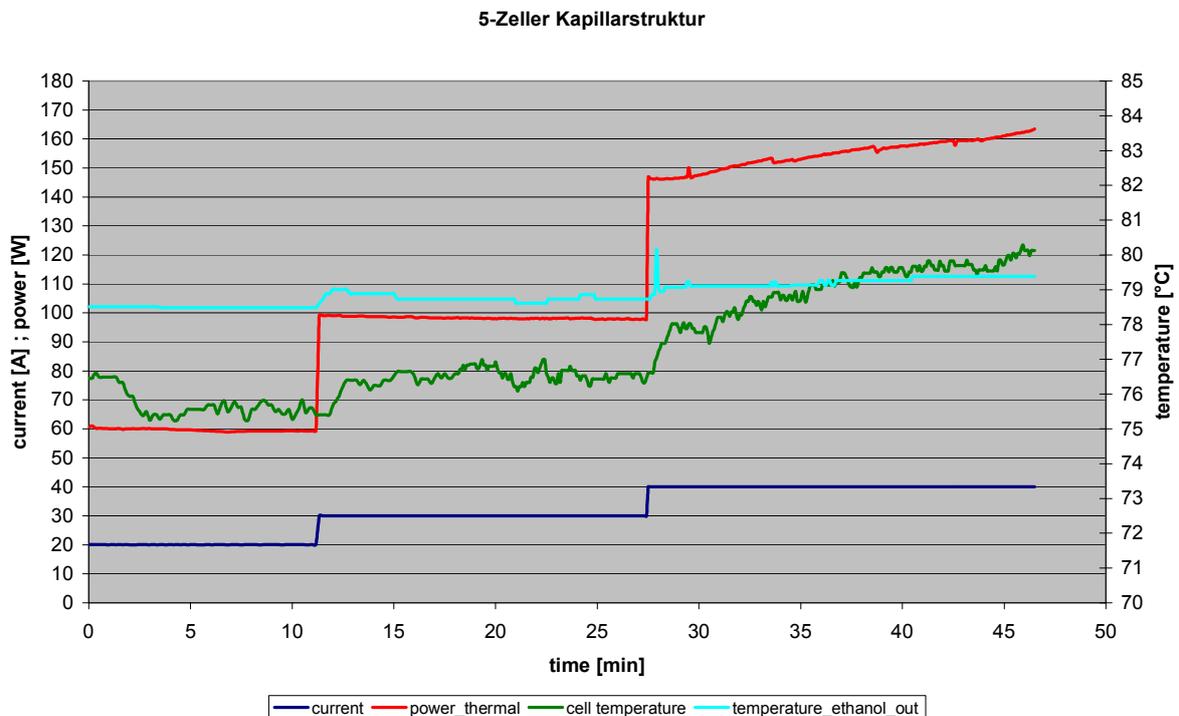
Zu Beginn des Versuches wurde das Wasserbad erhitzt und somit der Kondensator vorgewärmt. Anschließend wurde Wasserstoff und Luft auf den Stack gegeben und

ein geringer Strom gezogen. Abbildung 4.33 zeigt die im Stack befindlichen Platten mit Kapillarstruktur.



**Abbildung 4.33:** Kapillarstruktur

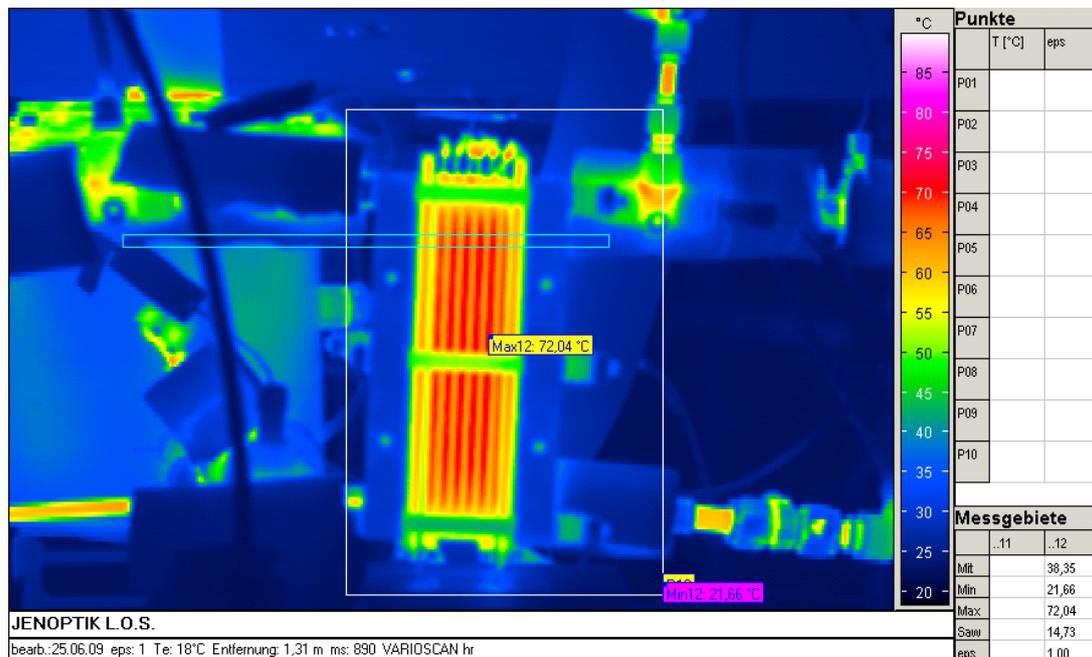
Als der Kondensator eine konstante Temperatur aufwies, wurde die Membranpumpe gestartet. Die Stromstärke wurde langsam gesteigert und nachfolgend jeweils gewartet, bis sich ein konstantes Temperaturniveau eingestellt hatte. Wärmebildaufnahmen und Ergebnisse wurden jeweils bei 20, 30 und 40 Ampere aufgezeichnet. Aufgrund der aktiven Fläche des Stacks ergaben sich somit Stromdichten von 400, 600 und 800 mA/cm<sup>2</sup>. In Abbildung 4.34 sind die Versuchsergebnisse mit Kapillarstruktur dargestellt.



**Abbildung 4.34:** Versuchsergebnisse mit Kapillarstruktur

Die Temperatur des Ethanols bei Zelleintritt lag bei allen Versuchen bei ca. 65 °C. Abbildung 4.34 zeigt die Stromstärke, die thermische Leistung, die Ethanolaustrittstemperatur sowie die Zelltemperatur jeweils über die Zeit.

Es ist zu erkennen, dass mit jeweiliger Anhebung der Stromstärke die thermische Leistung sowie die Zelltemperatur ansteigen. Gleiches gilt für die Ethanolaustrittstemperatur. Bei 400 und 600 mA/cm<sup>2</sup> stellt sich ein konstantes Temperaturniveau ein. Bei 800 mA/cm<sup>2</sup> steigen allerdings die Zelltemperatur und somit auch die Thermische Leistung stark an. Die Zelle kann nicht mehr ausreichend gekühlt werden. Auch die Ethanolaustrittstemperatur erreicht ein Niveau, das sich über der Isothermen Temperatur des Zweiphasengebietes befindet. Somit ist das Ethanol leicht überhitzt. Dieser Zustand ist eigentlich nicht zu erwarten, da die thermische Leistung der Zelle noch unterhalb der maximalen Kühlleistung des Ethanols liegt. Somit lässt sich vermuten, dass die Zelle in bestimmten Bereichen nicht ausreichend gekühlt wird bzw. das Ethanol die Randbereiche der Bipolarplatten nicht erreicht. Bestätigt wird diese Vermutung durch die Aufnahmen der Wärmebildkamera. Abbildung 4.35 zeigt den Stack bei einer Stromdichte von 400 mA/cm<sup>2</sup>. Es ist zu erkennen, dass die Außenfläche des Stacks noch gleichmäßig und ausreichend gekühlt wird.



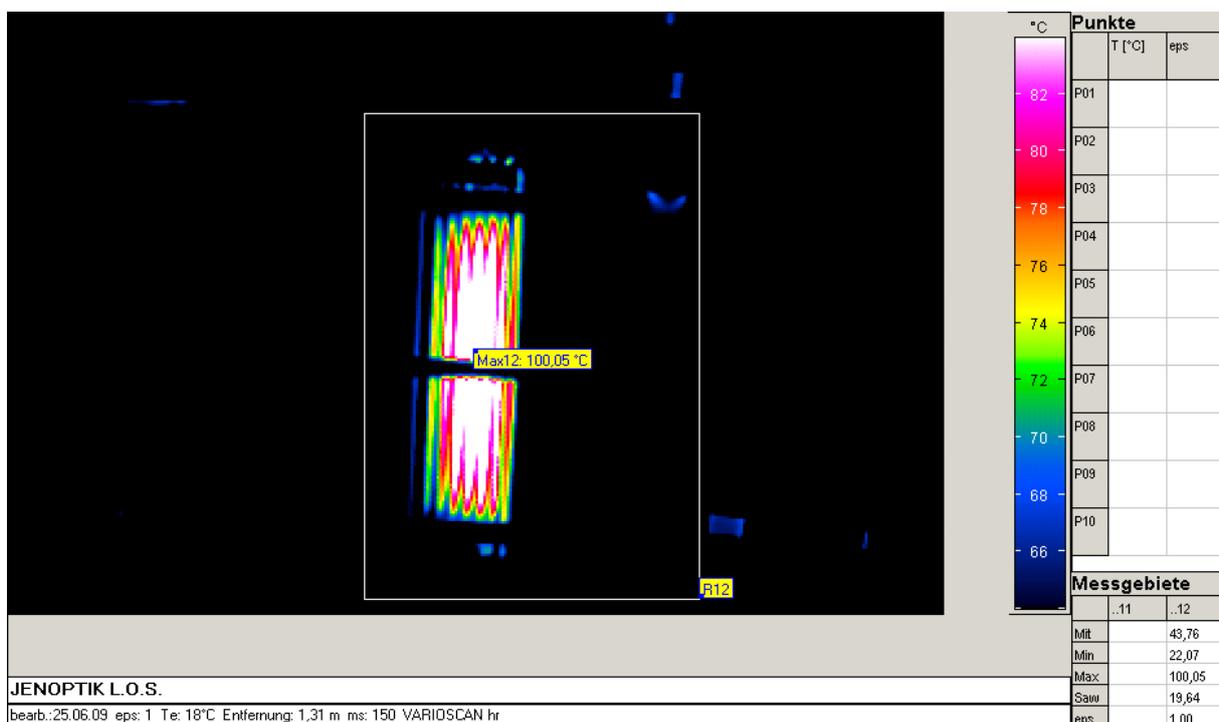
**Abbildung 4.35:** Wärmebild Kapillarstruktur bei 400 mA/cm<sup>2</sup>

In Abbildung 4.36 ist das Wärmebild bei  $600 \text{ mA/cm}^2$  dargestellt. Dort sind schon deutliche Temperaturunterschiede zu sehen. Es wird durch die erhöhte Stromdichte mehr Wärme im Stack produziert, die an den Randbereichen aufgrund der nicht optimal ausgelegten Kapillarstruktur nicht abgeführt werden kann.



**Abbildung 4.36:** Wärmebild Kapillarstruktur bei  $600 \text{ mA/cm}^2$

Noch deutlicher wird diese Erkenntnis in Abbildung 4.37, die die Wärmeverteilung bei  $800 \text{ mA/cm}^2$  illustriert.



**Abbildung 4.37:** Wärmebild Kapillarstruktur bei  $800 \text{ mA/cm}^2$

Die Randbereiche erreichen Temperaturen bis zu 100 °C, während die Temperaturmessstelle im inneren Bereich der Zelle zur gleichen Zeit eine Temperatur von 80 °C anzeigt. Somit wird bestätigt, dass die Randbereiche nicht ausreichend gekühlt werden und die Kapillarstruktur somit für die Verdampfungskühlung nicht zu empfehlen ist.

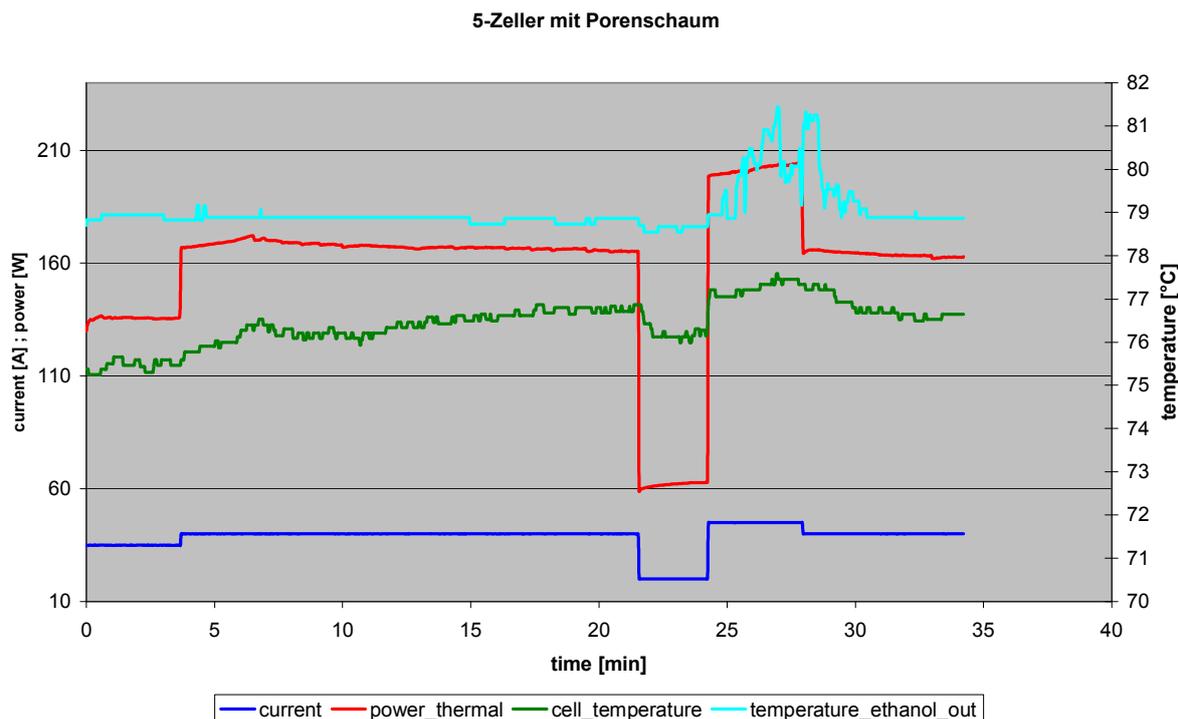
#### 4.6.2 Versuchsdurchlauf Verdampfungskanäle mit Porenschaum

Beim zweiten Versuchsdurchlauf wurde der Stack mit breiten Verdampfungskanälen und Porenschaum eingesetzt. Abbildung 4.38 zeigt das Plattenprofil für die Kühlseite.



**Abbildung 4.38:** Verdampfungskanäle mit Porenschaum

Wiederum wurde zu Beginn des Versuches das Wasserbad erhitzt und somit der Kondensator vorgewärmt. Anschließend wurde Wasserstoff und Luft auf den Stack gegeben und ein geringer Strom gezogen. Es wurden erneut konstante Stromdichten angefahren und gewartet, bis sich ein Temperaturniveau eingestellt hatte. Abbildung 4.39 zeigt die Versuchsergebnisse.



**Abbildung 4.39:** Versuchsergebnisse mit Porenschaum

Bei einer Stromdichte bis  $800 \text{ mA/cm}^2$  stellt sich jeweils ein konstantes Temperaturniveau ein und das Ethanol befindet sich nicht im überhitzten Bereich. Erst bei  $900 \text{ mA/cm}^2$  steigt die Ethanoltemperatur am Ausgang und das Ethanol tritt überhitzt aus dem Stack. Ein Grund dafür ist die thermische Leistung, die im Bereich von  $900 \text{ mA/cm}^2$  bei ca.  $185 \text{ W}$  liegt und mit Erhöhung der Zelltemperatur stetig steigt. Wie anfangs erwähnt beträgt die max. Kühlleistung des Ethanols aber nur ca.  $176 \text{ W}$ , so dass das Ethanol nicht die gesamte Wärme im Zweiphasengebiet aufnehmen kann.

Durch die Bilder der Wärmekamera wird aber noch ein weiterer Grund für die steigende Zelltemperatur erkannt. Abbildung 4.40 und Abbildung 4.41 stellen die Temperaturen bei  $800$  und  $900 \text{ mA/cm}^2$  dar.

Schon bei  $800 \text{ mA/cm}^2$  ist zu erkennen, dass die Zellen im Stack an der Außenfläche nicht die gleichen Temperaturen vorweisen. Zwei Zellen besitzen eine höhere Temperatur. Die Temperaturdifferenz steigt bei  $900 \text{ mA/cm}^2$  noch einmal deutlich an. Der Grund für die erhöhte Temperatur in den zwei Zellen liegt möglicherweise beim Porenschaum. Es ist vorstellbar, dass der Porenschaum in diesen beiden Zellen stärker verpresst wurde bzw. schon vor Einlegen ins Kühlfeld eine verengte Struktur

auswies, so dass er in den genannten Zellen den Volumenstrom des Ethanols blockiert oder zumindest verringert.



**Abbildung 4.40:** Wärmebild Porenschaum bei 800 mA/cm<sup>2</sup>

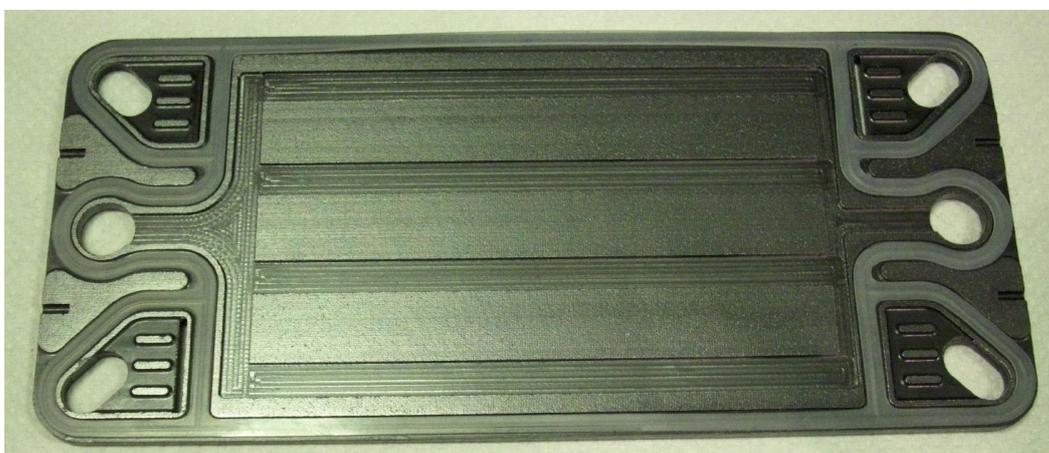


**Abbildung 4.41:** Wärmebild Porenschaum bei 900 mA/cm<sup>2</sup>

Diese Blockade und die damit verbundene Volumenstromverringerung führen zur ungleichmäßigen Temperaturverteilung bzw. Kühlung des Stacks. Aus diesem Grund ist bei der Erstellung und Verarbeitung des Porenschaums erhöhte Aufmerksamkeit und Qualitätskontrolle erforderlich.

#### 4.6.3 Versuchsdurchlauf Verdampfungskanäle ohne Porenschaum

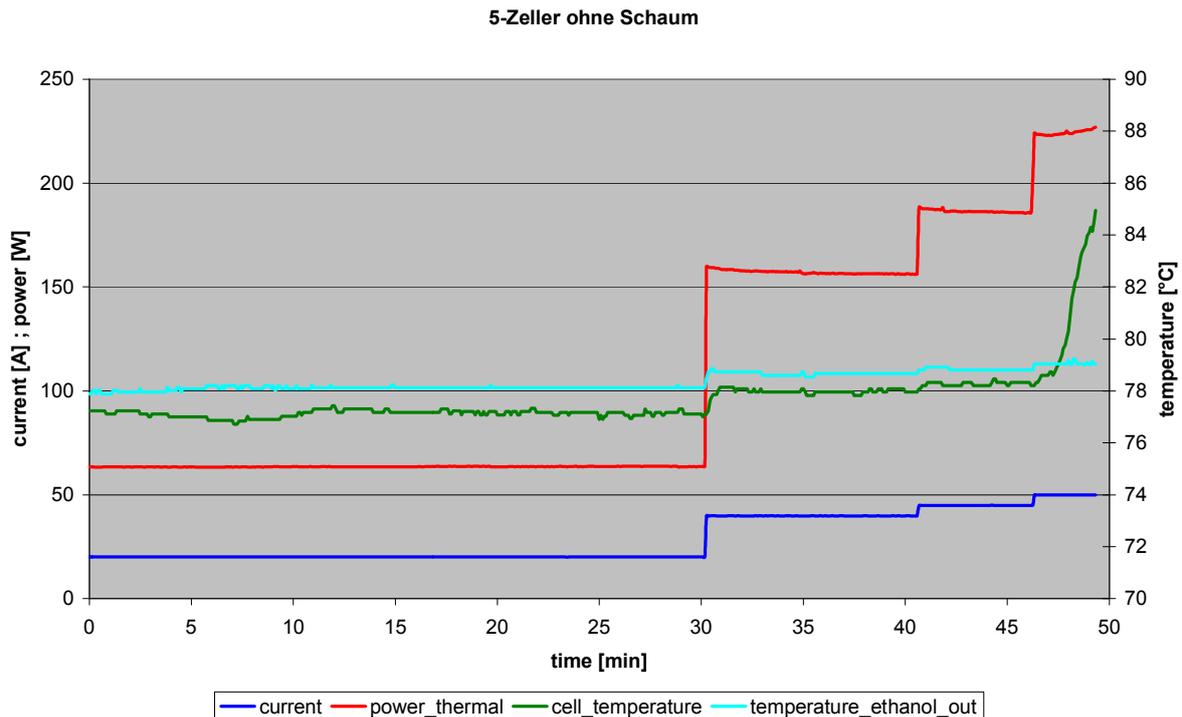
Im dritten Versuchsdurchgang wurde ein Stack mit vier parallelen Verdampfungskanälen aber ohne Düsen und ohne Porenschaum vermessen. Abbildung 4.42 zeigt das zugehörige Plattenprofil des Kühlfeldes.



**Abbildung 4.42:** Verdampfungskanäle ohne Porenschaum

Die Versuchsparameter waren identisch mit den beiden vorherigen Versuchen. In Abbildung 4.43 sind die Ergebnisse graphisch dargestellt.

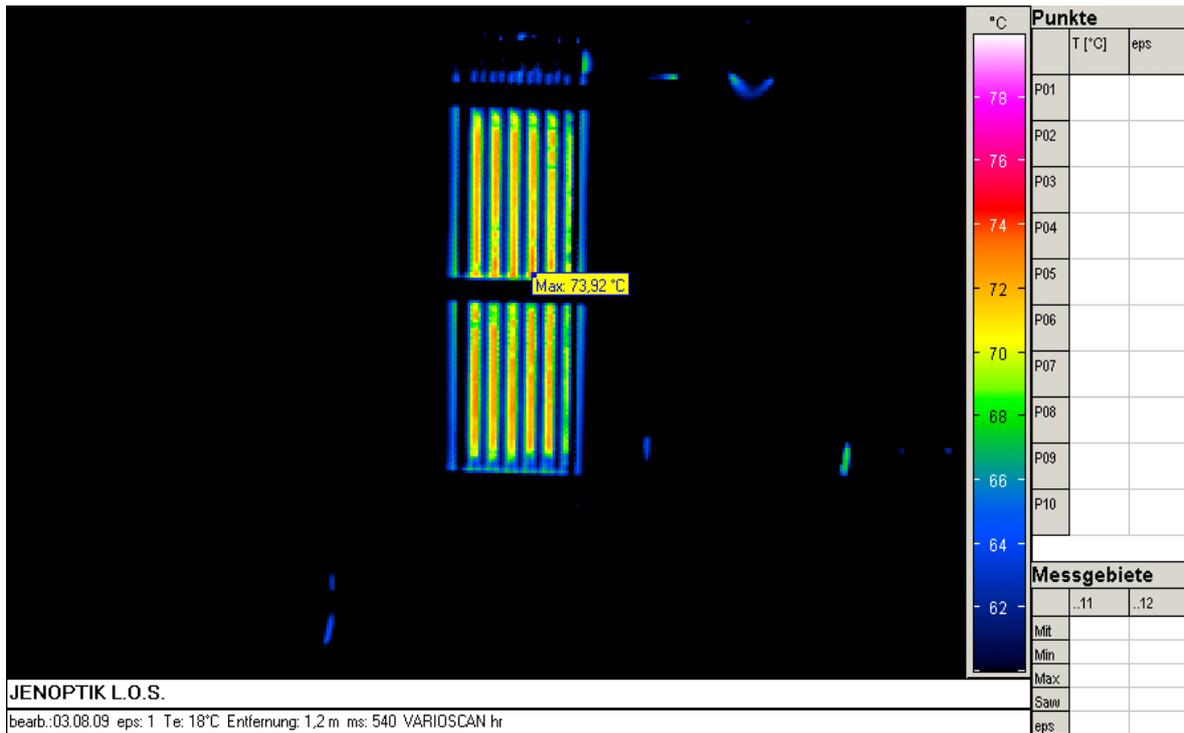
Der Stack konnte bis zu  $900 \text{ mA/cm}^2$  problemlos betrieben werden. Es stellten sich bei den unterschiedlichen Stromdichten jeweils eine konstante Stack- und Ethanolaustrittstemperatur sowie daraus resultierend eine konstante thermische Leistung ein. Die thermische Leistung bei  $900 \text{ mA/cm}^2$  lag bei ca. 180 W. Durch die gleichmäßig durchströmten Platten konnte das Ethanol den Stack kühlen ohne selbst zu überhitzen.



**Abbildung 4.43:** Versuchsergebnisse ohne Porenschaum

Erst bei einer Stromdichte von  $1000 \text{ mA/cm}^2$  stieg die Zelltemperatur und damit verbunden die thermische Leistung deutlich an. Es musste eine thermische Leistung von  $225 \text{ W}$  abgeführt werden. Diese Abfuhr konnte durch das Ethanol im Zweiphasenzustand nicht mehr bewerkstelligt werden, so dass auch die Ethanolaustrittstemperatur anstieg und sich das Ethanol am Austritt im überhitzten Zustand befand.

Abbildung 4.44 zeigt die Aufnahme der Wärmebildkamera bei einer Stromdichte von  $900 \text{ mA/cm}^2$ . Es ist zu erkennen, dass der Stack an der Außenfläche über alle Zellen ein gleichmäßiges Temperaturniveau vorweist. Die Temperatur beträgt ca.  $72 \text{ °C}$ . Bei einer Erhöhung der Stromdichte auf  $1000 \text{ mA/cm}^2$  stößt der Volumenstrom des Ethanols bei der Wärmeaufnahme an seine Grenzen. Abbildung 4.45 zeigt den Verlauf der Wärmeentwicklung im Zeitraum von zwei Minuten bei einer Stromdichte von  $1000 \text{ mA/cm}^2$ .



**Abbildung 4.44:** Wärmebild Verdampfungskanäle ohne Porenschaum bei  $900 \text{ mA/cm}^2$

Besonders in den oberen Bereichen des Stack findet eine Temperaturerhöhung statt. Dieser Temperaturverlauf war zu erwarten. Der Volumenstrom des Ethanol fließt von unten nach oben. Da die thermische Leistung des Stacks bei  $1000 \text{ mA/cm}^2$  die mögliche Wärmeaufnahme des Ethanol im Zweiphasengebiet übertrifft, überhitzt das Ethanol auf dem Weg zum Zellaustritt im oberen Bereich. Die maximale Wärmeaufnahme wird bei der Durchströmung des Stacks schon vor dem Zellaustritt erreicht. Weitere Wärme kann nur begrenzt aufgenommen werden und somit kommt es zur verstärkten Temperaturerhöhung im oberen Bereich des Stacks.

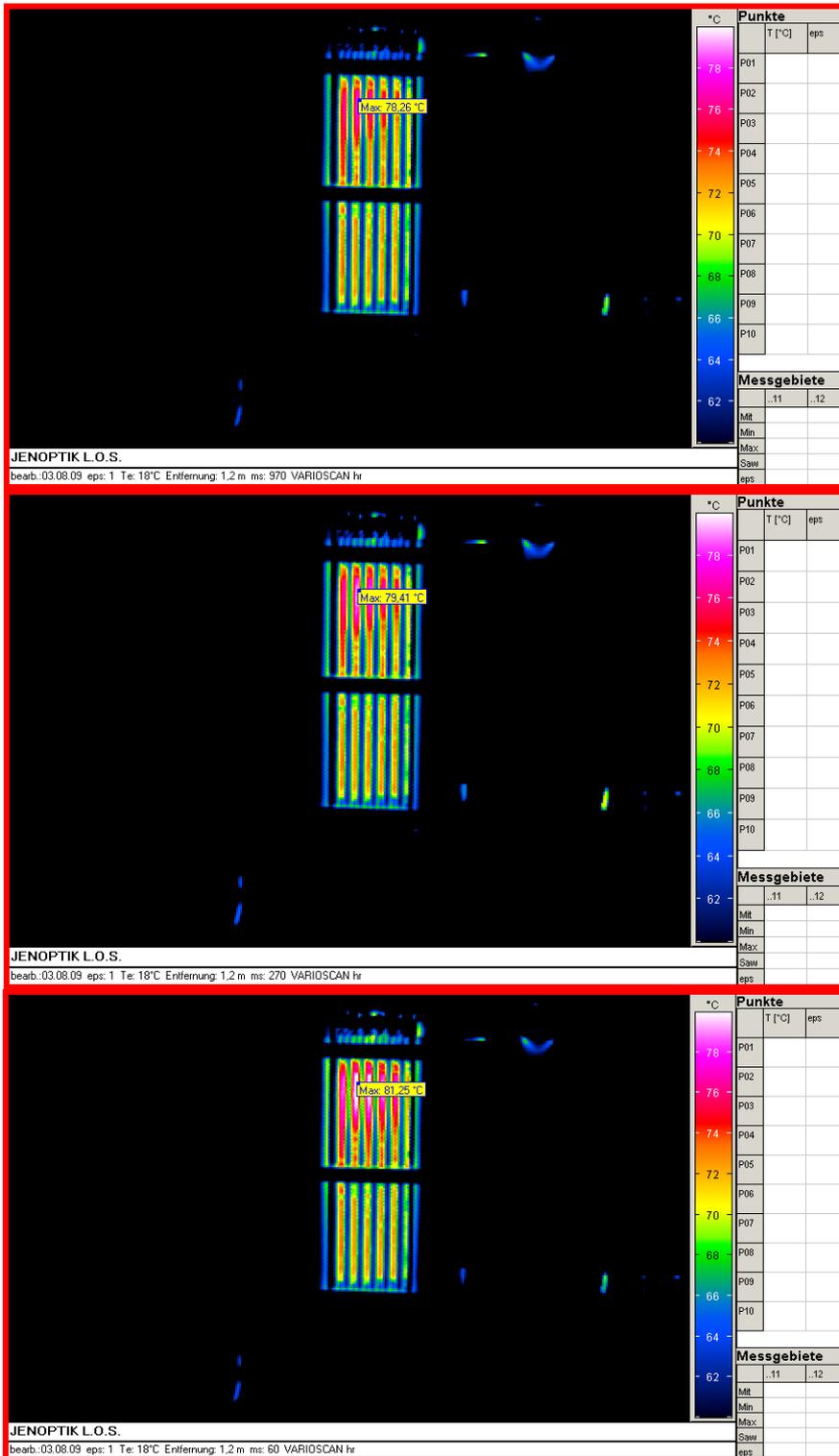


Abbildung 4.45: Verlauf Wärmebilder VK ohne Porenschaum bei 1000 mA/cm<sup>2</sup>

#### **4.6.4 Versuchsdurchlauf Verdampfungskanäle ohne Porenschaum mit Naturumlauf**

Abschließend wurde ein Testdurchlauf ohne Ethanolpumpe durchgeführt. Es sollte die Möglichkeit eines Naturumlafs aufgrund von Dichteunterschieden überprüft werden. Dazu wurde der Kondensator erhöht aufgestellt und mit dem Wasserbad auf einer Temperatur von 25 °C gehalten. Bei Anlaufen des Stacks stellte sich der Naturumlauf wie gewünscht ein. Der Volumenstrom des Ethanols war höher als mit Pumpe, so dass bewiesen werden konnte, dass die Pumpe limitierende Wirkung auf den Ethanolkreislauf hatte. Dadurch konnte weniger Wärme abgeführt werden. Die Temperatur des Ethanols bei Zelleintritt lag bei ca. 25 °C. Trotz dieser Eintrittstemperatur wies der Stack eine konstant gleichmäßige Temperatur auf, so dass bewiesen wurde, dass eine Aufheizung des Ethanols vor Zelleintritt nicht notwendig ist. Das Prinzip des Naturumlafs funktionierte bis zu einer Stromdichte von 800 mA/cm<sup>2</sup>, muss aber noch weiter ausgereift und verbessert werden, so dass der Stack auch bei höheren Stromdichten gleichmäßig gekühlt werden kann.

#### **4.7 Zusammenfassung & Ausblick**

Insgesamt betrachtet konnte die Verdampfungskühlung mit allen Plattendesigns erfolgreich angewendet werden. Die schlechtesten Ergebnisse wurden mit der Kapillarstruktur erzielt. Bei der Kapillarstruktur konnten die Randbereiche nicht ausreichend gekühlt werden. Grund war eine Überströmung des Ethanols an den Stegen, die eigentlich für eine Umlenkung des Kühlmediums um 180° sorgen sollten. Diese designtechnische Problemstellung müsste bei der Weiterverfolgung der Kapillarstruktur beachtet und letztendlich auch gelöst werden.

Der Vorteil des Porenschaums liegt bei der besseren, gleichmäßigeren Wärmeübertragung. Die Problematik bei der Versuchsdurchführung war ein ungleichmäßig gepresster Porenschaum, der in zwei Zellen zu Verstopfungen der Kühlkanäle führte und somit der Stack nicht gleichmäßig gekühlt werden konnte. Eine Überhitzung des Ethanols war die Folge. Bei der Verwendung von Porenschäumen ist daher ein sorgsamer Umgang geboten. Der Anpressdruck muss über den Stack konstant sein. Weiterhin muss der Porenschaum optimal an die Kühlkanäle angepasst werden, um eine ungewollte Verpressung zu verhindern. Auch

die gleichmäßige, reproduzierbare Herstellung des Porenschaums ist von großer Bedeutung. Weitere Untersuchungen unter Beachtung der zuvor genannten Punkte sind allerdings viel versprechend.

Die besten Ergebnisse wurden mit den breiten Verdampfungskanälen ohne Porenschaum erzielt. Der Stack konnte ohne Probleme bis zu einer Stromdichte von  $800 \text{ mA/cm}^2$  betrieben werden und wies dabei eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den gesamten Stack auf. Erst bei höheren Stromdichten konnte der Stack nicht mehr gekühlt werden. Limitierend wirkte hierbei die verwendete Pumpe, durch die der Volumenstrom des Ethanol begrenzt wurde. Somit konnte nur maximal  $180 \text{ W}$  thermischer Leistung abgeführt werden. Es wurde aber auch festgestellt, dass eine konstante Temperatur über den gesamten Stack auch ohne Porenschaum erzielt werden konnte. Somit wäre auch ein Ansatz ohne Porenschaum weiter zu verfolgen.

Ein erster Testlauf mit Naturumlauf des Kühlmediums Ethanol konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Begrenzung des Volumenstroms wurde aufgehoben und somit erhöhte sich die Strömungsgeschwindigkeit, was zu einer besseren Wärmeabfuhr führt. Weitere Testläufe im Naturumlaufverfahren sind allerdings durchzuführen. Es bleibt aber festzuhalten, dass das Prinzip des Naturumlaufs bis zu Stromdichten von  $800 \text{ mA/cm}^2$  problemlos funktionierte. Die Versuchsdurchführungen verliefen erfolgreich, so dass das Prinzip der Verdampfungskühlung durchaus Potential besitzt und weiter verfolgt werden sollte.

## 5 Forschungsstelle IWTT

### 5.1 Überblick

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer in einem PEM-BZ-Stacks integrierten Verdampfungskühlung und deren erfolgreiche Umsetzung in einem Fertigungsmuster. Die Eignung der Verdampfungskühlung für den Betrieb von PEM-Stack bei Betriebstemperaturen um ca. 80 °C sollte aufgezeigt werden. Sie bietet das Potenzial, eine homogene Temperaturverteilung im PEM-Stack unter Vermeidung von Hot-spots zu realisieren und damit einen langzeitstabilen Betrieb der Brennstoffzelle zu ermöglichen. Die nutzbare Temperatur von PEM-Brennstoffzellen kann angehoben werden, damit PEM-Brennstoffzellensysteme auf dem Markt mit konventionellen Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Systemen konkurrieren können.

Die Verdampfungskühlung soll in einem porösen Material im Bereich der Bipolar-Platte durchgeführt werden. Aufgrund der Komplexität der Verdampfungsvorgänge in porösen Medien erfordert diese Entwicklung die Durchführung von praktischen Experimenten und Simulationsrechnungen. Bei der numerischen Simulation wurden die folgenden Aufgaben betrachtet:

- Modellierung und Simulation des Verdampfungsprozesses in Mikrokanälen und in porösen Strukturen (Schaumstrukturen) mit Hilfe des ANSYS-CFX Codes. Es wurden Modelle auf der Basis von Homogenisierungsansätzen genutzt. Die Modellparameter zu den Strömungsvorgängen (Permeabilität, Dispersion) in den porösen Medien wurden durch detaillierte Simulation mit der Lattice-Boltzmann-Methode bestimmt.
- Validierung/Anpassung der Modelle anhand der experimentellen Ergebnisse von IUTA-Duisburg.
- Optimierung des Verdampfungsprozesses durch Untersuchung des Einflusses der geometrischen Parameter der porösen Medien und der physikalischen Eigenschaften des Kühlmediums.

Der Bericht ist folgendermaßen strukturiert: In Kapitel 5.2 werden die Untersuchungen der Materialeigenschaften (Permeabilität und effektive Wärmeleitfähigkeit) der porösen Materialien vorgestellt. Die Eigenschaften werden

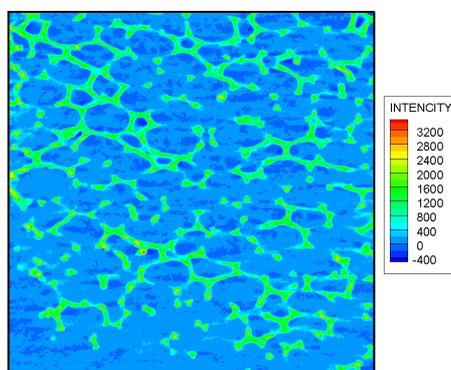
benötigt, um die Modelle aufzustellen und die Simulationen durchzuführen. Die vier verschiedenen Materialien, welche betrachtet wurden, sind Nickel-Schaum, zwei verschiedene Aluminium-Schäume (leicht und stark komprimiert) und ein Kohlefaser-Filz. In Kapitel 5.3 wird das Design der Kühlungskanäle behandelt. Hierfür wurden Simulationen für Einphasen-Strömungen und Zweiphasen-Strömung (falls erforderlich) durchgeführt. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick werden in Kapitel 5.4 gegeben.

## 5.2 Untersuchungen der Materialeigenschaften

### 5.2.1 Geometrischer Aufbau

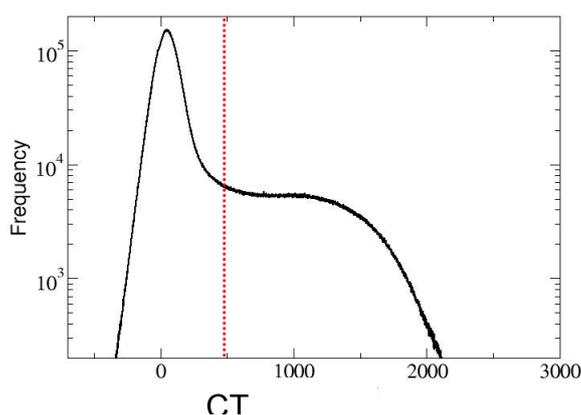
Im Rahmen des Projektes wurden als poröses Material im Verdampfungsbereich ein Nickel-Schaum, zwei verschiedene Aluminium-Schäume (geringe und starke Verdichtung) und ein Kohlefaser-Filz ausgewählt.

Um die strömungsmechanischen (Permeabilität) sowie wärmetechnischen (effektive Wärmeleitfähigkeit) Eigenschaften der porösen Materialien zu bestimmen, müssen die Geometrien der porösen Matrizen festgelegt werden. Es wurden Proben mit einer Größe von  $7,5 \times 7,5 \text{ mm}^2$  mittels Computertomographie (CT) bei der Firma YXLON (*YXLON Int. CT Development GmbH*) in Hattingen vermessen. Die verwendete Auflösung betrug  $7,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Die geometrischen Eigenschaften des Schaums wurden mit einer statistischen Analyse aus den gescannten Werten der Proben bestimmt. Die Rohdaten haben eine Auflösung von  $1152 \times 1152$  Pixel pro Ebene.

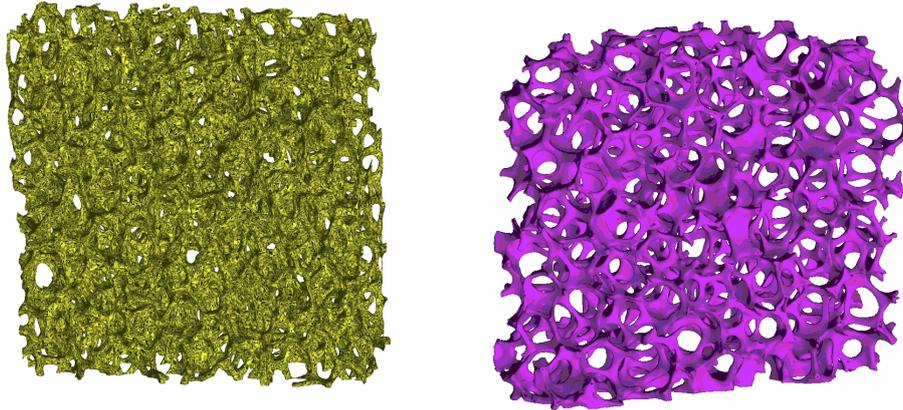


**Abbildung 5.1:** CT-Scan von Nickelschaum mit  $1152 \times 1152$  Pixel Auflösung

Die Rohdaten wurden in CT-Zahlenwerte konvertiert und in 16 bit skaliert. In Abbildung 5.1 ist die Intensitätsverteilung für einen Schnitt dargestellt. Mit einem selbst erstellten *Fortran*-Code konnte die CT-Frequenz in allen Schichten für alle Pixel berechnet werden. Die Verteilung ist in Abbildung 5.2 wiedergegeben. Auf dem Bild sind zwei Peaks zu sehen. Sie zeigen das Metall bzw. die freie Zone an. Die rote Linie zeigt das angenommene Ende der freien Zone und den Beginn des Metallschaums. Die Linie ist nicht eindeutig definiert und wird deshalb als Parameter angesehen. Die entsprechende Geometrie wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Ein Scan (Computertomographie) des Kohlefaser-Filzes war aus technischen Gründen nicht erfolgreich. Die Materialeigenschaften wurden aus der Literatur entnommen. Die Permeabilität und die effektive Wärmeleitfähigkeit der porösen Medien wurden durch „direkte Simulation“ mit der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) bestimmt. LBM ist eine verhältnismäßig neue numerische Methode, die auf der kinetischen Gastheorie basiert. Die LBM wurde bereits erfolgreich für die Simulation komplizierter Strömungen, Mehrphasenströmungen, turbulenter Strömungen und Strömungen in porösen Medien verwendet. Große Vorteile bietet die einfache Eingabe der Randbedingungen für komplizierte Geometrien. Der LBM-Algorithmus erlaubt eine leichte Anpassung für das parallele Rechnen auf mehreren Prozessoren [1].



**Abbildung 5.2:** Verteilung der CT-Frequenz für Nickelschaum



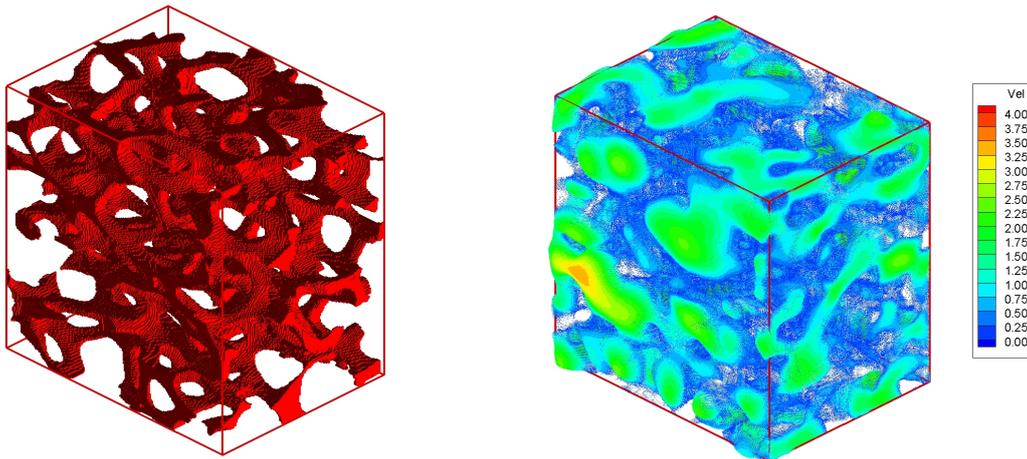
**Abbildung 5.3:** Computertomographieabbildungen der Nickelschaumprobe und Aluminiumschaumprobe

### 5.2.2 Permeabilität

Um die Permeabilität der Schaumstrukturen zu überprüfen, wurde ein repräsentatives Volumenelement mit  $2,0 \times 2,0 \times 1,5 \text{ mm}^3$  ausgewählt. An einer Seite wurde eine konstante Druckrandbedingung angenommen, die anderen Flächen wurden mit periodischen Randbedingungen belegt. Die Permeabilität ( $K$ ) ist abhängig von der mittleren Geschwindigkeit ( $U_D$ ) in der Schaumstruktur und vom angewandten Druckgradienten ( $\nabla p$ ). Das Gesetz von *Darcy* lautet entsprechend:

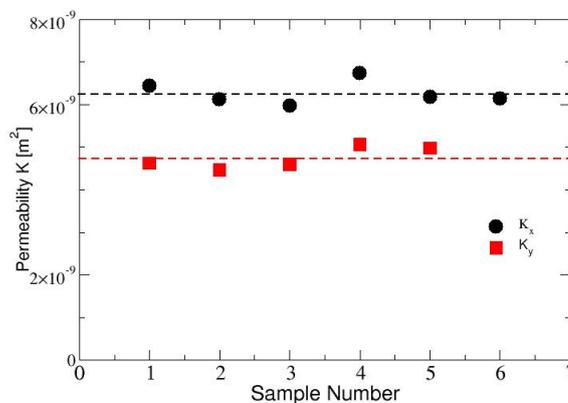
$$\bar{U}_D = -\frac{K}{\mu} \nabla p$$

Für den Fall großer Reynoldszahlen wurde die *Forchheimer* Beziehung, eine allgemeine Form der Gleichung von *Darcy*, angewendet. Ein Ergebnis ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Links ist ein kartesisches Gitter dargestellt, wie es für LBM verwendet wurde. Rechts sind die Geschwindigkeitsvektoren dargestellt.



**Abbildung 5.4:** links: Gitter für die LBM  
rechts: Geschwindigkeitsfeld (blau – kleine & rot – große Geschw.)

Die Ergebnisse der Permeabilitätskoeffizienten in x- und y-Richtung sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Permeabilitätskoeffizienten wurden an unterschiedlichen Stellen in der eingescannten Probe bestimmt. Abweichungen zwischen den Ergebnissen wurden aufgrund des Herstellungsprozesses erwartet. Mittlere Werte liegen zwischen  $K_x = 6,2 \times 10^{-9}$  und  $4,7 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>.



**Abbildung 5.5:** Verteilung der Permeabilität in x- und y-Richtung für Nickelschaum bei unterschiedlichen Proben

Die Permeabilität des Aluminium-Schaums beträgt  $1,24 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup> (für geringe Verdichtung von 5 mm bis 1,5 mm) und  $6,12 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup> (für starke Verdichtung von 10 mm bis 1,5 mm).

### 5.2.3 Effektive Wärmeleitfähigkeit

Wie bereits oben erwähnt, wurde die Wärmeleitfähigkeit des porösen Materials mit Hilfe der thermischen LBM ermittelt. Hierfür wurde das D3Q19 Modell verwendet, wobei D3 für dreidimensional und Q19 für die Anzahl der Richtungen (18+1) steht [2]. Wie in der Abbildung 5.6a zu sehen ist, wurden für das repräsentative Volumen (Elementarzelle) folgende Abmessungen angenommen:  $1,0 \times 1,0 \times 0,75 \text{ mm}^3$ . Für die Diskretisierung wurde eine Anzahl von 6 Millionen Gitterpunkten verwendet. Außerdem erfolgte an zwei gegenüberliegenden Flächen jeweils die Festlegung von konstant heißen bzw. kalten Temperaturen. Die effektive Wärmeleitfähigkeit (ohne Strömung) wurde mit Hilfe des *Fourier*-Gesetzes der Wärmeleitung bestimmt.

$$q = -K_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x}$$

In allen drei geometrischen Ausrichtungen des Materials wurden Berechnungen für verschiedene repräsentative Volumina durchgeführt.

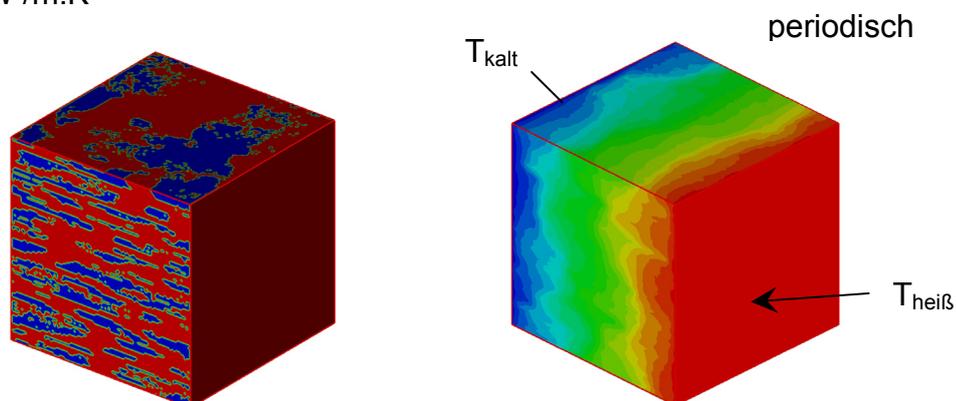
Die Geometrie der Nickel-Schaum-Probe und die Temperaturverteilung bei gegebenen Randbedingungen sind in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Ergebnisse der effektiven Wärmeleitfähigkeit ( $K_{\text{eff}}$ ) sind folgende:

- Nickel-Schaum:

$$K_{\text{Dampf}} = 0,026 \text{ W /m.K}$$

$$K_{\text{Ni\_Schaum}} = 80 \text{ W /m.K}$$

$$K_{\text{eff}} = 0,23 \text{ W /m.K}$$



**Abbildung 5.6:** a) Elementarzelle: rot = fest, blau = flüssig,  
b) Temperaturverteilung

- Aluminium-Schaum (geringe Verdichtung: von 5 mm auf 1,5 mm):

$$K_{\text{Al\_Schaum}} = 215 \text{ W /m.K}$$

$$K_{\text{eff}} = 0,3 \text{ W /m.K}$$

- Aluminium-Schaum (starke Verdichtung: von 10 mm auf 1,5 mm):

$$K_{\text{eff}} = 2,88 \text{ W /m.K}$$

Die Ergebnisse zeigen eine hohe effektive Wärmeleitfähigkeit der Schäume. Die des Nickel-Schaums ist ca. 10x und die des Aluminium-Schaums nach starker Verdichtung etwa 100x höher als die des dampfförmigen Arbeitsmediums.

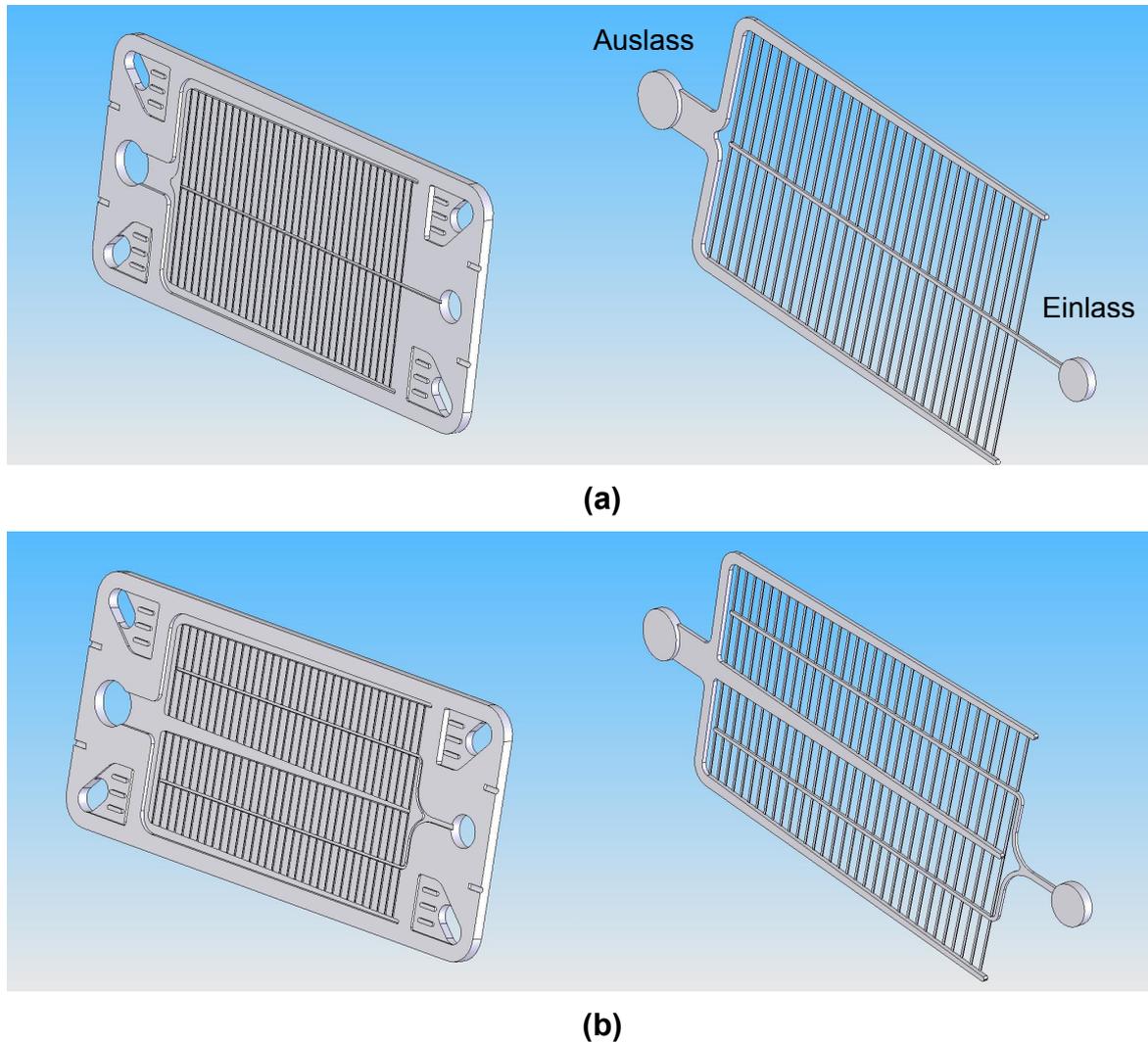
### **5.3 Design der Kühlkanäle:**

In diesem Kapitel werden die Resultate der Simulationen für Einphasen- und Zweiphasen-Strömungen (falls erforderlich) beschrieben. Des Weiteren sind Ergebnisse von Simulationen mit Phasenwechsel für verschiedene Geometrien von Kühlungskanälen dargestellt. In Abschnitt 5.3.1 sind zwei verschiedene Mikrokanalstrukturen ohne poröse Füllung (Ein-Kanal und Doppelgabel-Zwei-Kanal) überprüft worden. Eine weitere Geometrie wurde ausgewählt, um die Strömungsverteilung im Kanal zu optimieren (Abschnitt 5.3.2). In Abschnitt 5.3.3 werden die Ergebnisse der Simulationen mit Zweiphasen-Strömungen in der verbesserten Geometrie vorgestellt. Eine Validierung des Zweiphasen-Modells wurde mit experimentellen Literaturwerten (Zweiphasen-Strömung mit Phasenwechsel in einem Ringspalt) durchgeführt. Im abschließenden Abschnitt 5.3.4 werden zwei weitere untersuchte Geometrien beschrieben. Für die Überprüfung, ob diese Geometrien für das Projektziel geeignet sind, waren nur Simulationen mit Einphasen-Strömungen notwendig.

#### **5.3.1 Erste Schritte:**

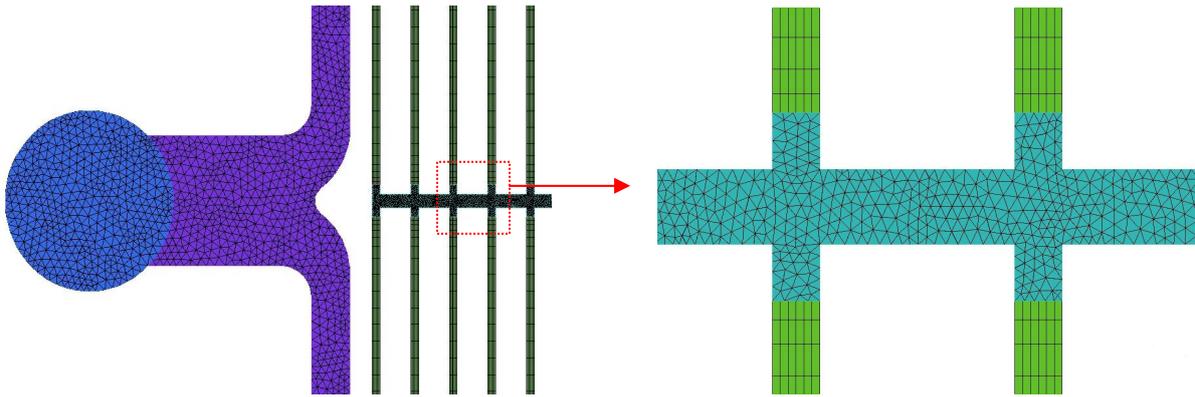
Das ZBT-Duisburg hatte zwei Geometrien für die Bipolarplatten und die Kühlkanäle vorgeschlagen. Die Geometrien basieren auf der Verwendung von Mikrokanälen, um den Verdampfungsprozess zu unterstützen, und sollen die Homogenität der

Temperaturverteilung fördern. Die zwei vorgeschlagenen Geometrien sind in Abbildung 5.7 dargestellt.



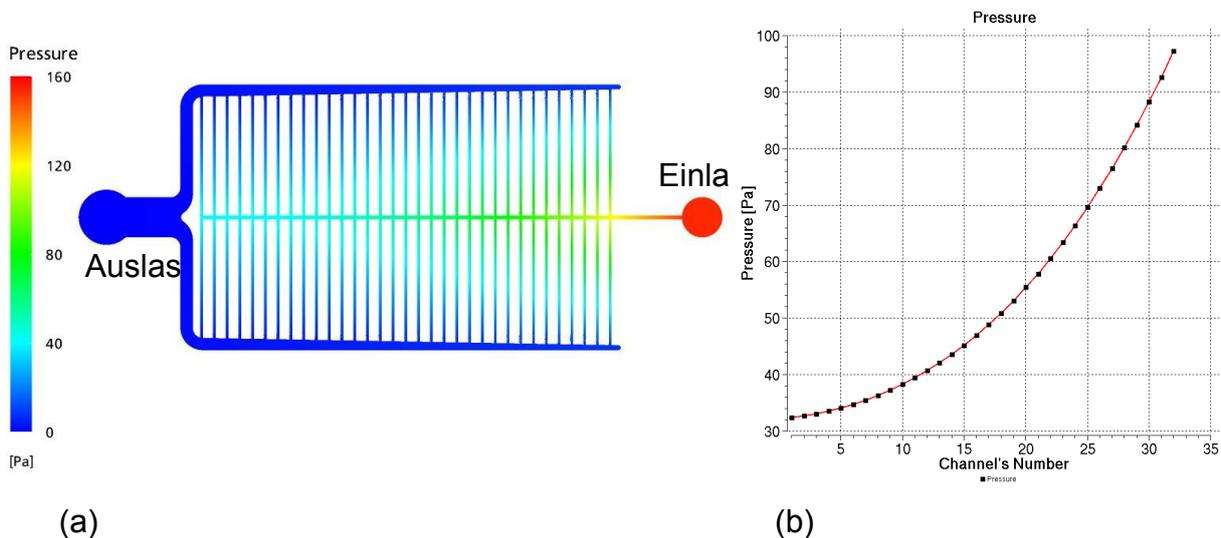
**Abbildung 5.7:** Ein-Kanal (a) und Doppelgabel-Zwei-Kanal (b) Geometrie der Bipolarplatten und der Kühlmedium-Führungen.

Es wurde zunächst die Durchströmung in der Flüssigphase durch die Kühlkanäle numerisch simuliert. Eine isotherme Strömung in den Kühlkanälen der Ein-Kanal Geometrie (Abbildung 5.7a) wurde als Testfall für die Simulation gewählt. Der Massenstrom des Kühlmediums (Wasser) wurde auf  $2,9 \times 10^{-5}$  kg/s eingestellt. Ein hybrides Gitter wurde aus einem strukturierten Gitter für die Mikrokanäle und einem unstrukturierten Gitter für die anderen Bereiche erzeugt. Das Netz ist in Abbildung 5.8 dargestellt.



**Abbildung 5.8:** Hybrides Gitter (strukturiert und unstrukturiert) der Ein-Kanal-Geometrie.

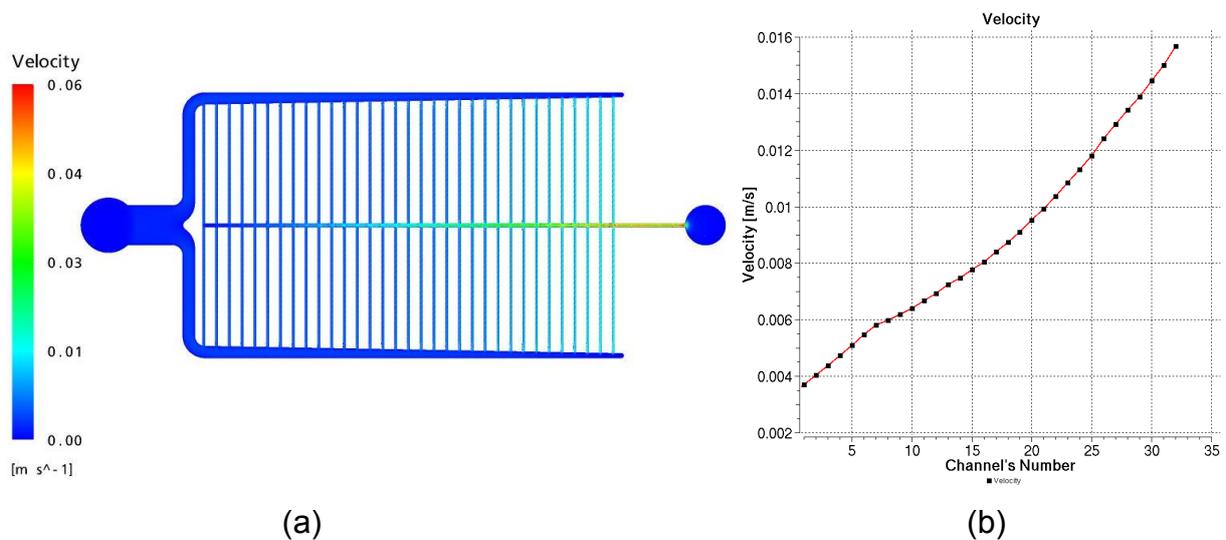
Die folgenden Randbedingungen sind verwendet worden: konstante Geschwindigkeit am Einlass, konstanter statischer Druck am Auslass und Haftbedingung an den Wänden. Die Druck- und Geschwindigkeitsverteilungen im Berechnungsgebiet werden in den Abbildungen 5.9a und 5.10a dargestellt. Die Abbildungen 5.9b und 5.10b zeigen die Verteilung des über den Querschnitt gemittelten Drucks am Einlass der Mikro-Kanäle. Klar erkennbar sind signifikante Inhomogenitäten, d.h. die Geschwindigkeit wird kleiner je weiter man sich von Einlass entfernt. Offenbar wird eine solche inhomogene Strömungsverteilung auch bei einem Verdampfungsprozess die resultierende Temperaturverteilung beeinflussen.



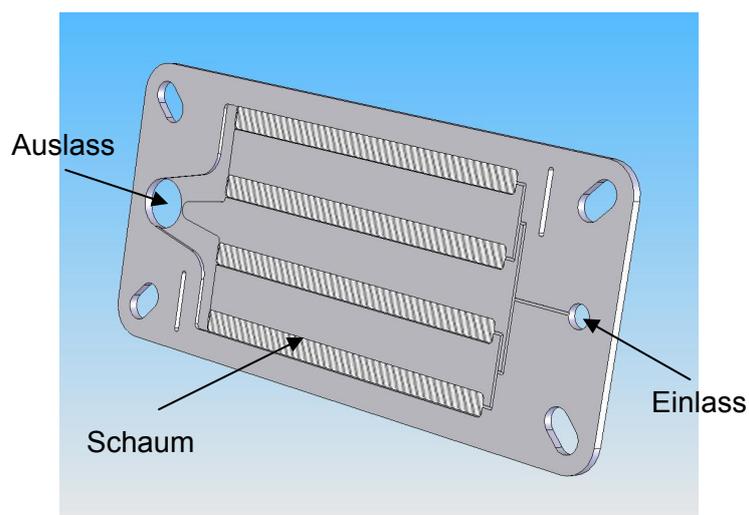
**Abbildung 5.9:** Druckverteilung im Berechnungsgebiet (a) und Druckverteilung über die Einlässe der Mikro-Kanäle (b).

Anhand dieser Ergebnisse kann man nicht erwarten, dass die Doppelgabel-Zwei-Kanal-Geometrie (Abbildung 5.7b) eine wesentliche Verbesserung bringen wird, so dass ein grundlegend besseres Design notwendig ist.

Ein neues Design wurde gemeinsam mit allen Projektpartnern unter Nutzung von porösen Schaumstrukturen anstatt von Mikrokanälen erarbeitet. Eine mögliche Realisierung des Strömungsfeldes (gezeigt in der Abbildung 5.11) wurde vom ZBT-Duisburg vorgeschlagen.



**Abbildung 5.10:** Geschwindigkeitsverteilung im Berechnungsgebiet (a) und mittlere Geschwindigkeit über die Einlässe der Mikrokanäle (b)

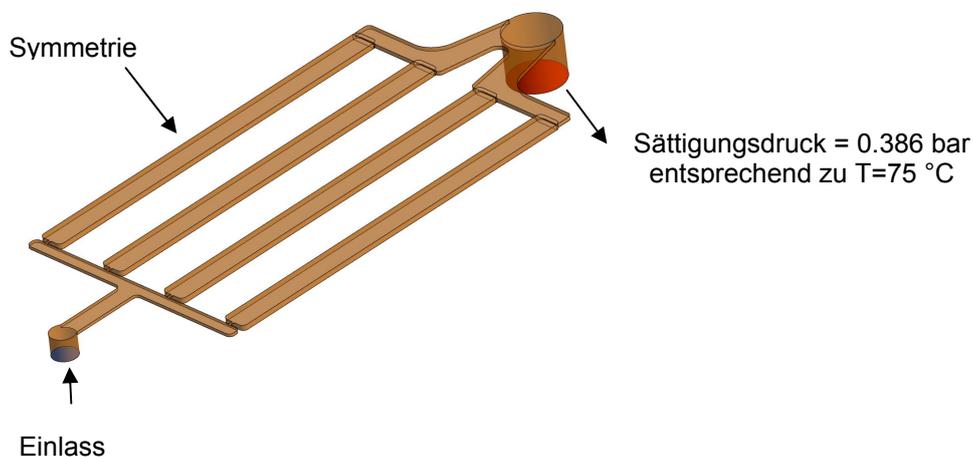


**Abbildung 5.11:** Vorgeschlagene Geometrie für den Verdampfungskühlungsprozess

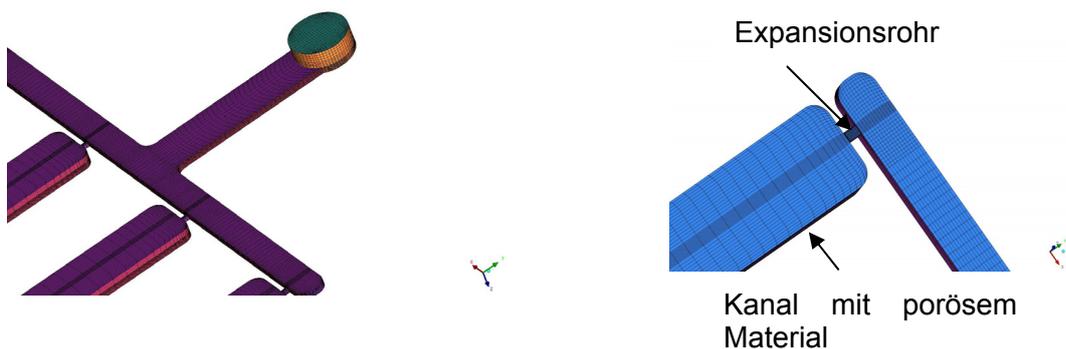
### 5.3.2 Optimierung der Geometrie

Bevor die Berechnungen der Zweiphasenströmung durchgeführt wurden, erfolgte die Untersuchung der Grenzen der Einphasenströmung für „nur flüssig“ oder „nur gasförmig“. Die Temperaturverteilung und der Druckverlust innerhalb der vom ZBT vorgeschlagenen Geometrie wurden berechnet (11).

Mit ANSYS-ICEM11 wurde ein hexaedrisches Gitter mit 1,2 Mio. Zellen generiert (Abbildung 5.12). Haftbedingung an den Wänden, Symmetrie an der oberen Fläche und konstanter Druck am Auslass wurden definiert. Der Massenstrom am Einlass ist konstant. Der Wert wird entsprechend der Leistung eingestellt.



**Abbildung 5.12:** Geometrie der Bipolar-Platten und der Kühlmedium-Stege



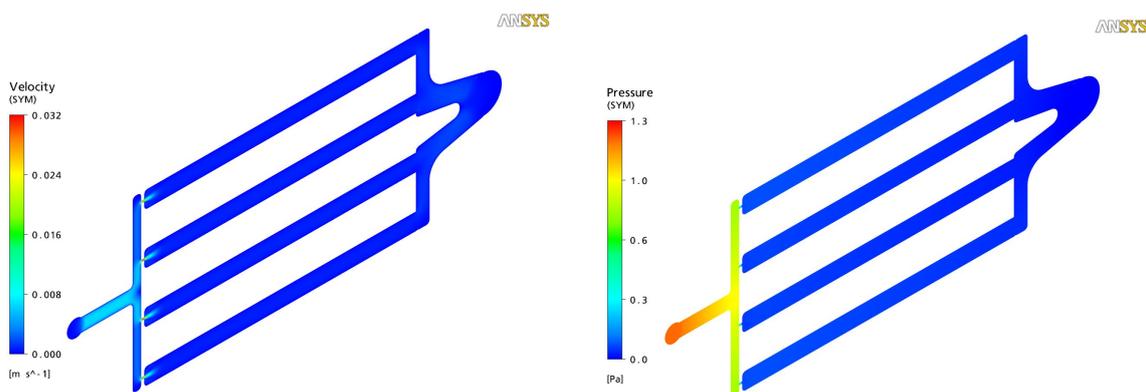
**Abbildung 5.13:** strukturiertes Gitter für die Kühlkanalgeometrie

Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene poröse Materialien ausgewählt: Nickelschaum und Kohlefaserfilz. Für den Nickelschaum sind die Geschwindigkeits-

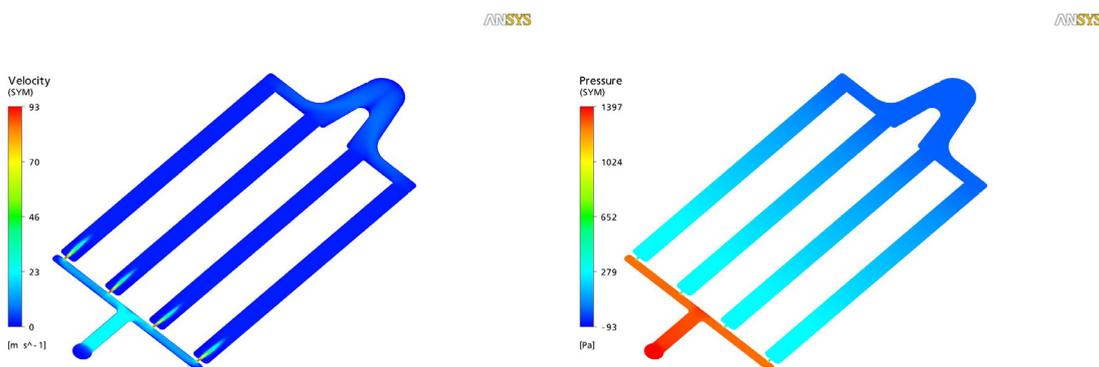
und Druckverteilung für die Fälle „nur flüssig“ und „nur Dampf“ in den Abbildung 5.14 und 5.15 dargestellt.

Es ist leicht vorstellbar, dass sich die Flüssigkeit in den Kanälen gut verteilt. Ein kleiner Druckverlust (1,3 Pa) in den Kanälen wurde berechnet. Das liegt an den geringen Volumenströmen. Im Fall „nur Dampf“ ist die Geschwindigkeitsverteilung ebenfalls sehr homogen, allerdings bei höheren Druckverlusten. Das liegt an der geringen Dichte des Dampfes ( $0,25 \text{ kg/m}^3$  im Vergleich zu  $958 \text{ kg/m}^3$  für die Flüssigkeit). Der Druckverlust setzt sich aus zwei Teilen zusammen: ein Teil am Expansionsrohr und ein Teil vom porösen Medium. Ein Gesamtdruckverlust von 2200 Pa entspricht einer Änderung der Sättigungstemperatur von  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  bei einem Niveau von  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ , wie in

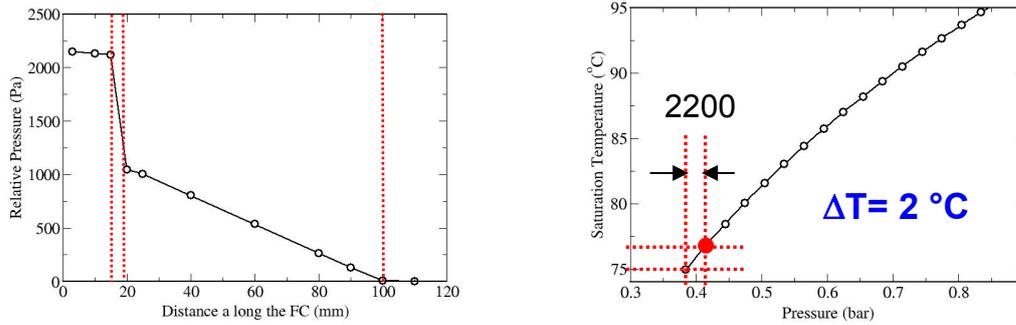
Abbildung 5.16 dargestellt. Diese Werte liegen im zulässigen Bereich.



**Abbildung 5.14:** Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Nickelschaum; „nur flüssig“

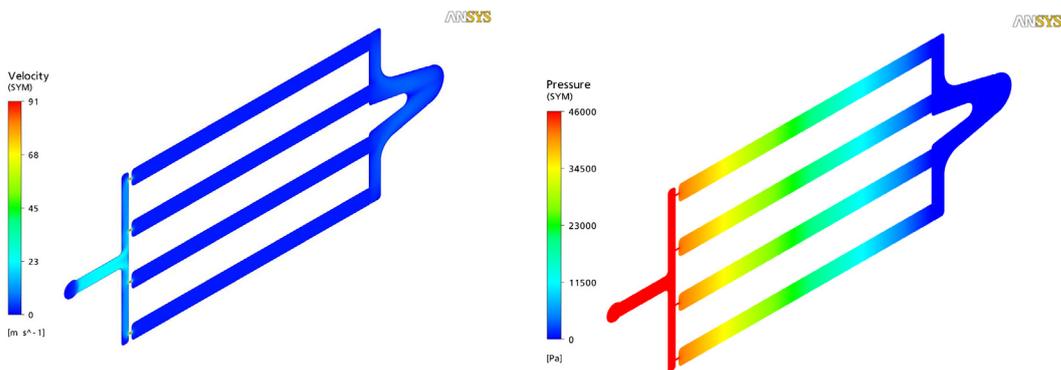


**Abbildung 5.15:** Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Nickelschaum; „nur Dampf“

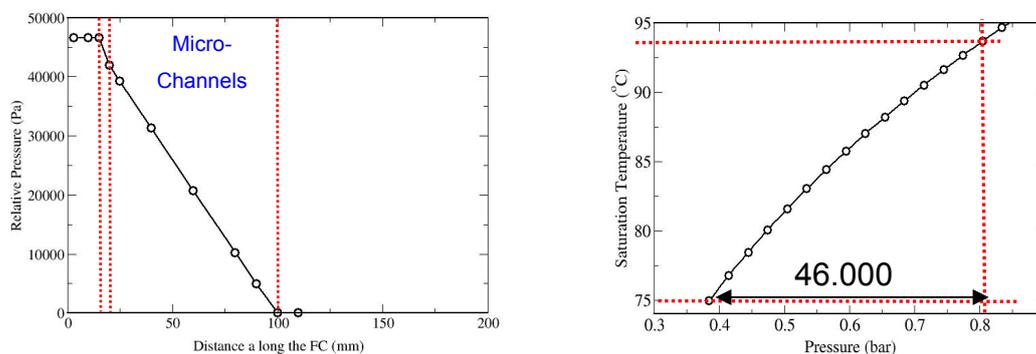


**Abbildung 5.16:** Mittlere Werte des Druckverlustes über den Kanal (links) und die damit zusammenhängende Änderung der Sättigungstemperatur (rechts) bei Verwendung von Nickelschaum

Die Permeabilitätskoeffizienten des Kohlefaserfilzes wurden der Literatur entnommen [3]. Die Ergebnisse für „nur Dampf“ sind in (Abbildung 5.17) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsverteilung sehr homogen ist.



**Abbildung 5.17:** Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Kohlenstofffilz; „nur Dampf“



**Abbildung 5.18:** Mittlere Werte des Druckverlustes über den Kanal (links) und die damit zusammenhängende Sättigungstemperatur (rechts) von Kohlenstofffilz

Der Druckverlust ist hier viel höher als beim Nickelschaum und erreicht Werte von 46.500 Pa, verteilt auf die Expansion im Verteiler und auf den Kohlefaserfilz. Der Druckverlust bewirkt eine Erhöhung der Sättigungstemperatur um ca. 18 °C (Abbildung 5.18). Das ist zu hoch und entspricht nicht den Zielen des Projekts.

### **5.3.3 Simulationen mit Zweiphasen-Strömung für die verbesserte Geometrie**

Das Zweiphasenmodell wurde verwendet, um die Temperaturen, die Drücke und die Verteilung der Volumenanteile in den Kühlkanälen zu bestimmen. Es besteht aus einer dispersiven Phase (Dampfblasen) und einer Kontinuitätsphase (Flüssigkeit) und basiert auf zwei Sätzen gemittelter Transportgleichungen. Im Modell wurde eine homogen überlagerte Verteilung beider Phasen angenommen. Diese wurde ausgewählt, um die kleinen Strukturen des porösen Materials mit einem Homogenisierungsansatz berechnen zu können.

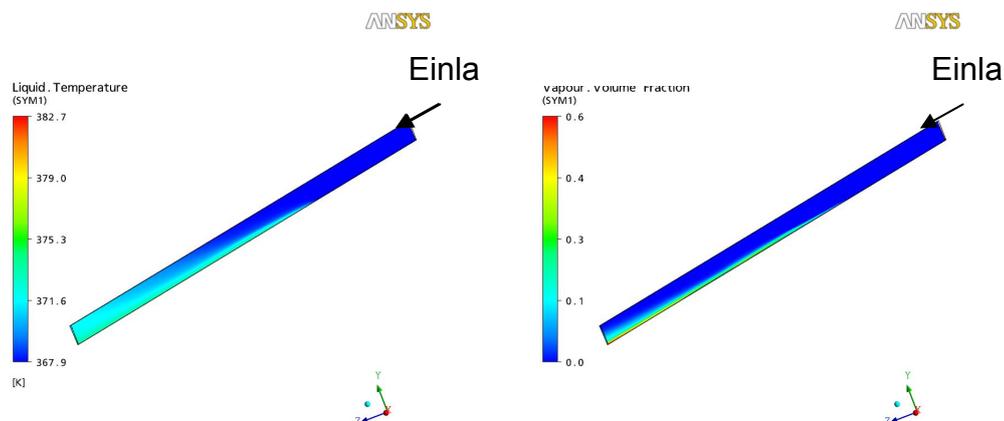
Die gemittelten Gleichungen beider Phasen wurden mit weiteren Gleichungen gekoppelt, die den Austausch an Masse, Impuls und Energie wiedergeben. Sie wurden als Quell- oder Senkterm in die phasenspezifischen Gleichungen eingefügt. Der zwischen den beiden Phasen stattfindende Austausch an Impuls, Wärme und Masse ist direkt abhängig von der Kontaktfläche der beiden Phasen.

Die Kontaktfläche wurde in diesem Fall so gewählt, wie sie für die Annahme gleich großer Kugeln gilt. Der Stofftransport in Abhängigkeit von der Phasenänderung wurde mit dem Modell für das Blasensieden berechnet, während das Wärmeübergangsmodell [4-8] im Wandbereich zum Einsatz kam. In diesem Modell wird der Wärmestrom in Wandnähe in zwei Ströme unterteilt. Ein Teil – einphasig – wurde zur Vorheizung der Flüssigkeit bis zur Sättigungstemperatur genutzt, der zweite Teil dient zur Verdampfung der Flüssigkeit. Diese Aufteilung ist abhängig von der Anzahl der neu gebildeten Keime, vom Blasendurchmesser, von der Anzahl der Keimbildungsgebiete, von der Oberflächenspannung und von der Differenz zwischen Sättigungs- und Wandtemperatur. Das thermodynamische Gleichgewicht liegt an der Schnittstelle zwischen den beiden Phasen vor. Das heißt, dass dort die Temperatur gleich der Sättigungstemperatur ist. Weitere Einzelheiten zu den Modellansätzen sind in [4] zu finden.

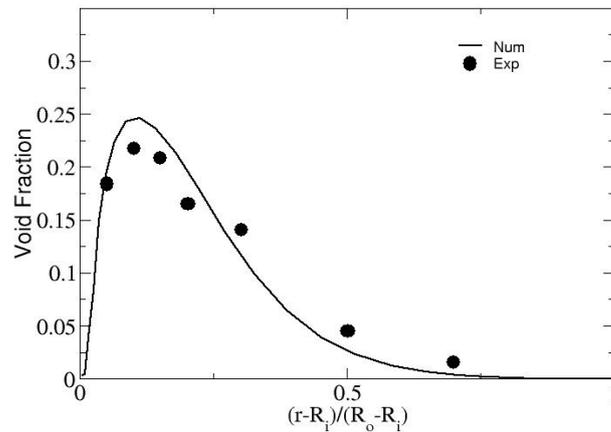
Zur Validierung des Modells wurden die experimentellen Ergebnisse von Bartel [9] verwendet. Er hat das Filmsieden von unterkühltem Wasser in einem vertikalen Rohr bei geringem Druck untersucht. In seiner Arbeit hat er die radiale Verteilung über einem Kanal an verschiedenen axialen Positionen vermessen.

Das verwendete hexaedrische Gitter hat 40 Rasterschritte in radialer Richtung und 200 Rasterschritte in axialer Richtung. Achsensymmetrische Randbedingungen wurden eingestellt, um die Rechenzeit zu minimieren. Außerdem wurden festgelegt: Haftbedingung an der festen Wand mit konstantem Wärmestrom ( $128 \text{ kW/m}^2$ ), feste Eintrittsgeschwindigkeit ( $0,73 \text{ m/s}$ ), Temperatur:  $367,9 \text{ K}$  (Sättigungstemperatur:  $373,15 \text{ K}$  bei  $1 \text{ atm}$ ), Konvergenzkriterium:  $10^{-8}$ .

In Abbildung 5.19 sind Temperaturen und Volumenanteile in einer Symmetrieffläche dargestellt. Wie erwartet ist deutlich zu erkennen, dass Temperatur und Dampfanteil schrittweise ansteigen. Die numerisch und experimentell ermittelte Verteilung der Dampfanteile in radialer Richtung nahe des Auslasses ( $2 \text{ m}$  vom Einlass) sind in Abbildung 5.20 wiedergegeben.

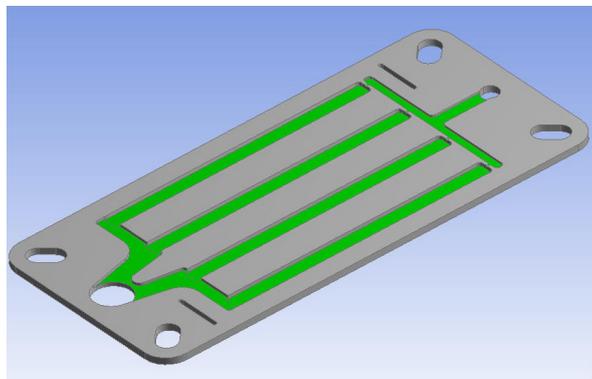


**Abbildung 5.19:** Temperatur der Flüssigkeit (links) und volumetrischer Dampfanteil (rechts) in einer Symmetrieebene



**Abbildung 5.20:** Numerisch und experimentell [9] ermittelte Verteilung der Dampfanteile in radialer Richtung nahe am Auslass

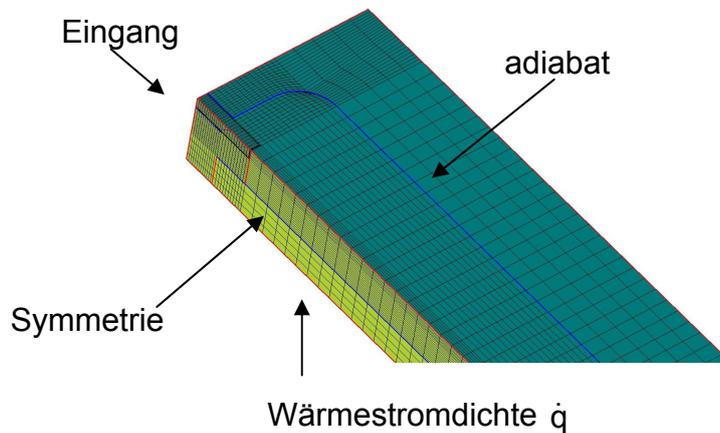
Das validierte Zweiphasen-Strömungsmodell (siehe letzten Zwischenbericht) wurde in den aktuellen Simulationen angewandt, um das Strömungsfeld mit Phasenwechsel in den vorgeschlagenen Geometrien zu bestimmen. Die Geometrie der vorliegenden Studie ist in Abbildung 5.21 dargestellt.



**Abbildung 5.21:** Geometrische Vorzugsvariante

Die Wasserströmung wurde nur in einem Kanal simuliert. Diese Vereinfachung ist legitim und wurde in vorausgegangenen Berichten belegt, da die Strömungsverteilung in allen 4 Kanälen nahezu gleich ist. Dies ist auf den hohen Druckverlust des angenommenen Mikrokanal-Verteilungssystems zurückzuführen. Zur Vernetzung wurde das Softwarepaket ICEM-CFD genutzt. Ein halber Kanal wurde in ein strukturiertes Netz überführt und demzufolge wurden symmetrische

Randbedingungen angenommen. An der Unterseite wurde eine konstante Wärmestromdichte angesetzt, wie in Abbildung 5.22 dargestellt ist. Die anderen Wände wurden als isoliert (adiabat) angenommen.



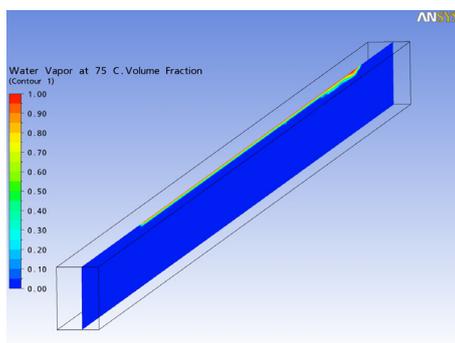
**Abbildung 5.22:** Vernetzung und Randbedingungen für einen halben Kanal

Das Zweiphasen-Modell (*Euler-Euler*) wurde benutzt, um die zwei sich gegenseitig beeinflussenden Phasen (dampfförmig und flüssig) in einem homogenen porösen Medium zu simulieren. Die Transportgleichungen an den Grenzschichten beinhalten angepasste Modelle aus der Literatur [3]. Der dort herrschende Wärmeübergangskoeffizient wurde gemäß *Ranz-Marshall* berechnet. Das thermische Phasenwechsel-Modell berücksichtigt den dampfförmigen Massetransport. Es wurde angenommen, dass das Gebiet der Grenzschicht gleich dem einer Kugel mit einem Durchmesser von 0,6 mm ist (dies ist ein variabler Parameter). Der Nickel-Schaum wurde, wie nachfolgend dargestellt, in den Simulationen verwendet. Hierfür wurden folgende Annahmen getroffen:

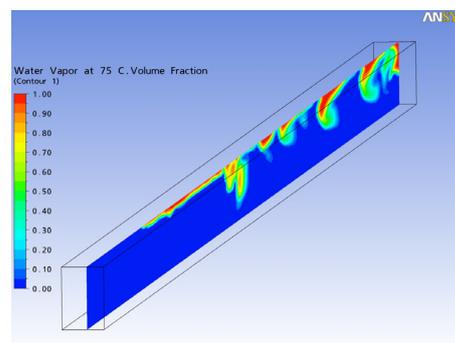
- Der Eingangsmassenstrom wurde festgesetzt auf 2,0 g/min (1,0 g/min für einen „halben“ Kanal).
- Die Eingangstemperatur beträgt 73 °C.
- Die Permeabilität hat eine Größe von  $K = 6.2 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .
- Die konstante Wärmestromdichte an der Wand beträgt  $\dot{q} = 10000 \text{ W/m}^2$ .

Die Resultate zeigen hohe Fluktuationen in dem volumetrischen Dampfanteil im Kanal und daher war es fast unmöglich, eine konvergierende Lösung mittels stationärer Simulationen zu erhalten. Deswegen wurden transiente Simulationen durchgeführt. Solange das Dichteverhältnis zwischen flüssigem Wasser und dem entsprechenden Wasserdampf bei 75 °C bei etwa 4000 liegt (flüssige Dichte = 975 kg/m<sup>3</sup>, dampfförmige Dichte = 0,25 kg/m<sup>3</sup> bei 75 °C), wurde ein hoher Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit erwartet. Demzufolge wurde eine äußerst kleine zeitliche Schrittweite  $\Delta t$  gewählt, um eine haltbare und verlässliche Lösung zu garantieren (*Courant*-Zahl =  $Co = U \cdot \Delta t / \Delta x \cong 1$ ).

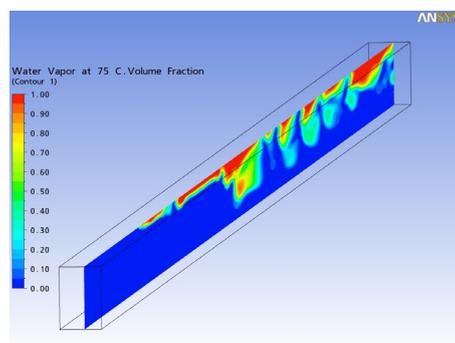
Durch die Notwendigkeit transienter Simulationen und um die Arbeit mit einer hohen Anzahl von Gitterpunkten zu vermeiden, wurden im Vorfeld zweidimensionale Simulationen durchgeführt, um erste Erkenntnisse zu gewinnen. Abbildung 5.23 zeigt einen Vergleich des volumetrischen Dampfanteils zu verschiedenen Zeitpunkten (Zeitschritte: Anfangszeit / 0,05 s / 0,15 s / 0,35 s / 0,5 s).



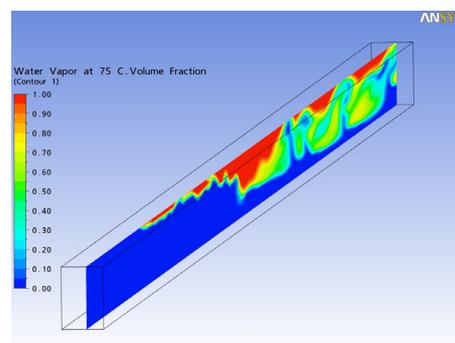
**a) Ausgangszustand**



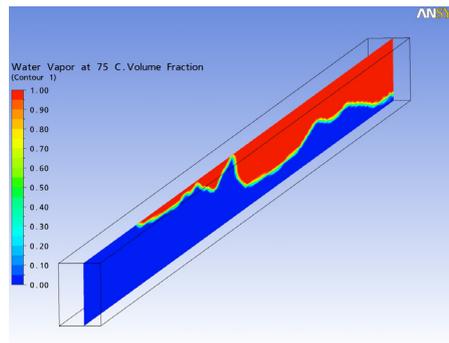
**b) 0,05 Sekunden später**



**c) 0,15 Sekunden später**



**d) 0,35 Sekunden später**

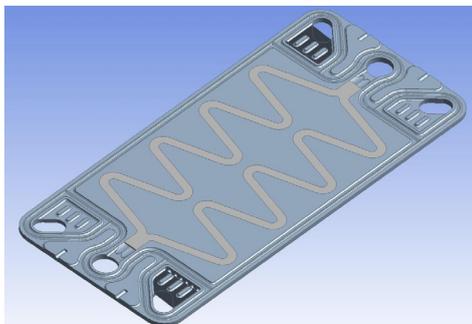


**e) 0,5 Sekunden später**

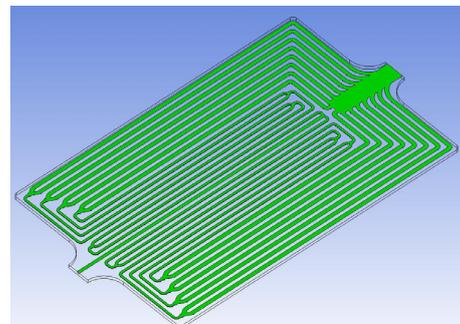
**Abbildung 5.23:** Volumetrische Dampfverteilung zu verschiedenen physikalischen Zeiten

Die bis dato gewonnen Erkenntnisse ließen sich für weitere Berechnungen nutzen. Der Lösungsweg sollte transient sein und die Symmetrieachse für einen halben Kanal beinhalten. Zwei weitere Schaummaterialien und zwei von ZBT vorgeschlagene Geometrien (Abbildung 5.24) wurden so untersucht.

### 5.3.4 Weitere geometrische Modelle:



**a) mit porösen Medium**

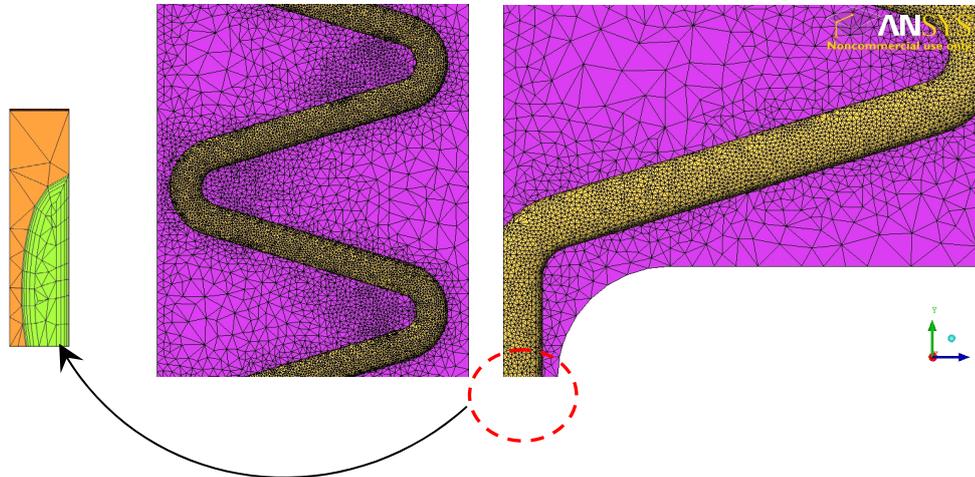


**b) Geometrie der Mikrokanäle**

**Abbildung 5.24:** Zwei neu vorgeschlagene Geometrien

Die zwei neuen Geometrievarianten (von ZBT vorgeschlagen) sind in Abbildung 5.24 dargestellt. Die erste Geometrie (Abbildung 5.24-a) beinhaltet ein poröses Material und die zweite (Abbildung 5.24-b) basiert auf Mikrokanälen ohne zusätzliches poröses Medium. Bei der Vernetzung beider Geometrien wurde ein

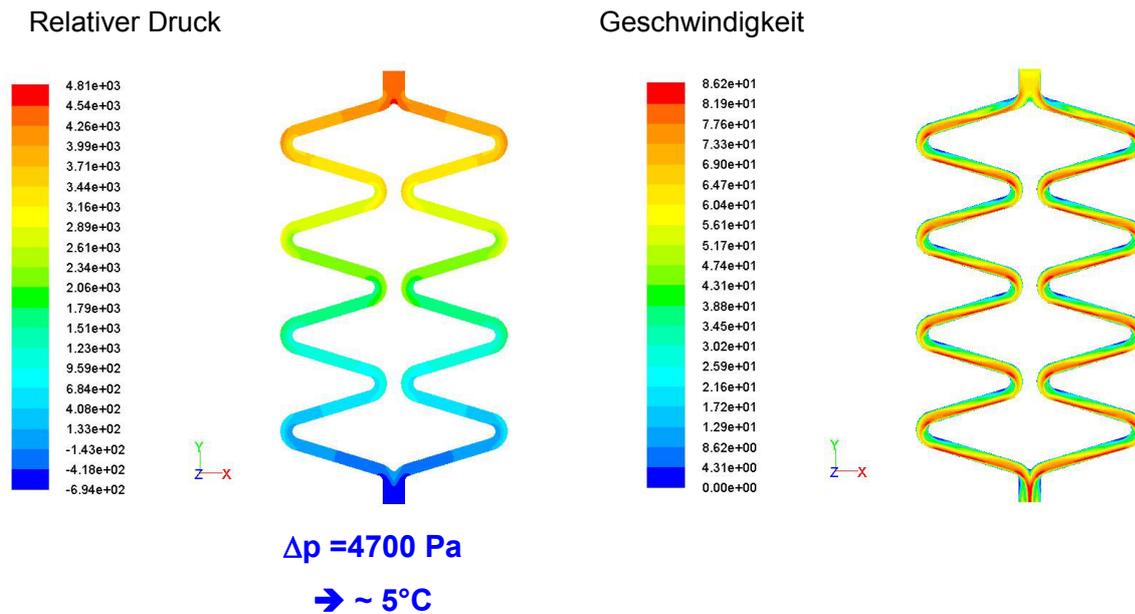
unstrukturiertes Netz verwendet. Dieses wurde mit einer Prismen-Schicht in der Nähe der Wandrandbedingungen verfeinert, um die erwarteten Details in dieser Region aufzulösen (Abbildung 5.25) können.



**Abbildung 5.25:** Unstrukturiertes Netz mit Prismen-Schicht für die neue vorgeschlagene Geometrie

Mit beiden Geometrien (Abbildung 5.24-a und 5.24-b) wurden Simulationen für einphasige Dampfströmungen durchgeführt. Bei den Berechnungen der Geometrie mit Mikrokanal (Abbildung 5.24-a) zeigt sich ein hoher Druckverlust (1,0 bar), welcher zu einem hohen Unterschied in der Sättigungstemperatur führt.

Bei der zweiten Geometrie (Abbildung 5.24-b) wurde ein Nickel-Schaum als poröses Medium eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.26 dargestellt und zeigen einen annehmbaren Druckverlust von  $\Delta p = 4700 \text{ Pa}$ , was zu einer Temperaturänderung von  $5^\circ\text{C}$  führt. Damit zeigt sich, dass diese Geometrie für den Einsatz von Verdampfungskühlungsprozessen eingesetzt werden könnte. Der relative Druck und die Geschwindigkeitsverteilung sind in Abbildung 5.26 dargestellt.



**Abbildung 5.26:** Relativer Druck- und Geschwindigkeit in vorgeschlagener Geometrie für einen Dampfstrom in einem porösen Nickel-Schaum

## 5.4 Zusammenfassung und Ausblick:

- LBM wurde erfolgreich genutzt, um die Permeabilität und effektive Wärmeleitfähigkeit der ausgewählten porösen Materialien zu bestimmen. Die Eigenschaften der porösen Schäume wurden per Computertomographie ermittelt. Die Eigenschaften des Kohlefaserfilzes wurden der Literatur entnommen.
- Verschiedene Geometrien mit vier verschiedenen porösen Materialien oder Mikrokanälen wurden untersucht. Durch den Einsatz von Mikrokanälen ergibt sich eine inhomogene Strömungsverteilung, welche zu einer inhomogenen Temperaturverteilung entlang der Platte führt (und eventuell zu Hot-Spots).
- Eine Validierung des Modells für Zweiphasen-Strömung wurde mit experimentellen Daten (Ringspalt ohne poröses Medium) aus der Literatur vorgenommen. Für geringere Dampfgehalte wurde eine gute Übereinstimmung von experimentellen und numerischen Werten erzielt.
- Berechnungen des Verdampfungsprozesses in der vorgeschlagenen Geometrie (vier Mikrokanäle mit Nickel-Schaum) wurden durchgeführt.

- Der Druckverlust zwischen Ein- und Ausgang der Kühlkanäle ist einer der Hauptfaktoren, ob die Geometrie sich für die vorliegenden Randbedingungen eignet. Das Ziel des Projektes ist Umsetzung einer Kühlung durch Phasenwechsel des Arbeitsmediums bei einer homogenen Temperaturverteilung. Ein hoher Druckverlust führt zu einem großen Unterschied in der Sättigungstemperatur.
- Die Geometrien der Kühlplatte mit Metall-Schäumen wurden bei Einphasen-Strömung untersucht. Die Ergebnisse zeigen zwischen Kanaleintritt und –austritt einen Temperaturunterschied von  $\sim 4$  °C (innerhalb der vorgegeben Grenzen). Die Ergebnisse sind vielversprechend im Bezug auf die Projektziele.
- Die zwei optimierten Geometrien (Abbildung 5.21 und 5.24-a) wurden mit Nickel-Schaum als poröses Medium überprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Nickel-Schaum in beiden geometrischen Varianten für den Einsatz für eine Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen viel versprechend ist.
- Die verfügbaren Modelle für eine Voraussage des Phasenwechsels in einem porösen Medium sind nicht geeignet für die vollständige Verdampfung. Deshalb sind weitere fundamentale Untersuchungen auf diesem Gebiet nötig. Bei kleineren Dampfanteilen zeigt das Modell gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten aus der Literatur.

## 5.5 Quellen

1. Al-Zoubi A., Numerical Simulation of Flows in Complex Geometries Using the Lattice Boltzmann Method, Ph.D. thesis, Technical University of Clausthal-Germany, 2006.
2. Y. Peng, C. Shu and Y. T. Chew, A 3D incompressible thermal lattice Boltzmann model and its application to simulate natural convection in a cubic cavity, Journal of Computational Physics, 193, 1, P 260-274, 2004.
3. Jürgen Becker, Oleg Iliev, Volker Schulz, Konrad Steiner, Andreas Wiegmann, Determination of Material Parameters of Gas Diffusion Layers by Combining Pore-Morphology Method and Single Phase Simulations, PEMSim Berlin, 18.-20.09.2006.
4. ANSYS-CFX-11 Modelling guide, 2008.
5. Feser J.P., Prasad A.K., Advani S.G., Experimental characterization of in-plane permeability of gas diffusion layers, Journal of Power Sources 162, 1226–1231, 2006.
6. Zeitoun O. Shoukri M., Bubble behavior and mean diameter in sub-cooled boiling of water at low pressures and low flow rates, Int. J. Multiphase Flow 20, 837-863, 1996.
7. Koncar B., Kljenak I. and Mavko B., Modelling of local two phase flow parameters in upward subcooled flow boiling at low pressure. Int. J. Heat and Mass Trans. 47, 1499-1513, 2004.
8. Krepper E., Koncar B. and Egorov Y., CFD modeling of subcooled boiling—Concept, validation and application to fuel assembly design, Nuclear Eng. And Design, 237, 716-731, 2007.
9. Bartel, M. D., Experimental investigation of subcooled boiling. Masterarbeit, Universität Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1999.

## **Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Die Betriebstemperatur innerhalb einer PEM-Brennstoffzelle (PEM-BZ) ist auf ca. 80°C begrenzt. Nach dem Stand der Technik erlaubt dies mit den heute in PEM-BZs eingesetzten Kühlverfahren eine nutzbare Temperatur von max. 55°C. Somit eignet sich die anfallende Wärme nur zur Nutzung in Niedertemperatur-Heizkreisen. Warmwasser im Hausenergiebereich erfordert jedoch Temperaturen von über 60°C, um den Hygienestandards zu genügen. Daher ist es erforderlich, die nutzbare Temperatur von PEM-Brennstoffzellen anzuheben, damit PEM-Brennstoffzellensysteme auf dem Markt mit konventionellen Kraft-Wärme-Kopplungs-(KWK)-Systemen konkurrieren können.

Dem beantragten Vorhaben liegt die Idee zu Grunde, durch die Integration einer Verdampfungskühlung die Nutzungseinschränkungen heutiger PEM-Brennstoffzellen zu beseitigen. Die Verdampfungskühlung beruht auf dem Phasenwechsel flüssig/gasförmig des Kühlmediums und ermöglicht eine isotherme Wärmeabfuhr. Die Verdampfungskühlung stellt eine innovative Lösung zur Erhöhung der Nutzttemperatur von PEM-BZs dar und bietet das Potenzial eine homogene Temperaturverteilung im PEM-Stack unter Vermeidung von Hot-spots zu realisieren und damit einen langzeitstabilen Betrieb der Brennstoffzelle zu ermöglichen.

Mit dem erfolgreichen Abschluss des Projektes stehen folgende verwertbare Ergebnisse zur Verfügung:

- Ein dampfschlagfreier Verdampfer hoher Leistungsmodulation, der an die Bedürfnisse von PEM-BZs optimal angepasst ist.
- Numerische Modelle des Wärme- und Stofftransports beim Sieden in porösen Medien zur Auslegung und Konstruktion verfahrenstechnischer Apparate.
- Bereitstellung eines verdampfungsgekühlten PEM-Brennstoffzellen-Stacks im Leistungsbereich von 200 Watt.

Entsprechend der Zielstellung des Vorhabens wird die Verwertung der Ergebnisse folgende Hauptzielrichtungen haben:

- Nutzung des am IUTA aufgebauten Teststands zur Entwicklung größerer verdampfungsgekühlter Bipolarplattenmodule sowie zur Charakterisierung weiterer poröser Medien im Hinblick auf ihre Eignung zur Integration in verdampfungsgekühlte PEM-Stacks.
- Adaption des dampfschlagfreien Verdampfers hoher Leistungsmodulation auf unterschiedliche Anwendungen (z. B. Dampferzeuger zur Sterilisation im Hygienebereich).

- Weiterentwicklung der numerischen Modelle des Wärme- und Stofftransports beim Sieden in porösen Medien.
- Anpassung der 200 W verdampfungsgekühlten PEM-Brennstoffzellen-Musterlösung auf PEM-Systeme mit einer elektrischen Leistung im kW-Bereich.

Die in dem Vorhaben entwickelte Verdampfungskühlung für PEM-Brennstoffzellen, wie auch der dampfschlagfreie Verdampfer hoher Leistungsmodulation, können von klein- und mittelständischen Apparatebauern und von Ingenieurbüros genutzt werden, um Komponenten für Brennstoffzellensysteme zu projektieren, zu fertigen und zu liefern.

Das in dem Projekt erarbeitete Know-how ist auch gerade für die Hersteller von zukünftigen Brennstoffzellen-Energiesystemen, wie z. B. Heizgeräteherstellern und Zulieferfirmen der Automobilindustrie, ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung der Erschließung des Brennstoffzellenmarktes. Allein das in Frage kommende Marktsegment im Bereich der Hausenergieversorgung kann mit 900.000 Einheiten pro Jahr in Deutschland abgeschätzt werden.

Sowohl IUTA als auch ZBT sind Mitglieder im „Kompetenz-Netzwerk Brennstoffzelle NRW“, dem eine große Zahl von Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Institutionen angehören, welche sich mit der Brennstoffzellentechnologie und deren Umsetzung befassen. Die Forschungsstelle IWTT ist Mitglied im Netzwerk PEM-Brennstoffzelle Sachsen. Neben den Mitgliedern des Projektbegeleitenden Ausschusses sollen die Forschungsergebnisse insbesondere auch den Mitgliedern der beiden genannten Brennstoffzellen Netzwerke zugänglich gemacht werden. Diese können mit ihren industriellen Erfahrungen Einfluss nehmen und stellen somit auch den Erkenntnistransfer in die Praxis sicher.

### **Zeithorizont zur Verwertung der Ergebnisse:**

#### **Entwicklung größerer verdampfungsgekühlter Bipolarplattenmodule**

09/2006	Projektbeginn
08/2009	Projektende
ab 09/2009	Nutzung des am IUTA aufgebauten Teststands zur Entwicklung größerer verdampfungsgekühlter Bipolarplattenmodule
ab Anfang 2010	Charakterisierung weiterer poröser Medien im Hinblick auf ihre Eignung zur Integration in verdampfungsgekühlte PEM-Stacks

## **Adaption des dampfschlagfreien Verdampfers hoher Leistungsmodulation**

09/2006	Projektbeginn
08/2009	Projektende
ab 09/2009	Adaption des dampfschlagfreien Verdampfers auf höhere Leistungen
ab Anfang 2010	Übertragung des Prinzips des dampfschlagfreien Verdampfens in porösen Strukturen im Rahmen von F&E-Vorhaben auf weitere Anwendungen (z. B. Dampferzeuger zur Sterilisation im Hygienebereich)

## **Weiterentwicklung der numerischen Modelle des Wärmeübergangs beim Sieden in porösen Medien**

09/2006	Projektbeginn
08/2009	Projektende
ab 09/2009	Weiterentwicklung der numerischen Modelle des Wärme- und Stofftransports beim Sieden in porösen Medien

## **Weiterentwicklung der verdampfungsgekühlten PEM-Brennstoffzellen Musterlösung**

09/2006	Projektbeginn
08/2009	Projektende
ab 09/2009	Weiterentwicklung des verdampfungsgekühlten PEM-Brennstoffzellen Fertigungsmusters hin zu einem ausgereiften System
ab Anfang 2010	Anpassung des 200 W Fertigungsmusters im Rahmen von F&E-Vorhaben auf PEM-Systeme mit mehreren kW Leistung

## **Ergebnistransfer 2006**

Für das Jahr 2006 liegen durch die erst relativ kurze Projektlaufzeit von vier Monaten noch keine verwertbaren Ergebnisse vor.  
Ein erstes Treffen des projektbegleitenden Ausschusses wurde für März 2007 angesetzt.

### **Ergebnistransfer 2007**

Im 2007 ist bei den folgenden Gelegenheiten über das Forschungsprojekt berichtet worden:

- Sitzung des Projektbegleitender Ausschuss am 21. März 2007 in Freiberg
- IUTA Tätigkeitsbereich 2006
- AiF Innovationstag 2007

### **Ergebnistransfer 2008**

Im 2008 ist bei den folgenden Gelegenheiten über das Forschungsprojekt berichtet worden:

- Sitzung des Projektbegleitender Ausschuss am 12. März 2008 in Duisburg
- IUTA Tätigkeitsbereich 2007
- Präsentation an der TU Freiberg am 26. November 2008

### **Ergebnistransfer 2009**

Im 2008 ist bei den folgenden Gelegenheiten über das Forschungsprojekt berichtet worden:

- Sitzung des Projektbegleitender Ausschuss am 20. August 2009 in Duisburg
- IUTA Tätigkeitsbereich 2008

### **Ergebnistransfer 2010**

Für das Jahr 2010 sind folgende Publikationen vorgesehen:

- IUTA Tätigkeitsbereich 2009
- Veröffentlichung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens in einem Fachjournal