



forschen.  
vernetzen.  
anwenden.

# Innovationsreport 2025

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 01IF21983N / 21983 N

**Entwicklung von Technologien zur 3D-Charakterisierung  
thermophysikalischer Stoffwerte anisotroper MEA-  
Komponenten und zur Optimierung der Wärmeableitung  
innerhalb von PEM-Brennstoffzellen (THERMOPEM)**

**Laufzeit:**

01.02.2022 - 31.05.2025

**Beteiligte Forschungsstelle(n):**

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik ZBT GmbH,  
Duisburg

Steinbeis-Transferzentrum Wärmemanagement in der Elektronik (ZFW)  
Walldorfhäslach

# Schlussbericht vom 20.10.2025

zum IGF-Vorhaben 01IF21983N

## Thema

Bestimmung thermischer Kontaktwiderstände und anisotroper Wärmeleitfähigkeiten dünner, poröser Folien am Beispiel der MEA-Komponenten von PEM-Brennstoffzellen (THERMOPEM)

## Berichtszeitraum

01.02.2022 bis 31.05.2025

## Forschungsvereinigung

Institut für Umwelt & Energie,  
Technik & Analytik e. V Bliersheimer Str. 58 – 60  
47229 Duisburg

## Forschungseinrichtung(en)

### Forschungseinrichtung 1

Steinbeis Innovation gGmbH, Adornostr. 8, 70599 Stuttgart

Ausführende Forschungsstelle:

Steinbeis-Innovationszentrum Wärmemanagement (ZFW), Lindenstr. 13/1, 72141 Walddorfhäslach

### Forschungseinrichtung 2

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH (ZBT), Carl-Benz-Str. 201, 47057 Duisburg

Platz für ein Logo

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse .....</b>	<b>4</b>
1.1 Arbeitspaket 1: Konzeptentwicklung und Aufbau des Messgeräts zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstands dünner, poröser Schichten und der anisotropen Wärmeleitfähigkeit (ZFW) .....	5
1.2 Arbeitspaket 2: Festlegung der hinsichtlich thermischer Effekte relevanten MEA-Komponenten, Messgrößen und Zielwerte für WLF und TKW dieser Komponenten (ZBT) .....	6
1.3 Arbeitspaket 3: Bestimmung der Temperaturverteilung innerhalb der Zelle bei Verwendung kommerziell verfügbarer CCM bzw. MEA (ZBT) .....	7
1.4 Arbeitspaket 4: Erarbeitung erster werkstoff- und fertigungstechnischer Konzepte zur Verbesserung von WLF und TKW der MEA-Bauteile aus AP3 mit Schwerpunkt auf Katalysatorschichten und CCM sowie GDS (nur TKW) (ZFW, ZBT).....	10
1.5 Arbeitspaket 5: Fertigung und Testung (Funktionsvalidier.) der ersten Versionen des neuen Messgeräts für PEMFC-Baugruppen bzw. Komponenten mit bekannten porösen, dünnen, gut wärmeleitenden Nicht-PEMFC-Materialien (ZFW) .....	10
1.6 Arbeitspaket 6: Charakterisierung kommerzieller PEMFC-Materialien (GDL, GDS, Membranen, CCM) zunächst mit konventionellen Messverfahren (ZFW, ZBT) .....	11
1.7 Arbeitspaket 7: Charakterisierung kommerz. PEMFC-Materialien (GDL, GDS, M., CCM) mit den ersten Versionen des neuen Messverfahrens aus AP5, Vergl. mit Ergebn. aus AP6 (ZFW).....	13
1.8 Arbeitspaket 8: Modifikation von Katalysatorschichten und CCM zur Erhöhung der WLF und Erniedrigung der TKW durch Zugabe von Additiven, Struktur- (Schicht-) Optimierung und CCM-fertigungstechnische Konzepte auf Basis von AP4 (ZBT) .....	14
1.9 Arbeitspaket 9: Qualifikation (ex-situ) der neuen Strukturen aus AP8 hinsichtlich WLF und TWK (ZFW) .....	16
1.10 Arbeitspaket 10: Zielgerichtete Optimierung und Adaptierung des vorläufigen Messgeräts aus AP5 an die Anforderungen der PEMFC-Bauteile auf Basis der bisherigen Erkenntnisse aus den AP5 bis AP9 (ZFW).....	17
1.11 Arbeitspaket 11: Charakterisierung der vorläufig optimierten und ex-situ-qualifizierten PEMFC Baugruppen im Brennstoffzellenbetrieb (in-situ), Bestimmung der inneren Temperaturfelder u. des Leistungsverhaltens in Abh. der Betriebsbedingungen (ZBT).....	18
1.12 Arbeitspaket 12: Iterative, parallelisierte Optimierung des Messverfahrens und der PEMFC- Baugruppen zur Er-höhung von WLF, TKW (ex-situ) und Leistung (in-situ) (ZFW, ZBT) .....	24
<b>2 Verwendung der Zuwendung .....</b>	<b>26</b>
<b>3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....</b>	<b>26</b>
<b>4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten.....</b>	<b>28</b>
<b>5 Wissenstransfer in die Wirtschaft.....</b>	<b>29</b>

<b>6</b>	<b>Durchgeführte Transfermaßnahmen .....</b>	<b>30</b>
<b>7</b>	<b>Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit .....</b>	<b>31</b>

## 1 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Eines der zentralen Ziele des Projekts war die Entwicklung eines neuen Messverfahrens und eines dazugehörigen Messaufbaus für die thermische Charakterisierung von PEMFC Komponenten. Diese sind meist sehr dünn, porös und anisotrop. Es war zu erwarten, dass die Wärmeleitfähigkeit der Materialien richtungs-, temperatur- und druckabhängig ist. Außerdem war davon auszugehen, dass die Wärmeleitfähigkeit poröser Schichten vom Füllgas und dessen Feuchtegrad abhängig ist. Messgrößen im neuen Messverfahren sind die Wärmeleitfähigkeiten  $\lambda$  der Materialien in der Ebene (im Folgenden In-Plane IP) und durch die Ebene (im Folgenden Through-Plane TP) sowie die thermischen Kontaktwiderstände  $r_c$  zwischen den Schichten im PEMFC Aufbau. Es konnte ein Messaufbau entwickelt und in Betrieb genommen werden, bei dem Materialproben eingelegt und bei verschiedenen Temperaturen, Flächenpressungen und Füllgasen in alle drei Raumrichtungen charakterisiert werden können. Abbildung 1 zeigt den im Rahmen des Projekts entwickelten Messaufbau in einer temperierten Kammer zur Reduktion von Umgebungseinflüssen bei der Messung.

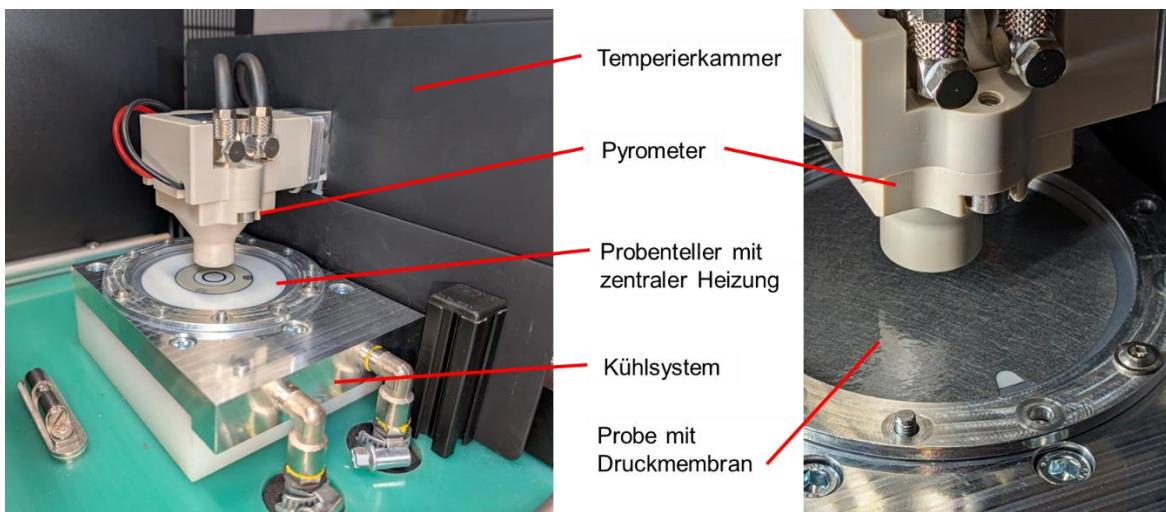


Abbildung 1: Finales Messsystem in Temperierkammer (links); mit eingelegter Probe und Druckmembran (rechts)

Zentrale Komponente ist ein mehrteiliger Probenteller mit einer mittig eingesetzten, elektrischen Heizung. Der runde Probenteller ist umlaufend an ein Kühlungssystem angebunden. Auf den Probenteller können die ebenfalls runden Proben aufgelegt und dann mit einer polymeren Druckmembran auf den Probenteller gepresst werden. Darüber befindet sich ein radial bewegliches Pyrometer, mit dem kontaktlos die Temperatur auf der Probenoberseite bestimmt wird. Wird die Probe von der Unterseite entweder transient oder stationär beheizt und der zeitliche oder örtliche Temperaturverlauf auf der Probenoberseite gemessen, kann daraus direkt auf die thermischen Eigenschaften der Probe geschlossen werden.

TP-Messungen (Through-Plane) laufen transient ab. Ausgewertet wird der zeitliche Temperaturverlauf auf der Probenoberseite. Aus diesem und der bekannten eingetragenen Heizleistung wird die TP-Wärmeleitfähigkeit der Probe oder bei einem Mehrschichtaufbau ein dazwischenliegender Kontaktwiderstand bestimmt. IP-Messungen (In-Plane) werden unter stationären Bedingungen durchgeführt. Gemessen wird der radiale Temperaturverlauf auf der Probenoberseite. Ausgewertet wird der radiale Temperaturgradient in zwei Messintervallen: Oberhalb des inneren, beigefarbenen Probentellers und oberhalb des äußeren, weißen Probentellers. Aus diesen beiden Temperaturgradienten kann die sogenannte Leitzahl der Probe, das Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Dicke [ $\lambda \times \delta$ ] bestimmt werden. Wird anschließend die Dicke der Probe gemessen, kann die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden. Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die schrittweise

Entwicklung und Optimierung des Messverfahrens, den Aufbau der Messapparatur sowie alle begleitenden Arbeiten und Materialstudien, aufgeteilt in 12 Arbeitspakete.

## 1.1 Arbeitspaket 1: Konzeptentwicklung und Aufbau des Messgeräts zur Bestimmung des thermischen Kontaktwiderstands dünner, poröser Schichten und der anisotropen Wärmeleitfähigkeit (ZFW)

### Durchgeführte Arbeiten

Zu Beginn des Projektzeitraums wurden mehrere mögliche Messaufbau-Konzepte entwickelt und mittels CFD-Simulation untersucht. Dabei wurden Auswertealgorithmen entwickelt und mögliche systematische Messabweichungen durch den jeweiligen Messaufbau erkannt und durch Designanpassungen von Beginn an reduziert. Anschließend wurden Komponenten für einen ersten Testaufbau beschafft, Messsensorik, Probenteller sowie eine mögliche Druckmembran ausgewählt und ein rudimentäres System zum Aufzeichnen von Messdaten aufgebaut. Abbildung 2 zeigt die darauffolgende schrittweise Weiterentwicklung des Messgeräts in den ersten fünf Prototypenstufen.



Abbildung 2: Chronologische Weiterentwicklung der Prototypen des Messgeräts

Die Messergebnisse zeigten anfangs hohe Abweichungen zu den erwarteten Werten und eine schlechte Reproduzierbarkeit. In mehreren Iterationsstufen wurden die Prototypen erprobt und größere Optimierungen, sowie zahlreiche kleinere Detailverbesserungen in die folgenden Versionen eingebbracht. Auch der Aufbau- prozess des dünnen, mehrteiligen Probentellers konnte verbessert werden.

Ab dem 4. Prototypen wurde ein geändertes Heizkonzept mit einem selbst entwickelt und gebautem keramischen Heizer eingesetzt, welches für Messung der TP-Wärmeleitfähigkeit benötigt wird. Im darauffolgen- den Aufbau wurde der Pyrometer für eine stabilere Signalqualität und höher zeitliche Auflösung ersetzt. Dieser erhielt zusätzlich noch eine aktive Fluidtemperierung zur Linearisierung des Signalverlaufs.

### Erzielte Ergebnisse

Das Konzept des Messgeräts konnte durch CFD-Simulationen zu Beginn und eine Abwandlung des Designs vom ursprünglich geplanten Konzept überzeugen. Die Prototypen mit zwei konzentrisch angeordneten Probentellern vermindern parasitäre Wärmepfade im Aufbau und liefern reproduzierbare Messergebnisse. Die umfassenden Weiterentwicklungen über mehrere Versionen hinweg verbesserten die Ergebnisse weiter.

Nachdem bei schlecht wärmeleitenden Proben zu starke Schwankungen auftraten, führte eine Verlängerung der Messstrecke durch einen äußeren Probenteller mit größerem Außendurchmesser wiederholbar zu guten

Ergebnissen. Der Auswertealgorithmus und Kalibermessungen konnten systematische Messabweichungen noch weiter reduzieren.

Mit dem 5. Prototypen wurde ein erstes funktionsfähiges Messgerät aufgebaut, das durch die folgenden Arbeitspaketen weiter erprobt und verbessert werden soll. Es waren bereits jetzt automatisierte IP-Messungen mittels motorisierter Achse möglich, die durch eine Messsoftware in Labview gesteuert wurde. Das TP-Messverfahren wurde durch eine Anpassung des Heizungskonzepts und einen anderen Sensor mit höherer zeitlicher Auflösung ermöglicht und erste Versuche durchgeführt.

## 1.2 Arbeitspaket 2: Festlegung der hinsichtlich thermischer Effekte relevanten MEA-Komponenten, Messgrößen und Zielwerte für WLF und TKW dieser Komponenten (ZBT)

### Durchgeführte Arbeiten:

Die thermophysikalischen Eigenschaften der MEA-Einzelkomponenten (Bulk-WLF) und die Übergangswiderstände (TKW) wurden zunächst theoretisch abgeschätzt und in Bezug auf ihre prinzipielle Relevanz für das elektrochemische System MEA bewertet. Anschließend wurde die MEA als elektrochemischer Verbund für das Thermomanagement der Zelle betrachtet und die Einflüsse der Umgebungsbedingungen auf die thermophysikalischen Eigenschaften wurden z.T. basieren auf den Literaturdaten und eigener Erfahrung abgeschätzt.

### Erzielte Ergebnisse:

Neben der modelhafte Betrachtung, Analyse und Bewertung der Wärmequellen, Wärmewiderstände und Wärmeflusspfade innerhalb der Zelle, wurde eine MEA-Komponenten- und Betriebsparametermatrix, bestehend unter anderem aus den für die Anwendung relevanten Angaben zu Temperaturen, Wassergehalten (gasförmig, flüssig) bzw. rel. Feuchten, Flächenpressungen, Kontakt Situationen (FF-Geometrie) erstellt. Diese Daten stellen die Arbeitsgrundlage für die experimentellen Arbeiten dar.

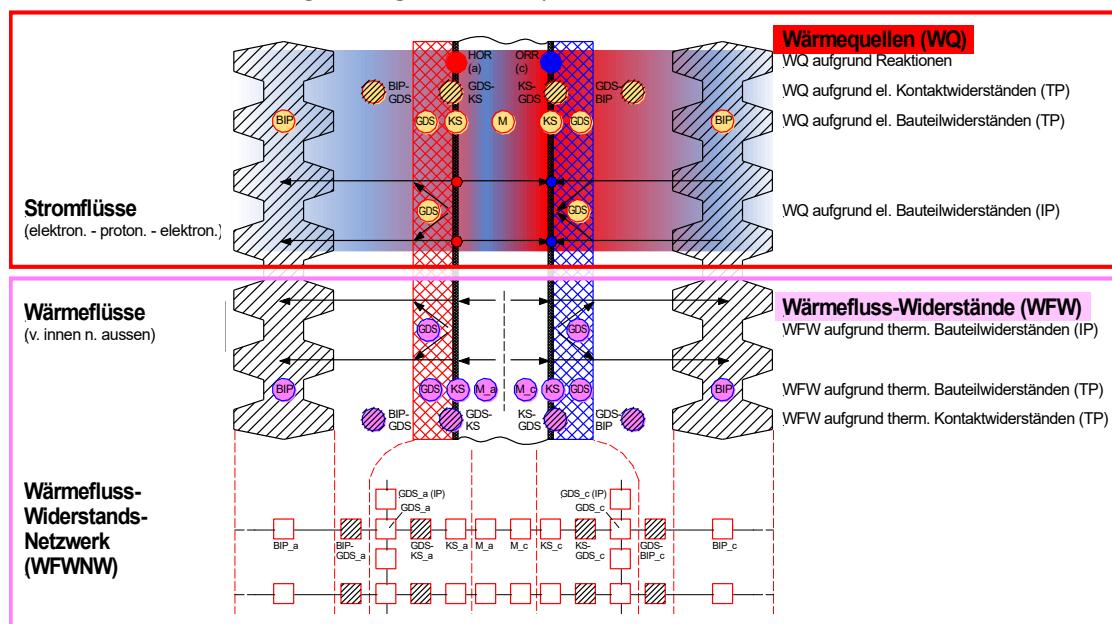


Abbildung 3: Modelhafte Veranschaulichung der Wärmequellen, Wärmewiderstände und Wärmeflusspfade innerhalb der Zelle

### 1.3 Arbeitspaket 3: Bestimmung der Temperaturverteilung innerhalb der Zelle bei Verwendung kommerziell verfügbarer CCM bzw. MEA (ZBT)

#### Durchgeführte Arbeiten:

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde die Temperaturverteilung in Brennstoffzellen sowohl unter realen als auch unter extremeren Bedingungen systematisch untersucht. Dafür wurden kommerziell verfügbare Folien-Mikrosensoren beschafft, zunächst in einen ersten Messaufbau integriert und mit einer Low-Performer-Konfiguration grundlegende Temperatur-Kennwerte erhoben. Die darauf aufbauenden Untersuchungen wurden erfolgreich auf eine Hochleistungszelle ausgeweitet. Dadurch konnten Temperaturfelder in Abhängigkeit von eingesetzten MEA-Komponenten, Betriebspunkten und Betriebsstrategien umfassend erfasst und ausgewertet werden. Parallel dazu wurde das multisensorische Verfahren zur Temperaturerfassung sowie zur Bestimmung von Temperaturgradienten innerhalb der MEA iterativ weiterentwickelt und optimiert. Insgesamt liegen belastbare Messreihen und ein validierter Messaufbau vor, die eine fundierte Bewertung der thermischen Betriebszustände einer Einzelzelle ermöglichen und die Basis für weiterführende Arbeiten zur gezielt - thermisch orientierten - Modifikation und Charakterisierung der MEA bei Variation der eingesetzten Komponenten, Betriebsparameter im Realbetrieb bilden.

#### Erzielte Ergebnisse:

Der Betrieb einer PEM-Brennstoffzelle bzw. die multidimensionalen Zusammenhänge zwischen den Betriebsbedingungen, der sich einstellenden Temperatur, Temperaturverteilung und Entwicklung in Abhängigkeit von dem Betriebs- und Strombelastungspunkt sind komplex und immer noch nicht ganz verstanden. Um diese Phänomene besser verstehen zu können, musste der Umfang und die Tiefe Untersuchungen im Vergleich zu dem ursprünglichen Arbeitsplan deutlich erweitert werden. Es wurden umfangreiche Messreihen unter systematischer Variation und iterativer Erweiterung der Versuchsmatrix durchgeführt.

Für die ersten, orientierenden Versuche zur Abschätzung der ortsabhängigen Temperaturen und Verteilungen innerhalb der MEA und bzw. der Einzelzelle wurden subminiaturisierte, semikommerzielle Thermo-Folienensensoren in die Brennstoffzelle implementiert (siehe Abbildung 4). Die Sensoren wurden zunächst mit Baltic@-Standard-Flowfields – aufgrund deren relativ groben Steg-Kanal-Geometrie – auf unterschiedlichen Zell-Tiefenebenen – jeweils zwischen der CCM und der GDL bzw. zwischen der GLD und der Flowfieldplatte – positioniert. Der erweiterte Messaufbau wurde erfolgreich in Betrieb genommen sowie die thermosensorische Funktionalität mit einer konventionellen CCM erster Generation getestet.

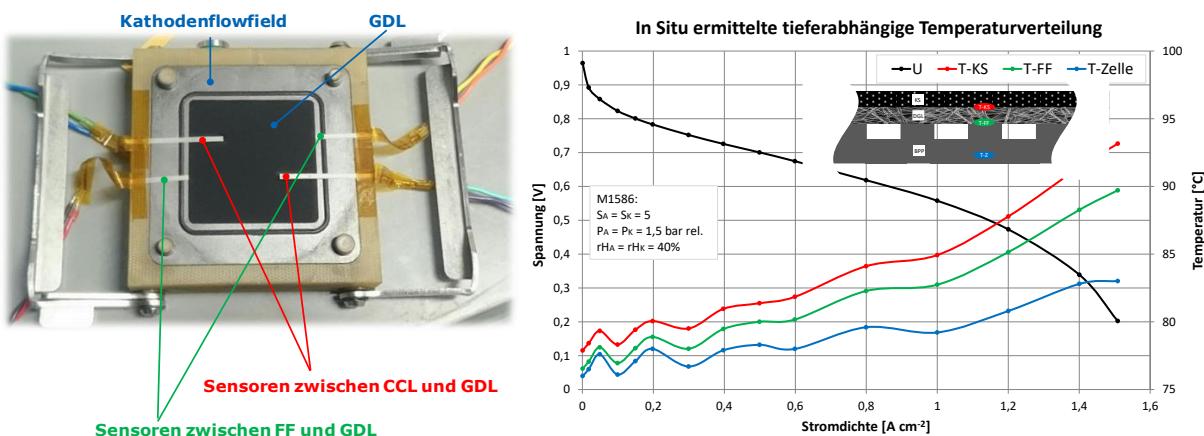


Abbildung 4: Bestimmung der Temperaturverteilung innerhalb der Standard-Einzelzelle

Die mit Thermosensoren ausgestattete Einzelzelle lieferte adäquate Perfomance und die Temperaturwerte und -Verteilung waren plausibel. Mit der Zunahme der Stromdichte bzw. mit der Abnahme der Zellspannung (Abbildung 5) nahmen die Verluste zu. Dies äußerte sich mit der eindeutigen verlustbedingten Zunahme des Temperurniveaus innerhalb der Zelle (siehe Abbildung 5).

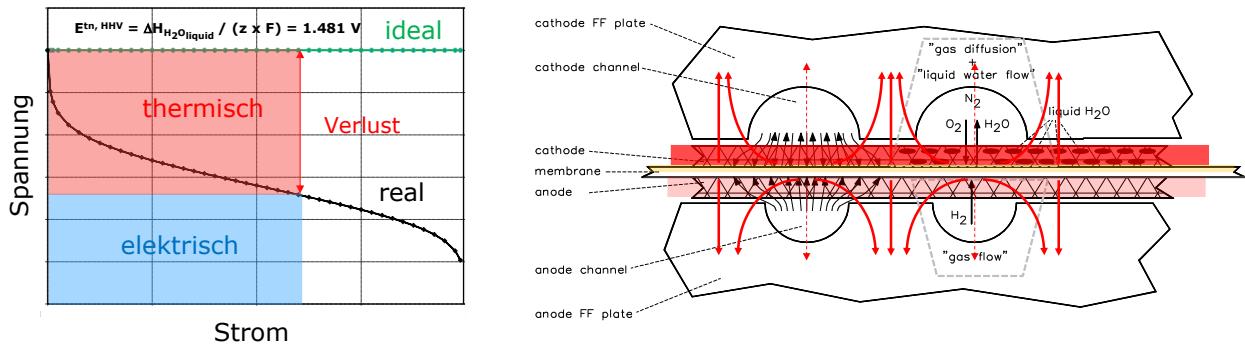


Abbildung 5: Kennlinie und theoretische Betrachtung der Verluste innerhalb einer Brennstoffzelle

Die Hauptwärmequelle wurde dabei die Katalysatorschicht identifiziert. Selbst bei moderaten Stromdichten von ca.  $1,5 \text{ A.cm}^{-2}$  lag die ermittelte Temperatur an der Kathodenkatalysatorschicht mehr als  $10^\circ\text{C}$  über der Temperatur des Kühlmediums, die als Regelgröße (Standardmessstelle) agierte. Somit wurde nicht nur die prinzipielle Funktionalität des erweiterten Messaufbaus erfolgreich validiert, sondern die wesentlichen Hindernisse in den Wärmepfaden aufgezeigt.

Daraufhin wurden mehrere Einzel-Sensoren in die Brennstoffzelle mit dem am ZBT entwickelten Hochleistungs-Flowfields mit sehr feiner Steg-Kanal-Architektur an unterschiedlichen Tiefenebenen (siehe Abbildung 6), also entlang der Wärmepfade erfolgreich implementiert. Im folgenden Abschnitt sind wesentliche Messergebnisse aus den Testreihen mit der High Performance-Zelle unter Variation kommerziell verfügbarer MEA-Komponenten und Betriebsbedingungen bzw. Temperaturregelstrategien repräsentativ zusammengefasst.

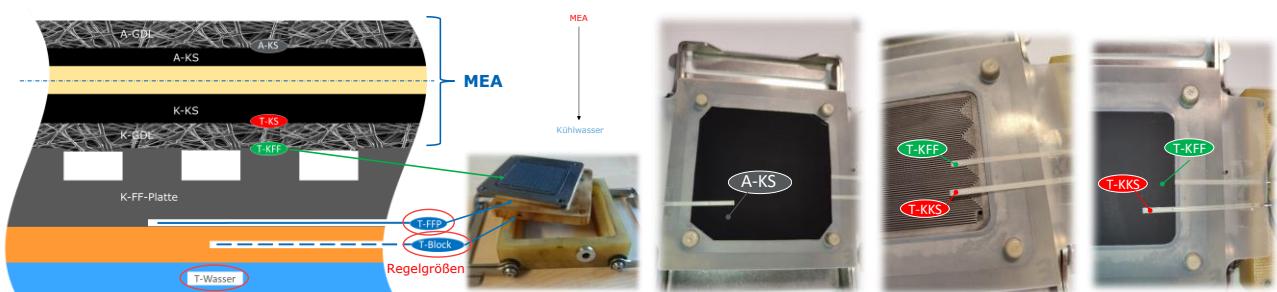


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Sensorintegration zur tiefenaufgelösten Charakterisierung der Temperaturverteilung einer PEMFC

Die Peak-Betriebsbedingungen der Pol. 1, und zwar hohe Stöchiometrie von 5 und hohe relative Feuchte von 100% rF. haben im Vergleich zu den realitätsnäheren Bedingungen (Pol 3, Stöchiometrie 2, trocken Kathode) nicht nur signifikante bessere Performance (siehe Abbildung 7), sondern hatten auch deutlich höhere maximal aufgetretene Temperatur an den Katalysatorschicht bis fast  $90^\circ\text{C}$  vs. ca.  $85^\circ\text{C}$  bei 0,2 V zur Folge.

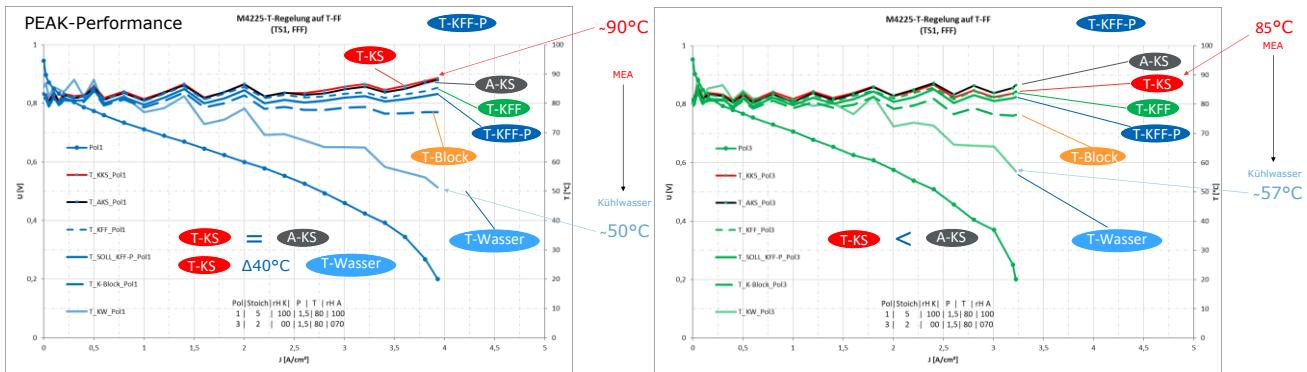


Abbildung 7: Ermittelte Leistungs- und Temperatur-Daten einer Hochleistungs-PEMFC in Abhängigkeit von den Betriebsparametern bei PEAK-Performance (Pol. 1, links) und bei praxisnahen Betriebsbedingungen (Pol. 3, rechts)

Für die gute Performance einer Brennstoffzelle ist es zudem die Temperaturregelstrategie entscheidend. Dabei sollte im Idealfall die Soll-Regelstelle möglichst nah an der Katschicht, also direkt an der Wärmequelle Katalysatorschicht sein. Die Konsequenzen der Verwendung der weiter entfernten Mess-Regelstellen sind sehr eindeutig und sind repräsentativ in Abbildung 8 dargestellt und zwar für die zwei ausgewählten Betriebsbedingungen Pol. 1 (oben) und Pol. 3 (unten) für die Temperatur-Regelung auf die Kühlplatte (T-Block) bzw. auf das Kühlwasser (Wasser).

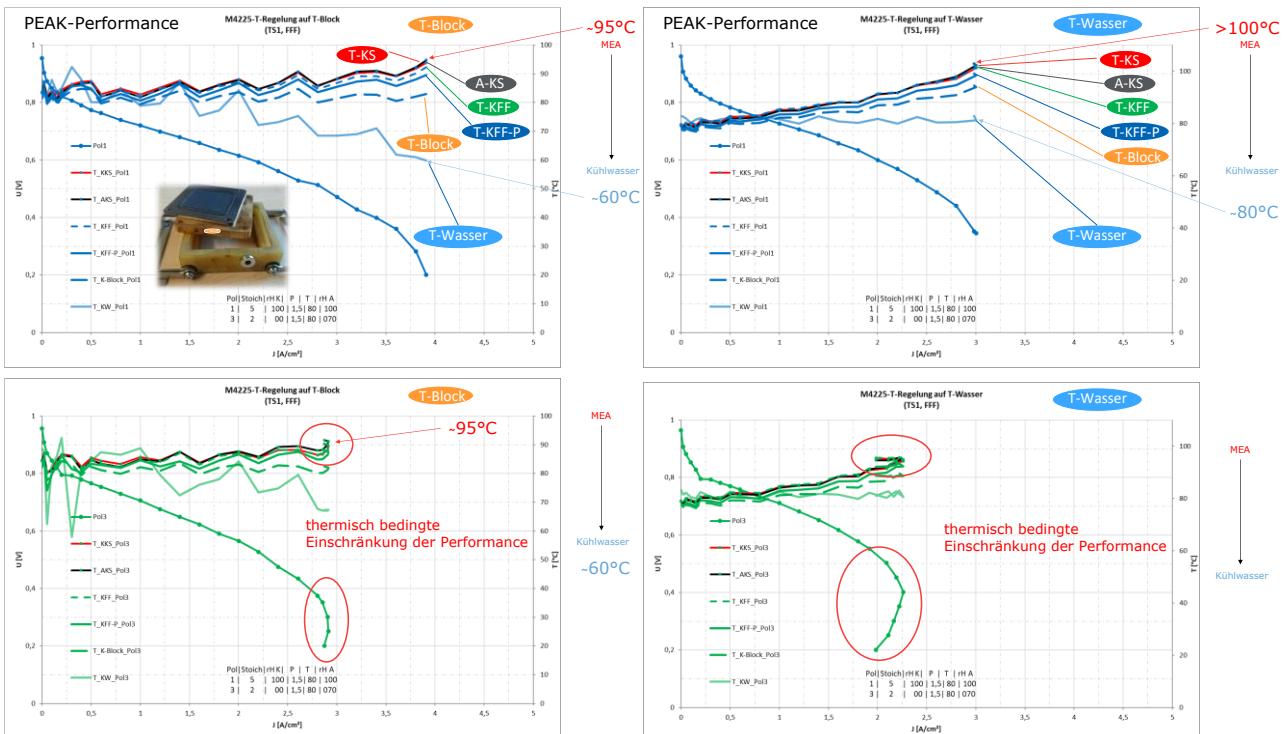


Abbildung 8: Ermittelte Leistungs- und Temperatur-Daten einer Hochleistungs-PEMFC in Abhängigkeit von der Temperaturregelstrategie (Regelung auf die Kühlplatte, links und auf das Kühlwasser, rechts) bei PEAK-Performance (Pol. 1 oben bzw. Pol. 3 unten)

Bei Pol. 1 und Regelung aufs Kühlwasser (80°C) traten an der Kathoden-Katalysatorschicht Temperaturen weit über 100°C auf, bei Pol. 3 stiegen sie bis auf 95°C. Zusätzlicher bemerkenswerter Effekt konnten bei geringerer Stöchiometrie und Feuchte der Pol. 3 beobachtet werden, nämlich die temperaturbedingte Abnahme der Zellspannung bei weitestgehend konstanter Stromdichte bei Spannungswerten zwischen 0,4V und 0,2V (siehe Abbildung 8 unten). Zwischen den beiden Katschichten – Anode und Kathode – scheint es keinen signifikanten Temperaturgradienten zu geben, sodass der Wärmepfad von Kathode zu Anode – also

durch die Membran - tendenziell keine große Signifikanz darstellt, sodass im weiteren Arbeitsabschnitte auf die Erfassung der Anodentemperatur verzichte wurde. Der Wärmeabtransport und das Wärmemanagement sind aber für die Performance und Stabilität der PEMFC ausgesprochen wichtig und erfordert zudem weiter-führender Optimierungsmaßnahmen thermischer Eigenschaften aller Komponenten der MEA und Zelle.

#### **1.4 Arbeitspaket 4: Erarbeitung erster werkstoff- und fertigungstechnischer Konzepte zur Verbesserung von WLF und TKW der MEA-Bauteile aus AP3 mit Schwerpunkt auf Katalysatorschichten und CCM sowie GDS (nur TKW, ZBT) (ZFW, ZBT)**

##### **Durchgeführte Arbeiten:**

Zur Optimierung der thermischen Eigenschaften der MEA in PEM-Brennstoffzellen wurden auf Basis fundierter Kenntnisse, Literaturrecherche und eigener Vorarbeiten zielgerichtete werkstoff- und fertigungstechnische Konzepte entwickelt. Im Fokus standen sowohl die Verbesserung der thermophysikalischen Bulk-Eigenschaften – primär der Katalysatorschichten – als auch die Optimierung ihrer thermischen Anbindung an Membran (PEM) und Gasdiffusionsschicht (GDL). Dazu wurden vielversprechende Materialien identifiziert und beschafft, passende Rezepturen und Prozesspfade ausgearbeitet sowie mehrere modifizierte Kathoden-Katalysatorschichten gefertigt und vorcharakterisiert. Damit liegen belastbare Ansätze für Materialauswahl, Schichtdesign und Prozessführung vor, die eine verbesserte Wärmeleitung und Kopplung innerhalb der MEA erwarten lassen. Diese Vorarbeiten bildeten eine fundierte Basis für die fertigungstechnische Umsetzung in den nachfolgenden Arbeitspaketen.

##### **Erzielte Ergebnisse:**

Es wurde eine Problem-Lösungs-Parameter-Matrix für MEA-Einzelkomponenten und den Verbund erstellt, iterativ optimiert und ergänzt. Die Arbeitsschwerpunkte lagen (i) auf den MEA-Fertigungsmethoden – Direktbeschichtung der Membran (CCM) bzw. der GDL (GDE), jeweils mit und ohne Heißlaminieren –, (ii) auf der systematischen Anpassung der Kathoden-Katalysatorschicht (Ionomer-zu-Kohlenstoff-Verhältnis und -Verteilung) sowie (iii) auf der Integration chemisch stabiler, hochleitfähiger 1D-, 2D und 3D primär Kohlenstoff-Nanomaterialien (Graphit, CNF, Graphen) in die Katalysatorschicht. Im Arbeitspaket AP8 wurden die in der Matrix abgeleiteten Fertigungsansätze zur Modifikation und Herstellung thermooptimierter Katalysatorschichten umgesetzt und deren Eigenschaften experimentell validiert.

#### **1.5 Arbeitspaket 5: Fertigung und Testung (Funktionsvalidier.) der ersten Versionen des neuen Messgeräts für PEMFC-Baugruppen bzw. Komponenten mit bekannten porösen, dünnen, gut wärmeleitenden Nicht-PEMFC-Materialien (ZFW)**

##### **Durchgeführte Arbeiten**

Die Aufgaben dieses Arbeitspaketes waren nicht wie vorerst geplant nach der Fertigung und Testung des ersten Prototyps erledigt. Im Laufe des Projekts kam es zu Anpassung an die PEMFC-Bauteile (AP10) und zu größeren Änderungen am Messsystem. So erforderte zum Beispiel der Austausch des Pyrometers und das Abschirmen des Messaufbaus durch eine temperierte Messkammer weitere Funktionsvalidierungen im Entwicklungszeitraum, da sich die Datenqualität zu stark änderte.

Als Referenzmaterialien für die Messung in der Ebene wurden folgende Nicht-PEMFC-Materialien mit isotroper Wärmeleitfähigkeit ausgewählt: PTFE, Edelstahl, Titan, Messing und Kupfer. Diese wurden mit der Laser-Flash Analyse (ASTM E1462) vermessen und ihre Wärmeleitfähigkeiten zwischen 0,3 W/(m\*K) und 400 W/(m\*K) bestimmt. Für die Messung auf dem Prüfstand wurden dünne Folien der Referenzmaterialien zugeschnitten und gemessen. Die eigentliche Validierung beruht auf der Auswertung der sensitiven Größe „Leitzahl“ [ $\lambda \times \delta$ ], dem Produkt aus Wärmeleitfähigkeit und Dicke der Probe (Einheit: W/K).

Für die Funktionsvalidierung der Messung durch die Ebene sind die Metallfolien nicht geeignet, da die TP-Messung sehr sensiv auf Kontaktwiderstände reagiert. Daher wurden hierfür Wärmeleitpads verwendet, die sich sehr gut an die Oberfläche der Heizungskeramik anlegen und deren TP-Wärmeleitfähigkeit aus Messungen nach ASTM D5470 bekannt ist.

### Erzielte Ergebnisse

Die Diagramme in Abbildung 9 zeigen die Ergebnisse der Funktionsvalidierung für zwei Prototypenstände. Die errechnete Leitzahl der Messungen wird hierbei über die Referenz-Leitzahl der Laser-Flash-Analyse aufgetragen. Bei einem idealen Messsystem ohne Messabweichungen würden die Messwerte auf der schwarzen Diagonale liegen.

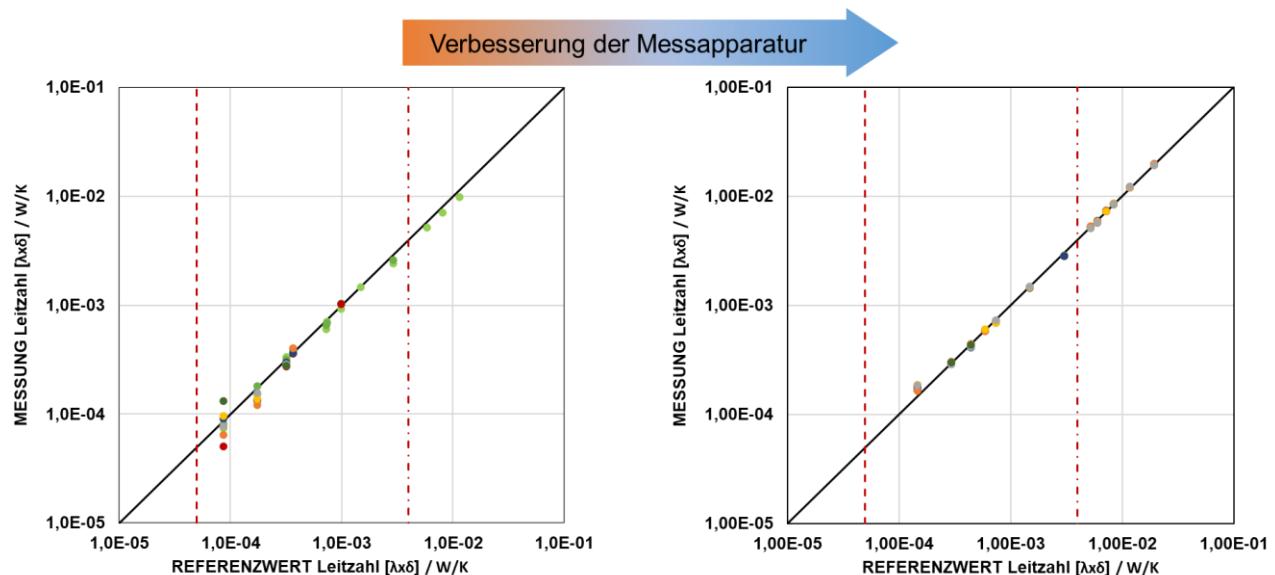


Abbildung 9: Validierungsergebnisse IP-Messungen

Beim zweiten Prototypen (links) ist noch eine große Streuung im unteren und eine abknickende Kurve im oberen Bereich der Leitzahl zu sehen. Die zahlreichen Optimierungen am Messaufbau konnten die Ergebnisse über den gesamten Leitwert-Bereich verbessern und sowohl die Reproduzierbarkeit als auch die absolute Genauigkeit konnte deutlich verbessert werden, siehe Darstellung rechts.

## 1.6 Arbeitspaket 6: Charakterisierung kommerzieller PEMFC-Materialien (GDL, GDS, Membranen, CCM) zunächst mit konventionellen Messverfahren (ZFW, ZBT)

### Durchgeführte Arbeiten

Am ZFW wurden zahlreiche kommerzielle GDL- und GDS-Proben sowie ein Graphitpulver mit der stationären Zylindermethode (TP-Wärmeleitfähigkeit) untersucht. Ziel war es, die Möglichkeiten und Grenzen

vorhandener Messverfahren zu erproben, um die Größenordnungen der erwarteten Materialeigenschaften zu bestimmen und die Anforderungen an einen neu zu entwickelnden Messaufbau zu präzisieren. Ergänzend wurden IP-Messungen an PEMFC-Materialien mit einem vorhandenen Messaufbau durchgeführt, der ursprünglich für metallische, hoch wärmeleitfähige Folien ausgelegt ist. Diese Messungen sollten erste Vergleichs- bzw. Referenzwerte liefern. Parallel dazu erfolgten durch das ZBT komplementäre Messungen der elektrischen bzw. ionischen Leitfähigkeit an GDLs und Membranen, um mögliche Korrelationen zwischen elektrischen und thermischen Eigenschaften zu validieren.

### Erzielte Ergebnisse

Mit der stationären Zylindermethode konnte die TP-Wärmeleitfähigkeit von GDL und GDS Proben ermittelt werden. Dabei wurde die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit sowohl von der Flächenpressung als auch von der Anzahl gestapelter Lagen untersucht. Abbildung 10 veranschaulicht beispielhaft diese Abhängigkeiten für ein ausgewähltes Material (TGP-H\_060) in Form einer 3D-Darstellung.

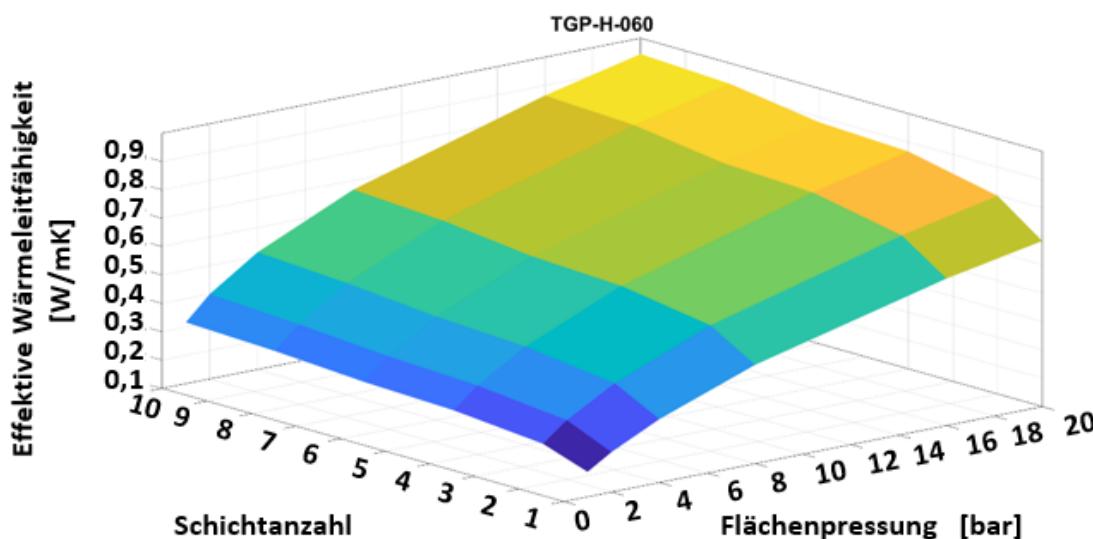


Abbildung 10: Effektive Wärmeleitfähigkeit einer TGP-H060 GDL abhängig von der Flächenpressung und Anzahl der Schichten

Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit bei geringer Lagenzahl deutlich niedriger ist und mit zunehmender Anzahl der Probenlagen ansteigt, bis sich ab etwa sechs Lagen ein nahezu konstanter Wert einstellt. Ein ähnlicher Anstieg konnte auch mit steigender Flächenpressung beobachtet werden. Die typischen Werte lagen unter 1 W/(m·K). Gleichzeitig zeigte sich, dass die Methode für die Untersuchung von Einzellagen nicht geeignet ist, da Kontaktwiderstände einen erheblichen Einfluss auf das Messergebnis haben. Ab etwa sechs Lagen sind diese Effekte vernachlässigbar.

Die ergänzenden IP-Messungen mit dem vorhandenen Aufbau ergaben, dass dieser für PEMFC-Materialien ungeeignet ist, da deren Wärmeleitfähigkeit weit unter dem vorgesehenen Messbereich des Messaufbaus liegt und signifikante Abweichungen zu Literaturwerten auftraten. Dies bestätigte die Notwendigkeit, ein neues, spezifisch auf PEMFC-Materialien abgestimmtes Messverfahren zu entwickeln. Für PEMFC-Membranen konnten unter Normbedingungen orientierende Referenzwerte ermittelt werden, die in die weitere Entwicklung des neuen Messverfahrens einflossen. Insgesamt zeigte sich, dass die bestehenden Verfahren am ZFW nur eingeschränkt geeignet sind und lediglich begrenzte Randbedingungen (Temperatur, Feuchte, Flächenpressung) abdecken. Die vom ZBT ergänzend ermittelten elektrischen und ionischen Messwerte

lieferten zusätzliche Daten zur Bewertung möglicher Korrelationen zwischen elektrischen, ionischen und thermischen Eigenschaften.

### **1.7 Arbeitspaket 7: Charakterisierung kommerz. PEMFC-Materialien (GDL, GDS, M., CCM) mit den ersten Versionen des neuen Messverfahrens aus AP5, Vergl. mit Ergebn. aus AP6 (ZFW)**

Im Rahmen von AP7 wurden erste kommerzielle GDL- und GDS-Materialien mit dem neu entwickelten Messaufbau untersucht. Ziel war die erstmalige Anwendung des in AP5 entwickelten Messverfahrens zur Ermittlung der anisotropen Wärmeleitfähigkeiten (in-plane und through-plane) unter anwendungsnahen Bedingungen. Hierzu wurde der Messablauf zusammen mit dem Aufbau in mehreren Punkten weiterentwickelt und hinsichtlich Benutzerfreundlichkeit optimiert. Wichtige Maßnahmen umfassten:

- Festlegung eines standardisierten Probenhandlings (Zuschnitt, Ausrichtung, Reinigung)
- Optimierung des Vakuumsystems zur Einstellung verschiedener Flächenpressungen (0,7 – 1 bar)
- Festlegung eines standardisierten Vortemperier- und Kalibrierablaufs vor jeder Messreihe zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit.
- Weiterentwicklung der Messsoftware zur besseren Bedienbarkeit und Datenauswertung
- Anwendung modifizierter Algorithmen zur Vorbereitung einer späteren Auswertung thermischer Kontaktwiderstände

Die durchgeführten Messungen erfolgten unter trockenen Bedingungen bei Raumtemperatur und zielen auf die Ermittlung anisotroper Wärmeleitfähigkeiten in zwei Raumrichtungen.

#### **Erzielte Ergebnisse**

Die im Rahmen von AP7 gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Weiterentwicklung des Messverfahrens und ermöglichen künftig eine breitere Charakterisierung von PEMFC-Materialien unter realitätsnahen Bedingungen. Die ersten Messreihen mit der neuen Apparatur lieferten physikalisch plausible Werte für verschiedene GDL- und GDS-Materialien. Für einige Proben konnte eine gute Übereinstimmung mit Literaturdaten erzielt werden. Das Material „Toray TGP-H-060“ zeigte eine überdurchschnittlich hohe Wärmeleitfähigkeit. Die Materialien mit aufgebrachter Mikroporenenschicht (MPL) lagen erwartungsgemäß im unteren Bereich der ermittelten Werte. Eine zentrale Herausforderung war zunächst die Sicherstellung der Messstabilität. Es zeigten sich zu Beginn noch deutliche Streuungen und eine verbessерungsbedürftige Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Diese Effekte konnten jedoch durch die in diesem Arbeitspaket etablierten Maßnahmen, insbesondere die Standardisierung der Probenvorbereitung und die Optimierung des Messablaufs, entscheidend minimiert werden. Insbesondere bei sorgfältiger Probenpräparation wurden stabile und reproduzierbare Ergebnisse erreicht. Der Abgleich mit den in AP6 gewonnenen Referenzwerten zeigte eine gute Korrelation. Damit konnte die grundsätzliche Eignung der neuen Apparatur zur Charakterisierung anisotroper Wärmeleitung in PEMFC-Materialien bestätigt werden, siehe Abbildung 11.

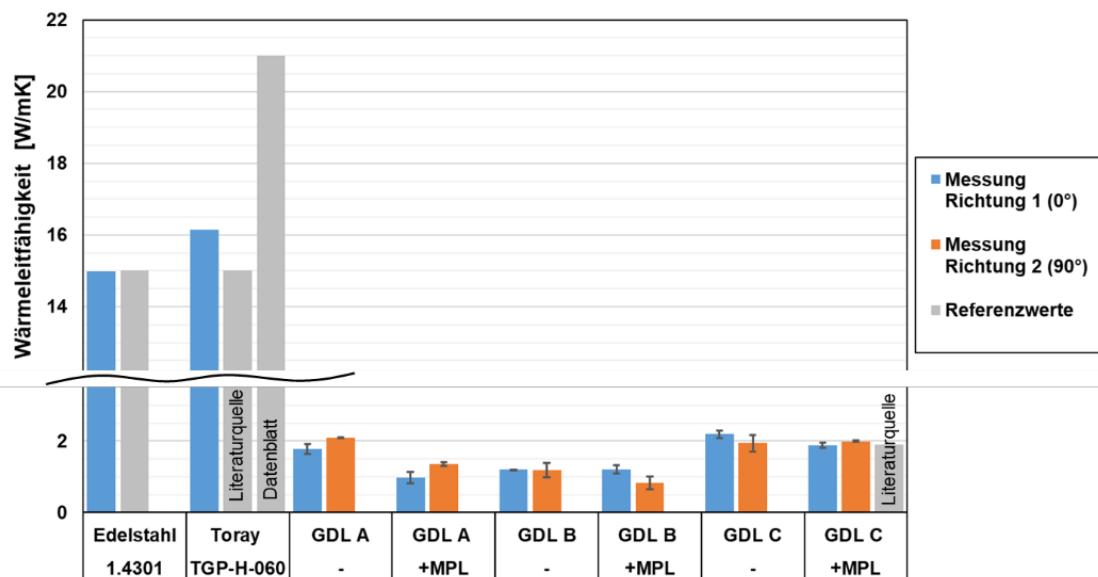


Abbildung 11: Validierung der IP-Messungen an Referenzmaterialien und verschiedenen GDL/GDS-Typen

Die Messwerte des neuen Aufbaus zeigen eine gute Übereinstimmung mit Literaturwerten, sowohl für eine hochleitfähige Edelstahlfolie als auch für typische PEMFC-Materialien. Die Materialien A-C repräsentieren dabei den Wertebereich kommerzieller GDL/GDS, während Toray TGP-H-060 eine GDL mit besonders hoher Leitfähigkeit darstellt.

## 1.8 Arbeitspaket 8: Modifikation von Katalysatorschichten und CCM zur Erhöhung der WLF und Erniedrigung der TKW durch Zugabe von Additiven, Struktur- (Schicht-) Optimierung und CCM-fertigungstechnische Konzepte auf Basis von AP4 (ZBT)

### Durchgeführte Arbeiten

Die Arbeiten dieses Arbeitstaktes hatten auf die ganzheitliche Optimierung der Zell-Performance primär durch fertigungs- und werkstofftechnische Modifikationen der MEA als Einzel-Komponenten und auch als System mit dem Schwerpunkt Thermooptimierung der Übergangs widerstände/ Wärmetransportengpässe innerhalb der MEA und der Zelle. Global betrachtet wurden die Wärmepfade zwischen der MEA und dem Kühlwasser, aber auch im Detail zwischen der Katschicht und der GDL bzw. der Kathodenkatalysatorschicht analysiert und präparativ optimiert.

Die Arbeiten umfassten die Applikation der Katalysatorschicht mit  $0,2\text{mg}_{\text{Pt}}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Sprühen, Rakeln, iCMM, dCCM, GDE mit/ohne Heißpressen) und zu der Additiv-gestützten Modifikation der Komponenten. Ausgewählten Additive wurden zusammen mit den funktional notwendigen, konventionellen KS-Materialien (Ionomer, Katalysatorpulver, Lösemittel) zu Dispersionen und anschließend stufenweise zu Katalysatorschichten zunächst auf inerte Trägerfolien bzw. Substrate aufgetragen und nachgelagert vorcharakterisiert (Homogenität, Dicke, elektrische Leitfähigkeit in der Ebene). Die hergestellten, in neuartiger Weise modifizierten Katalysatorschichten wurden in den Arbeitspakten 11 und 12 tiefergehend *in situ* charakterisiert sowie iterativ weiter optimiert.

Zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Effizienz wurden Katalysatorschichten und CCMs gezielt modifiziert. Der Fokus lag auf der Erhöhung der WLF und der Reduktion der TKW durch Additivzugaben, strukturelle (Schicht-)Optimierungen sowie anlagentechnisch/prozessuale CCM-Fertigungskonzepte.

## Erzielte Ergebnisse

Die Schwerpunkte der präparativen Arbeiten lagen auf der systematischen Anpassung der Zusammensetzung der Kathodenkatalysatorschicht (Ionomer-Kohlenstoff-Verhältnis, -Verteilung). Die unterschiedlichen MEA-Fertigungsmethoden – die indirekte Schichtapplikation auf die Membran (iCCM), die Direktbeschichtung der Membran (dCCM) und der GDL (GDE), mit oder ohne Heißlaminieren – zeigten vergleichbare Performance. Die laminierte GDE zeigte die besten Kennwerte der ultraschallgesprühten Proben, gefolgt vom Direkt-CCM-Ansatz. Die Temperaturen auf der Katalysatorschicht waren ebenfalls bei allen getesteten Fertigungsansätzen im selben Bereich und ohne weiterführende Erkenntnisse. Die für die Schwankung in der Performance verantwortlichen Faktoren waren klassische elektrochemische Verluste wie in erster Linie die Kathoden-Aktivierungs-Überspannung und die Diffusionsüberspannung.

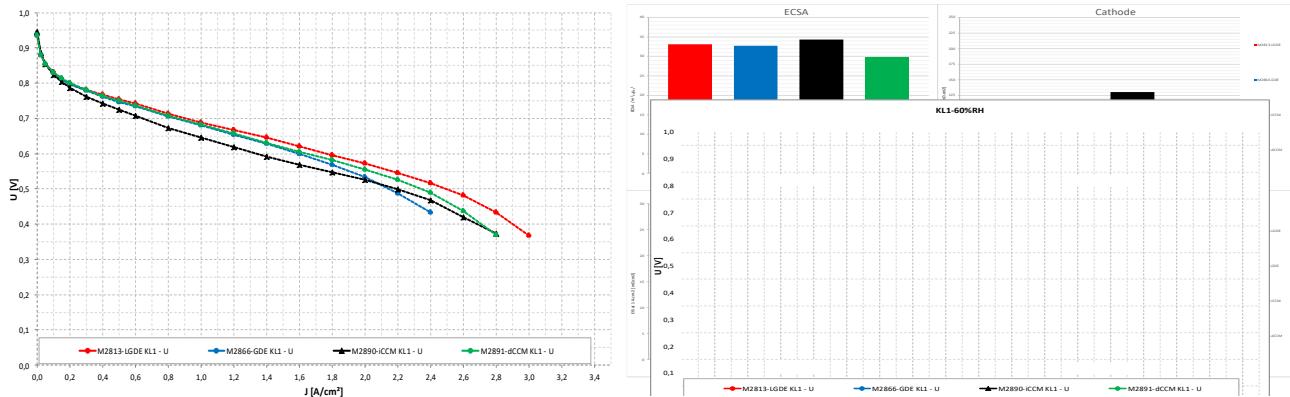


Abbildung 12: Performance und EIS-Daten unterschiedlicher MEA-Fertigungskonzepte hergestellt mittels Ultraschallsprühen (LGDE: GDE laminiert, GDE: GDE aufgelegt, iCCM: indirekt-CCM, dCCM: direct-CCM)

Des Weiteren wurde der Ansatz der nasschemischen Integration von chemisch stabilen, hochleitfähigen sowohl ein- als auch mehrdimensionalen Materialien ausgewählter Graphit, Platinpulver, CNF und Graphen-Materialien in die Katalysatorschicht erfolgreich umgesetzt. Die Dispersionsrezeptur für das Ultraschallsprühverfahren konnte so angepasst werden, dass allerdings nur sphärische Additive bzw. Materialien mit geringem Aspektverhältnis stabile, vor allem aber sprühfähige Dispersionen ergaben. Verarbeitbar waren Feststoffgehalte zwischen etwa 0,5 und maximal 2 %. Aufgrund dieser Limitierung wurde der Auftrag im weiteren Projektverlauf auf Handrakeln umgestellt und für die Schichtapplikation erfolgreich validiert. Dieses Verfahren erlaubt deutlich höhere Feststoffanteile (bis ~10 %) und toleriert größere Partikeldimensionen funktioneller Additive wesentlich besser als das Ultraschallsprühen.

Die Ergebnisse der weiteführenden Untersuchungen lieferten zusätzliche Erkenntnisse darüber, dass eine stark ausgeprägte, nicht linear stark stagnierende Performance der Katschicht bei Pt-Belegungen unter 0,2 mg.cm⁻² vorliegt. Um den Einfluss auf die Performance der reduzierten Pt-Belegung durch Additivieren zu minimieren, wurden die gerakelten Katschichten mit einer höheren Ziel-Belegung von 0,3mgPt.cm⁻² (ohne Zusätze) präferiert.

Der Einfluss der Additive schwerpunktmäßig auf Kohlenstoffbasis unterschiedlicher Dimensionalität in Kathoden wurde systematisch analysiert. Zur Klärung der Struktur-Aktivitäts-Beziehungen wurden daher alle Additivtypen nach identischem Vorgehen in Kathoden-Schichten mit konstanter Initial-Pt-Beladung von 0,3mgPt.cm⁻² (ohne Additive) eingesetzt, und zwar null-dimensionale Graphit (Vulcan XC72R) und nicht geträgerte Platinpartikel, ein-dimensionale Kohlenstoffnanofaser (CNF) und zwei-dimensionale Graphen-Nanosheets (GN). Im Rahmen der Applikationsoptimierung wurden Katalysatorstreifen (Breite 10,5 cm) per Handrakel hergestellt. Katalysatorschichten mit und ohne Additiv wurden zunächst mit 100 µm Rakelspannhöhe hergestellt; dies erwies sich als zu dünn, da die resultierende Pt-Beladung nicht ausreichend war. Das

beste Ergebnis wurde mit einem 150 µm Rakelspalt erzielt, was einer Nassschichtdicke von ca. 75–80 µm entspricht. Die Mikrostruktur und die elektrochemische Performance wurden in Arbeitstakten 11 und 12 umfassend in-situ charakterisiert.

## 1.9 Arbeitspaket 9: Qualifikation (ex-situ) der neuen Strukturen aus AP8 hinsichtlich WLF und TWK (ZFW)

### Durchgeführte Arbeiten

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurden Wärmeleitfähigkeitsmessungen an Katalysatorschichten (KKS) auf Polymer-Trägerfolien durchgeführt. Die Proben wurden vom ZBT aufbereitet und bereitgestellt. Da die zu erwartenden Wärmeleitfähigkeiten sehr gering waren, wurde anstelle einer Einzelprobe jeweils eine dreifache Schichtung (drei identische Proben übereinander) verwendet, um zuverlässige Messergebnisse zu erzielen. Die Untersuchung erfolgte in IP-Richtung, mit Fokus auf potenziell anisotropes Verhalten.

### Erzielte Ergebnisse

Schon erste Messungen deuteten auf ein anisotropes Wärmeleitverhalten hin. Um diese Eigenschaft genauer zu erfassen, wurden daher ergänzende Messungen an unbeschichteten Folienproben durchgeführt, jeweils in zwei orthogonalen Richtungen (0° und 90°). Die Charakterisierung der reinen Polymer-Trägerfolie ergab ebenfalls eine ausgeprägte Anisotropie, wie in Abbildung 13 (links) dargestellt. In der 90°-Richtung wurde mit ca. 0,82 W/(m·K) eine deutlich höhere Wärmeleitfähigkeit gemessen als in der 0°-Richtung mit ca. 0,62 W/(m·K). Diese Richtungsabhängigkeit spiegelte sich auch in den Messungen der KKS-Probenstapel wider (Abbildung 13, rechts). Die beobachteten Abweichungen können entweder auf eine bisher unbekannte, prozessbedingte Anisotropie der Katalysatorschicht selbst oder auf eine komplexe Überlagerung mit der dominanten Anisotropie der Trägerfolie zurückgeführt werden.

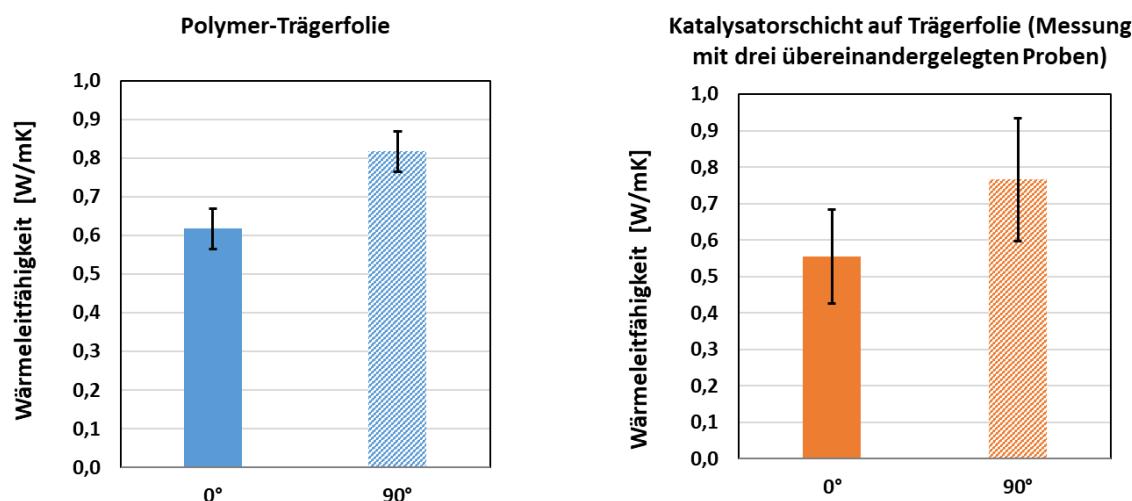


Abbildung 13: Wärmeleitfähigkeitsmessungen der Polymer-Trägerfolie (links) und der Katalysatorschichten (rechts) in 0°- und 90°-Richtung

## 1.10 Arbeitspaket 10: Zielgerichtete Optimierung und Adaptierung des vorläufigen Messgeräts aus AP5 an die Anforderungen der PEMFC-Bauteile auf Basis der bisherigen Erkenntnisse aus den AP5 bis AP9 (ZFW)

### Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wurde das vorläufige Messgerät aus AP5 an die Anforderungen der PEMFC-Bauteile angepasst. Hierzu wurde Prototyp 5 in vielen weiteren Details mit den gewonnenen Erkenntnissen aus AP6 – AP9 verbessert und weitere Funktionen hinzugefügt. Die wichtigsten waren:

- Ergänzung einer temperierten Messkammer (Reduktion von äußeren Einflüssen)
- Erweiterung der Sensorkühlung um ein Peltier-Element (Linearisierung / Verbesserung des Signals)
- Optimierung der Heizung (stabiler, temperaturbeständiger)
- Luftausströmer aus Aluminium mit größerem Querschnitt (kleinerer Druckabfall bei Befeuchtung)
- Probenbefeuhtung im Messgerät (Vereinfachung des Messablaufs)
- Wärmestrahlungsschutz für Sensor (geringer Einfluss auf Sensorsignal)

Mit diesen und weiteren Punkten wurden nochmals vier Prototypen aufgebaut, bis es zum finalen Aufbau des Prüfstandes kam. Für Messungen unter höherer Flächenpressung als 1 bar wurde ein Druckdeckel mit IR-Transparentem Glas aus Germanium konzipiert.

### Erzielte Ergebnisse

Die Heizung ist das zentrale Element des Messgerätes. Durch die geringe Dicke, hohe Wärmeleitfähigkeit der Keramik und die elektrische Leistungsfähigkeit ermöglicht sie die TP-Wärmeleitfähigkeitsmessung der dünnen und porösen PEMFC-Materialien. Die erste Version hatte noch einige Designfehler, welche zum Versagen der Heizspirale führen konnten. Ein Austausch der Heizung ist zwar möglich, aber sehr aufwendig. Die Optimierung der Leiterbahnen und eine thermisch stabilere Kontaktierung der Anschlusskabel an die Heizung verbesserten die Haltbarkeit der Heizung, ermöglichen aber auch eine höhere Heizleistung und Temperaturbeständigkeit. Temperaturen von über 85°C wurden mit der Heizung erreicht und sind über längere Zeit möglich. Das Messgerät sollte die Probe nicht nur im trockenen Zustand, sondern auch im feuchten Zustand vermessen können, da dies einen regulären Zustand innerhalb der Brennstoffzelle darstellt. Die Probenbefeuhtung wurde anfangs extern in einem Klimaschrank durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass bei den untersuchten kommerziellen GDLs keine signifikanten bzw. keine messtechnisch auflösbarer Einflüsse der Feuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit gegeben sind. Für spezielle Materialien ist dies aber anders. Nach der Befeuchtung einer Probe aus Grafitpapier im Messaufbau zeigte sie eine Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von 144 %. Eine Messung mit extern übersättigter Probe ergab eine Steigerung von 186 %. Die Abweichung ist unter anderem durch die leicht inhomogene Befeuchtung zu erklären und konnte im weiteren Verlauf durch Implementierung weiterer Ausströmer im Probenteller reduziert werden.

Abbildung 14 zeigt die Probenbefeuhtung durch gesättigte Luft im Prüfstand. Erste Versuche, den Messraum unterhalb der Druckmembran mit gesättigter Luft zu durchströmen, um die Probe wie in einer Brennstoffzelle zu befeuchten wurden bereits in AP5 durchgeführt. Das linke Bild zeigt eine CAD-Konstruktion eines frühen Prototyps mit aufgeblasener Druckmembran. Das gleichzeigte Befeuchten und Temperieren gelang erst im Prototyp 8 (rechts).

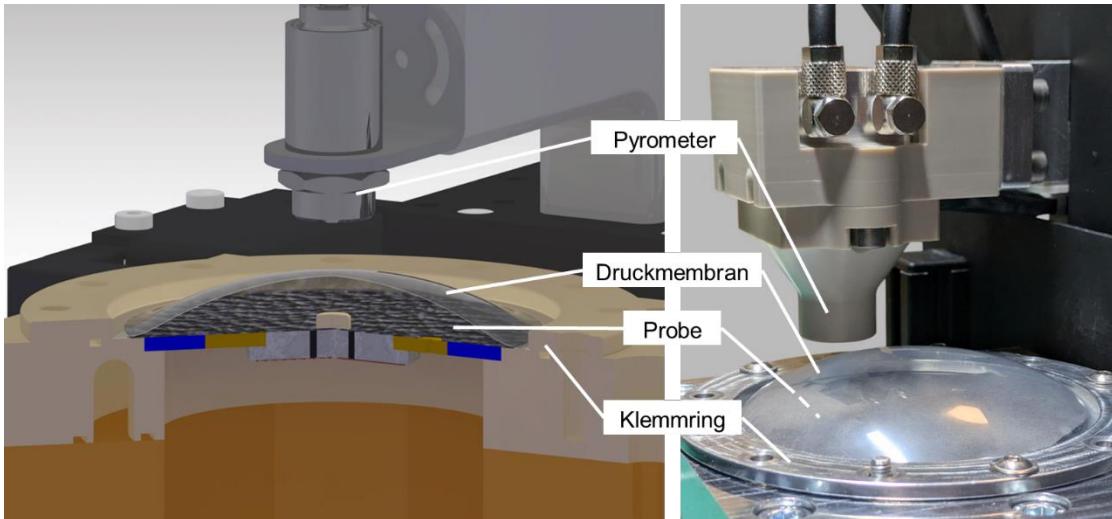


Abbildung 14: Modell eines frühen Prototyps und umgesetzte Luftbefeuchtung im Messaufbau

### 1.11 Arbeitspaket 11: Charakterisierung der vorläufig optimierten und ex-situ-qualifizierten PEMFC Baugruppen im Brennstoffzellenbetrieb (in-situ), Bestimmung der inneren Temperaturfelder u. des Leistungsverhaltens in Abh. der Betriebsbedingungen (ZBT)

#### Durchgeführte Arbeiten:

In diesem Arbeitspaket wurden die Maßnahmen zur Verbesserung der Wärmeabtransport-Vorgänge von der Katalysatorschicht bis zu Bipolarplatte ausgearbeitet, getestet und ihre Wirksamkeit anhand der Temperatur, der Temperaturverteilung und schließlich der Performancedaten verifiziert. Die robuste Validierung der durchgeföhrten Maßnahmen zur Optimierung der thermischen Eigenschaften der MEA einer PEMFC unter anderem mittels zielorientierter werkstoff- und verfahrenstechnischer Konzepte zur Verbesserung sowohl der thermophysikalischen Eigenschaften der MEA als auch der Wärmeabtransport-Vorgänge setzt ein geeignetes Messverfahren und auch spezielle Messzelle voraus. Die Standard-Baltic-Zelle (qCf 25) konnte dies aufgrund der signifikanten Temperaturgradienten innerhalb der Zellkomponenten nicht immer leisten. Nach dem Vorschlag aus dem PA-Konsortium zusätzlich eine spezielle Zelle, und zwar qCf 12 High Amp mit technischen „Verbesserungen in Bereichen höherer Stromdichten und im Temperaturmanagement“ (Quelle: baltic GmbH) ersetzt. Unter Einsatz dieser Hochleistungszelle mit optimierten Wärmemanagement wurden MEAs bzw. CCMs mit thermisch optimierten Komponenten hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und der Temperaturverteilung umfassend charakterisiert.

#### Erzielte Ergebnisse:

Eine der Erkenntnis der zahlreichen Messreihen (ex situ und in situ) war, dass die Wärmeleitung einer GDL (through plane) je nach Zustand einen signifikanten Temperaturgradienten verursachen kann. Bei der systematischen Variation der Feuchte (Abbildung 15) wurde festgestellt, dass die Temperatur der Katschicht, also der GDL-Oberseite (rote Kurve) und der Flowfield-Oberfläche (GDL-Unterseite, feingestrichelte Kurve) bei 100% Eingangsfeuchte im gesamten Stromdichteberich weitestgehend gleich ist, was eine sehr gute thermische Leitfähigkeit der nassen GDL bedeutet. Bei 70% bildete sich dagegen ein starker Gradient über die ca. 200µm-dicke GDL von fast 5 Grad bei beiden Kennlinien im Hochstromdichteberich. Somit stellt die GDL in einem nicht nassen Zustand doch erheblichen Engpass bei der Wärmeabfuhr, verschlechtert die Performance und auf lange Sicht auch die Dauerstabilität der Zelle.

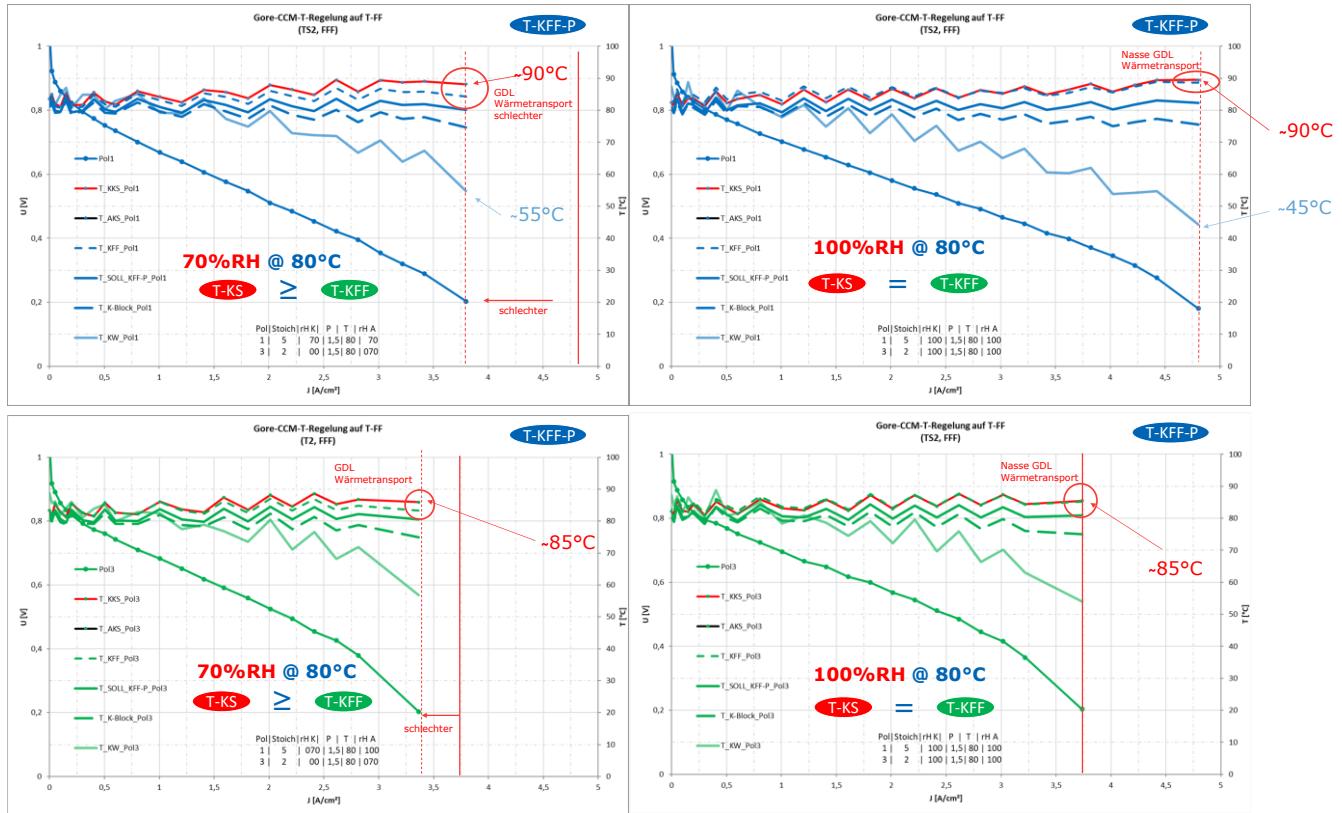


Abbildung 15: Einfluss der Wärmetransporte und der Feuchte auf die Temperaturverteilung innerhalb der MEA  $Po1$ . vs.  $Po3$  ( $80^\circ\text{C}$ ,  $100\%$  rF.I.,  $70\%$  rH. rechts)

Auch innerhalb der Zellkomponenten, also außerhalb der MEA sind einige Engpässe beim Wärmeabtransport eindeutig erkennen. Über die Flowfield-Platte sind fast 5 Grad bzw. zwischen der Flowfieldplatte und der Kühlplatte gute 10 Grad Gradient vorhanden. In der Summe sind es je nach Betriebspunkt und Betriebsparameter fast 50°C zwischen der Wärmequelle (Katschicht) und Wärmesenke (Kühlwasser) in der Standardtestzelle. Als eine wirksame Strategie, die Katschicht abzukühlen, wurde die Absenkung der Zelltemperatur unter  $80^\circ\text{C}$  (Abbildung 16), also Betrieb mit übersättigten Gasen ( $100\%$  rF@ $80^\circ\text{C}$ ).

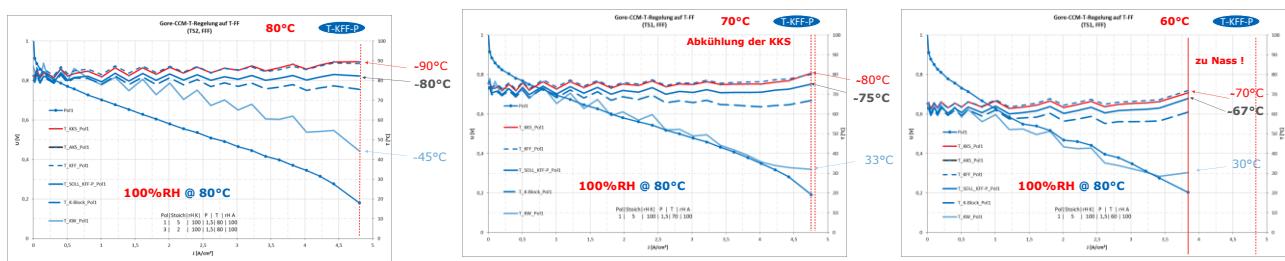


Abbildung 16: Übersättigter Betrieb der Zelle

Bei der Sollzelltemperatur von  $70^\circ\text{C}$  lag die Katschicht bei dem Zielwert von  $80^\circ\text{C}$  bei  $0,2\text{V}$ . Nachdem Vorschlag des PA-Konsortiums wurde eine besondere, wärmeoptimierte Zelle im Projekt eingesetzt. In Abbildung 17 sind zwei repräsentative Kennlinien (Po. 1) beider Zellen gegenübergestellt. Die qCf 12 High Amp zeigte in der Praxis im Vergleich zu der Standartzelle eine deutlich bessere Performance.

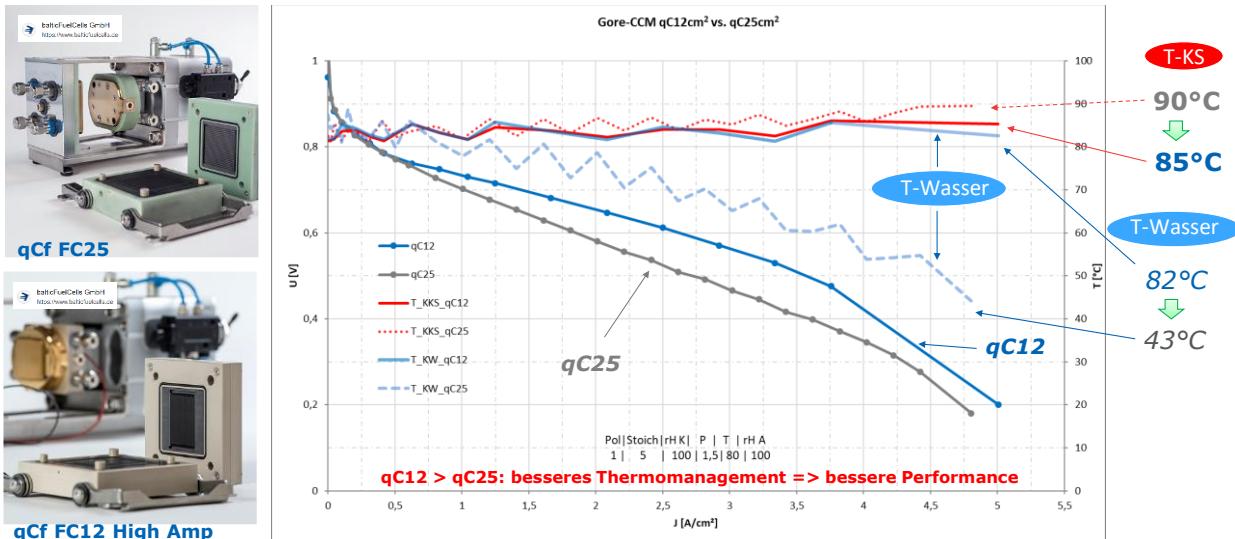


Abbildung 17: qCf FC12 High Amp vs. qCf FC25 (baltic GmbH)

Bei 0,2 V lag die Katschichttemperatur 5K (85°C) der High Amp-Zelle untern dem Referenzwert der 25cm<sup>2</sup> baltic (90°C). Außerdem war der Temperaturgradient im Hochstromdichtebereich zwischen der Katschicht und dem Kühlwasser unter sehr feuchten Betriebsbedingungen bei nur 3K statt ca. 40K in der Standardzelle. Diese spricht eindeutig für einen sehr guten Wärmeabtransport aus der MEA, sodass die Wärmeengpässe der Zell mit dem Schwerpunkt GDLs als MEA-Komponenten besser identifiziert und charakterisiert werden können.

Desweitern wurde die These des Zusammenhangs der elektrischen und der thermischen Leitfähigkeit experimentell verifiziert, in dem die Kennwerte Performance und die Katschichttemperatur-Kennfelder für unterschiedlich elektrisch Leitfähige GDL aufgenommen wurden. Exemplarisch sind die Kennlinien in Abbildung 19 und zwar für zwei elektrisch sehr gut leitende GDLs (GDL 4 und GDL5) für zwei elektrisch etwas 40% schlechter leitende GDLs (siehe Abbildung 18) dargestellt.

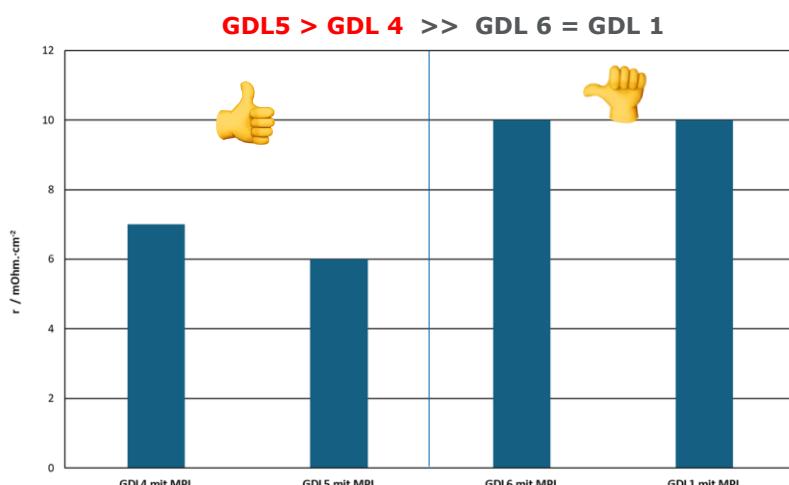


Abbildung 18: Elektrischer TP-Widerstand der GDLS

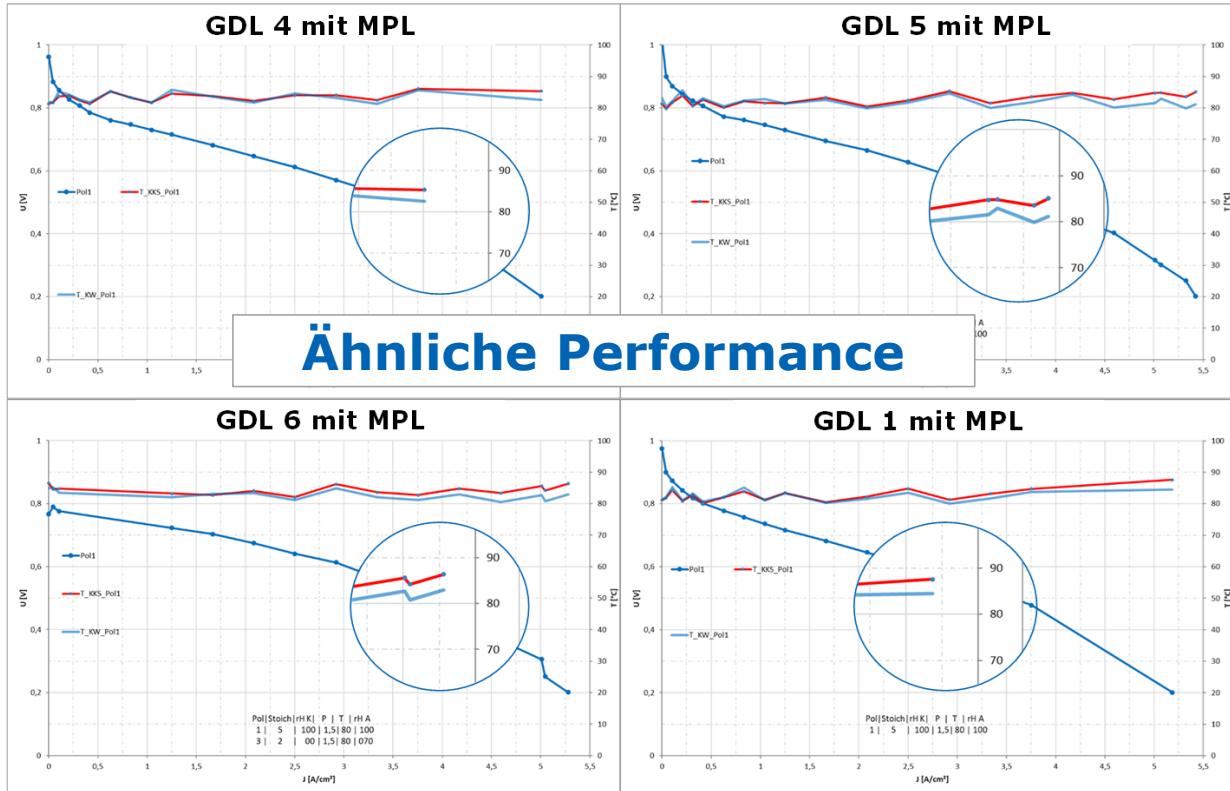


Abbildung 19: Einfluss der Wärmetransporte innerhalb GDL-LF (baltic qCf 25)

Überraschenderweise lieferten alle getesteten GDLs unter den Bedingungen der Pol. 1 ähnliche Performance, zusätzlich gab es keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der elektrischen TP-Leitfähigkeit und den Wärmetransportphänomenen in der MEA.

Als Grenzwertbetrachtung wurde auch ein „Kurzschlussmodus“ bei Zellbetrieb ausprobiert. In diesem 0V-Betrieb liegt sowohl der Wirkungsgrad als auch die elektrische Leitungsdichte bei 0. Die Zelle wird also als eine Art „elektrochemische Heizung“ betrieben. Zusätzlich wurde der Ansatz der Absenkung der Zelltemperatur getestet, um die Katschicht zusätzlich zu kühlen. Die GDL 2 hat zwar Faktor 5 bessere elektrische Leitfähigkeit durch die Ebene als GDL1, lieferte trotzdem schlechtere Stromdichten als die GDL1 bei Kurzschlussmodus.

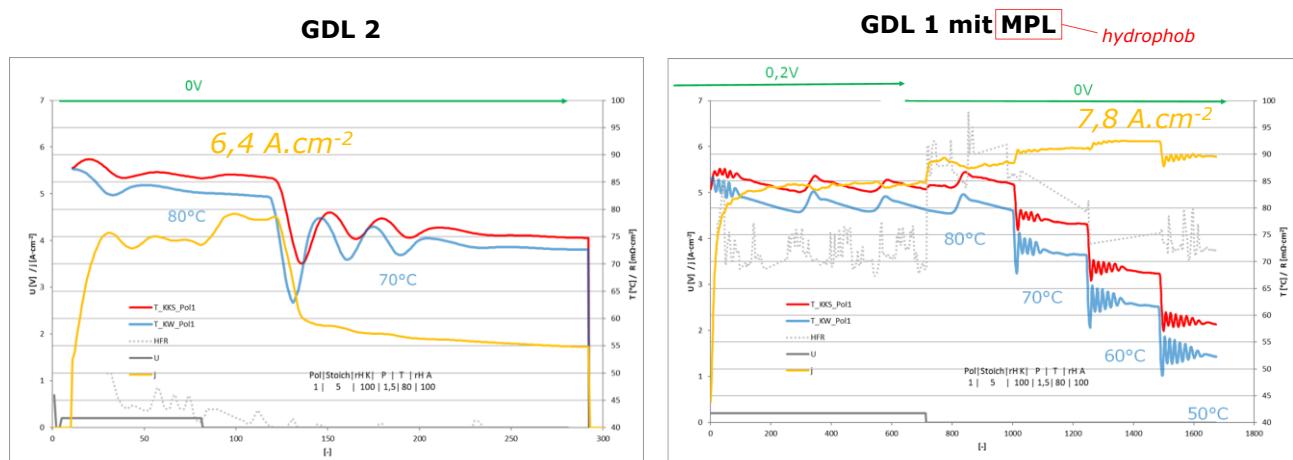


Abbildung 20: Kurzschlussbetrieb der Zelle unter zusätzlicher Abkühlung

Der Grund dafür ist eindeutig: GDL 1 verfügt im Gegensatz zu GDL 2 über eine sogenannte MPL, also hydrophobe mikroporöse Schicht, die für einen besseren Abtransport der Produktwasser sorgt. GDL 2 verfügt dagegen über keine MPL, sodass das Wasser den Zugang für den Sauerstoff blockiert.

Die thermische Leitfähigkeit scheint deutlich komplexere Zusammenhänge darzustellen. Diese Erkenntnis untermauert die Projektinhalte und die Notwendigkeit einer robusten Methode zu Bestimmung dieser thermischen Eigenschaften. Diese wurde vom ZWF entwickelt und weitestgehend optimiert.

Zusätzlich zu den Betriebs-Komponenten-Betrachtung wurde der Einfluss der Schichtapplikation und vor allem der Additive – schwerpunktmäßig auf Kohlenstoffbasis – unterschiedlicher Dimensionalität in Kathoden systematisch analysiert. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen in Situ-Ergebnisse der in Arbeitspaket 8 beschrieben Ansätze zur Additivierung getestet. Wie bereits erwähnt, konnten die additivierten Proben nur mittels Rakeln (statt Sprühen) hergestellt werden. Die nicht additivierten gerakelten Proben zeigten konsequent deutlich bessere Performance als die gesprühten MEAS, und zwar aufgrund der Applikationsmethode und höherer Pt-Belegung. Die Stromdichten lagen zwischen 2A.cm-2@0,6V bei gerakelten und 2,8A.cm-2@0,6V bzw. zwischen 1,5A.cm-2@0,6V und 1,8A.cm-2@0,6V ultraschallgesprühten Kat-Schichten.

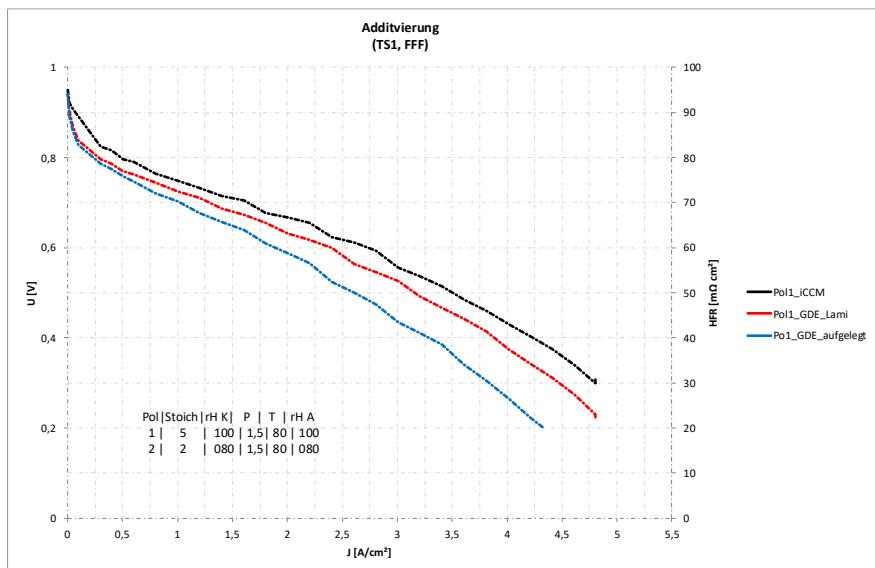


Abbildung 21: Performance-Daten unterschiedlicher MEA-Fertigungskonzepte hergestellt mittels Handrakel (LGDE: GDE laminiert, GDE: GDE aufgelegt, iCCM: indirekt-CCM)

Bei den Peak-Bedingungen (Stöchiometrie 5, 100%rH) zeigte bei der Rakelapplikation die iCCM die beste Performance mit 2,8 A.cm2@0,6V der getesteten Schichtauftragsmethoden (iCCM, GDE laminier und aufgelegt). Bei niedrigeren Stöchiometrien 2 und Feuchte 80% waren die Leistungsdaten bei allen Rakel-Ansätzen tendenziell sehr ähnlich.

An dieser Stelle soll betont werden, dass die Forschungsarbeiten und die deutlichen Fortschritte der Abteilung „Elektrochemische Komponenten“ in der Entwicklung von Kathodenkatalysatorschichten, CCMs und MEAs im Rahmen mehrerer Förderprojekte mündeten in belastbaren Erkenntnissen, ausgereiften Rezepturen und robusten Fertigungs routinen für optimierte Hochleistungs-MEAs des ZBT. Von der zielgerichteten Auswahl geeigneter Katalysatoren und Ionomere über das optimale Ionomer-/Katalysator-Verhältnis, die Dispersions- und Beschichtungsprozesse sowie das Laminieren bis hin zu Einfahrstrategien wurden in den vergangenen Jahren alle wesentlichen Schritte systematisch untersucht und weitgehend optimiert. Dieses Know-how bildete die Basis bzw. MEA-Startkonfiguration für die Additivierungsansätze. Die im Rahmen des

Projektes durchgeführte Parameterstudie zeigte, dass der Additivierungsansatz durchaus in der Lage ist, die Performance der MEA leicht zu verbessern. Die additivbasierte Modifikation der Kathoden-Katalysator-schicht wurde durch Mischen von zu dem Zeitpunkt optimierter Pt/C-Katalysator-Tinte und zusätzlichen Additiven (Graphit, CNF, Graphen und Pt black) in Pulverform erhalten. In Abbildung 22 sind beispielhaft die Kennlinien mit 50 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  Additiv, also Zusätzlich zu der Katschichtdispersion abgebildet. Bei weniger Additiv war kein Unterschied feststellbar. Bei höherer Additivierung liefern die MEAs tendenziell schlechter als die Referenz, weil die Pt-Belegung durch die Additivierung deutlich reduziert wurde. Zusätzlich wurden auch in plane-Widerstände die Katschichten mit und ohne Additivierung ermittelt. Bis auf die CNF-Additivierung bewirkte die Zugabe eine leichte Verbesserung des Widerstandes.

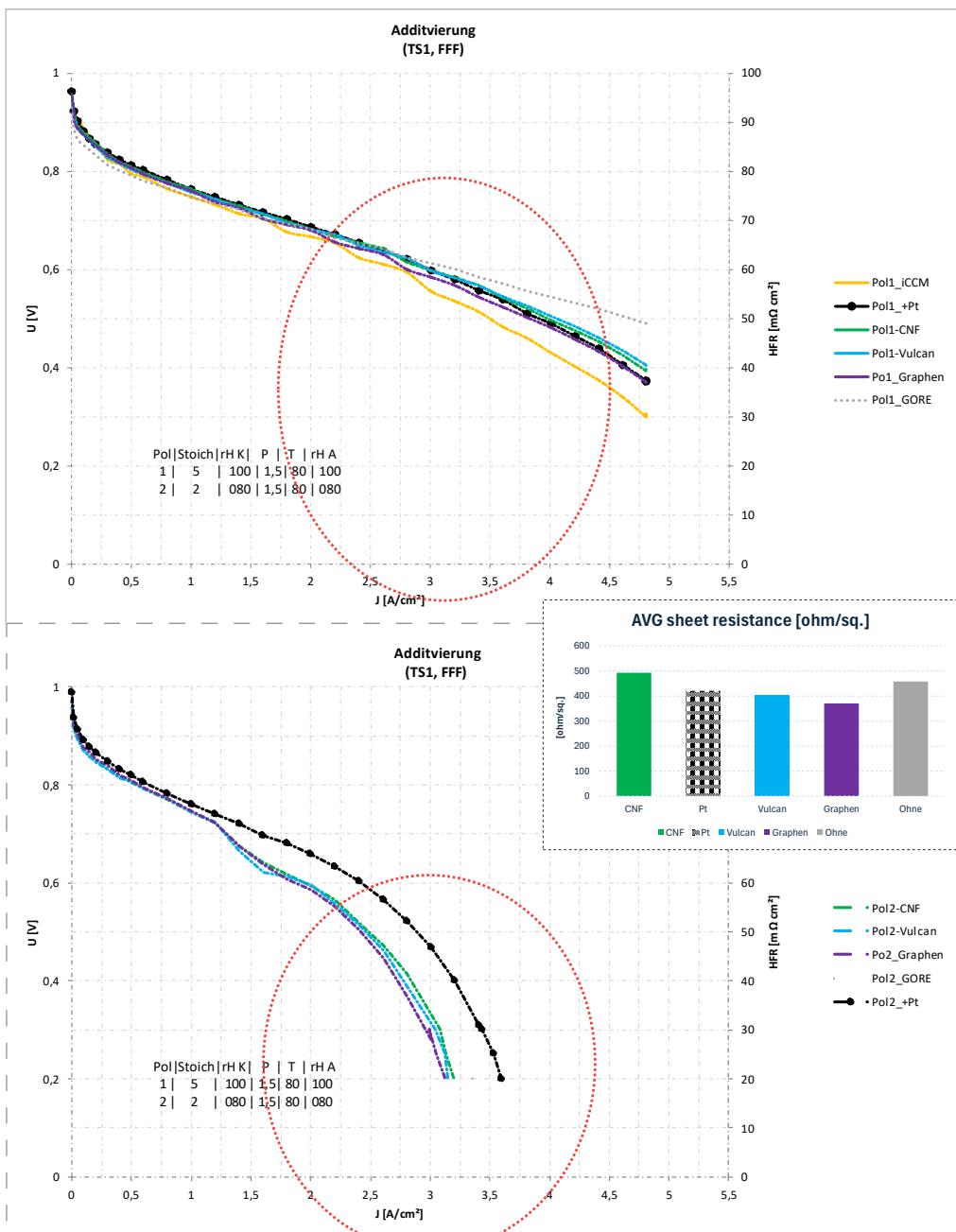


Abbildung 22: Performance-Daten additivierter MEAs unter PEAK-Bedingungen (Pol.1 oben, Pol. 2 unten)

Die Untersuchungen zeigen, dass bereits geringe Mengen elektrisch und thermisch leitfähiger Additive vor allem die elektrische Kopplung der Aktivzentren erhöhen. Dadurch vergrößert sich die effektive Dreiphasengrenze, was die Katalysatornutzung verbessert und sich in höheren Zellspannungen insbesondere im Niedersstromdichtebereich äußert. Zudem ist eine Reduktion des Kontaktwiderstands an der Grenzfläche zwischen GDL und Katalysatorschicht wahrscheinlich. Durch die additivinduzierte Veränderung der Katalysatorschicht-Mikrostruktur verbessern sich darüber hinaus Gastransport und Wasserabfuhr. Bei hohen Stromdichten ab ca.  $2 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  verschiebt sich die Polarisationskurve nach oben und die Steigung im Hochstromdichtebereich nimmt deutlich ab. Die besten additivierten Kurven liegen bei ca.  $3 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$  @ 0,6 V, und zwar gleich mit der kommerziellen CCM mit mehr als 40% höherer Gesamtbelegung der CCM (Anode und Kathode zusammen).

## **1.12 Arbeitspaket 12: Iterative, parallelisierte Optimierung des Messverfahrens und der PEMFC-Baugruppen zur Er-höhung von WLF, TKW (ex-situ) und Leistung (in-situ) (ZFW, ZBT)**

### **Durchgeführte Arbeiten**

Parallel zur Anpassung des Messgeräts an die Anforderungen der PEMFC-Bauteile wurde in AP10 auch das Messverfahren im Allgemeinen optimiert. Die durchgeführten Optimierungen der Hardware hängen direkt mit den Optimierungen des Messverfahrens in AP12 zusammen und liefern dementsprechend parallel ab. Im Rahmen von AP12 wurden zahlreiche systematische Studien durchgeführt, um Messparameter und -abläufe zu optimieren. Dazu zählten unter anderem:

- Anzahl der Mehrfachmessung einer Probe: Zur Reduktion des Rauschens bei inhomogenem Material
- Verfahrgeschwindigkeit des Pyrometers über die Probe: Ermittlung der maximalen Geschwindigkeit für eine präzise und gleichzeitig schnelle Messungen
- Bestimmung des Temperaturunterschieds von Heizung zur Kühlung: Vermeidung von übermäßigen thermischen Verlusten bei gleichzeitig stabilem Signal
- Festlegung der Auswertebereiche der beiden Probenteller, unabhängig von der Probendicke, Wärmeleitfähigkeit und Messtemperatur
- Entwicklung des Kalibierverfahrens mittels „Leermessung“ ohne Probe, vor der eigentlichen Messung

### **Erzielte Ergebnisse**

Ein Beispielhaftes Ergebnis für eine Optimierungsstudie wird in Abbildung 23 gezeigt. Untersucht wurde der Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit des Pyrometers während der Messung auf die gemessenen Temperaturgradienten oberhalb des inneren (PT1) und äußeren Probentellers (PT2). Während eine langsame Geschwindigkeit Vorteile bei der Glättung von Sensorrauschen bieten kann, führt sie nicht zwangsläufig auch zu einem besseren Signal. Die Strahlungswärme der Heizung erwärmt auch den Pyrometersensor, welcher trotz interner Kompensation sehr empfindlich auf schwankende Umgebungstemperaturen reagiert. Bei einer höheren Geschwindigkeit ist diese Beeinflussung geringer. Ein weiterer, naheliegender Vorteil einer höheren Geschwindigkeit ist eine kürzere Messzeit, die insbesondere bei späteren kommerziellen Umsetzungen von Bedeutung sein kann. Bis zu einer Verfahrgeschwindigkeit von etwa 1,1 mm/s konnte kein systematischer Einfluss auf die ermittelten Temperaturgradienten und damit auf das Messergebnis festgestellt werden. Ab 1,1 mm/s zeigte sich jedoch in beiden Probentellern eine stetige Veränderung der Ergebnisse. Damit war die durch die Zeitkonstante des Sensors gegebene Grenze erreicht und mit ca. 1,0 mm/s ein Optimum für die Verfahrgeschwindigkeit gefunden.

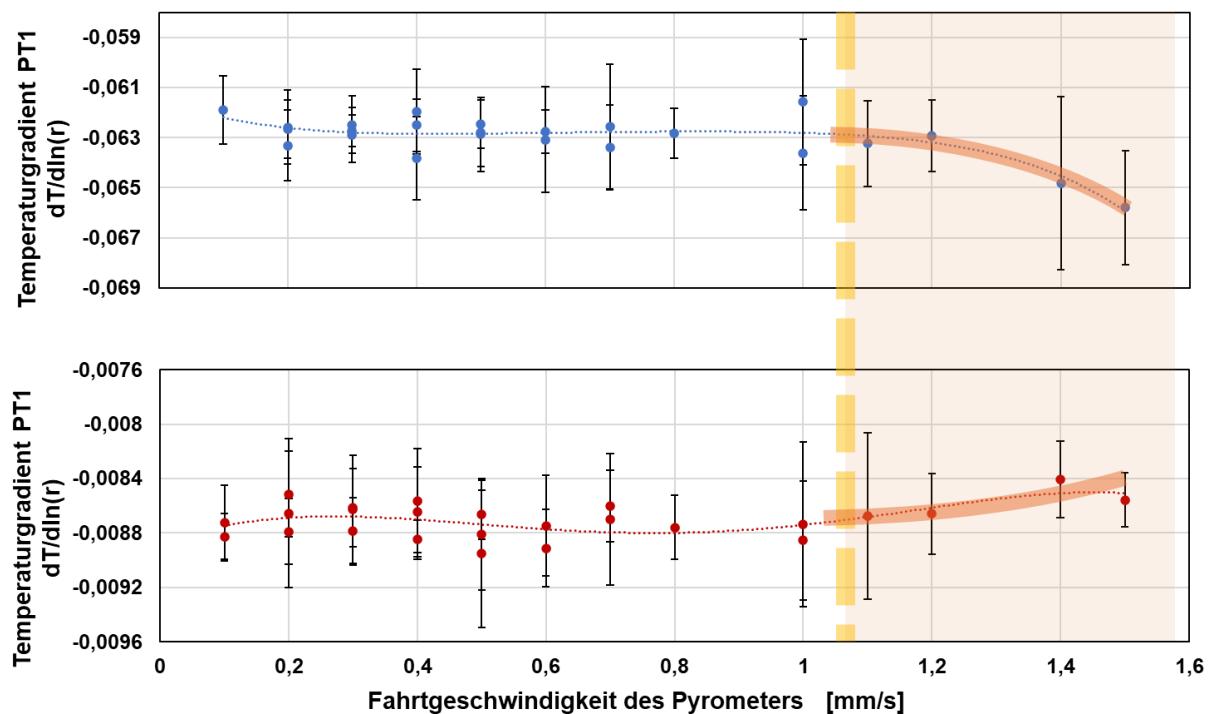


Abbildung 23: Steigung des Temperatursignals bei verschiedenen Geschwindigkeiten des Sensors

Mittels dieser und weiterer Optimierungen, in Verbindung mit den Hardwareänderungen aus AP10, konnte das Messverfahren stetig verbessert werden. Die gemessene Wärmeleitfähigkeit von Referenzproben aus Edelstahl zeigen eine durchschnittliche Abweichung von 3% zu den Messwerten aus einer Laser-Flash-Analyse. Die maximale Abweichung liegt bei etwa 7%.

## 2 Verwendung der Zuwendung

### Forschungseinrichtung 1 (ZFW)

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
  - 24,9 HPA A
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): keine

### Forschungseinrichtung 2 (ZBT)

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
  - 18,526 HPA A
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans): keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans): keine

## 3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Ziel des Projekts war die notwendige Entwicklung einer neuen Messmethode zur Bestimmung wichtiger Materialparameter von Komponenten einer PEM-Brennstoffzelle. Die zielgerichtete Optimierung der Komponenten zur Leistungssteigerung der Brennstoffzelle oder zur Verbesserung deren Lebensdauer ist nur möglich, wenn diese Materialparameter unter den einbaurelevanten Randbedingungen bestimmt werden können. Hierfür stand zu Beginn des Projekts keine geeignete Methode zur Verfügung. Die geleisteten Arbeiten haben mit wenigen Ausnahmen auf direkten Weg zum Projektergebnis geführt und waren angemessen.

In AP1 wurden die notwendigen Konzeptentwicklungsschritte durchgeführt. Es wurde eine angemessene Anzahl möglicher Alternativen erarbeitet, mittels numerischer Simulation untersucht, diskutiert und bewertet. Diese umfassende Bewertung war erforderlich, um fundierte Entscheidungen für die weitere Entwicklung zu treffen. Das Arbeitspaket bildete damit das tragfähige Fundament für alle nachfolgenden Schritte. Art und Umfang der durchgeführten Arbeiten waren sowohl zwingend erforderlich als auch methodisch angemessen.

Die in AP2 geplanten Arbeiten wurden zeitgemäß abgeschlossen. Insbesondere die hierfür geleisteten Arbeiten, im Einzelnen die Ausarbeitung und Festlegung der hinsichtlich thermischer Effekte relevanten MEA-Komponenten, Messgrößen und Zielwerte für WLF und TKW dieser Komponenten waren notwendig und angemessen. Die Daten dienen als Grundlage für die Bearbeitung nachfolgenden APs.

Zur Ermittlung der betriebspunkt- und tiefenabhängigen Temperaturverteilungen innerhalb der MEA bzw. Einzelzelle wurden im AP3 subminiaturisierte Thermoelemente zwischen PEM und Katalysatorschicht, zwischen KKS und Gasdiffusionsschicht sowie zwischen GDL und Flowfield implementiert, in den Messaufbau integriert, ihre Funktionalität validiert und ihr Einfluss auf die Zellperformance untersucht. Nach erfolgreicher Zelladaptierung wurden kombinierte Messreihen mit kommerziellen CCMs, GDLs und MEAs durchgeführt. Dabei wurden komplementäre Temperaturprofile als Funktion der Zell-Tiefe unter Variation der Betriebsbedingungen (Stromdichte, Stöchiometrien, Eingangsfeuchten) aufgenommen. Die Arbeiten waren deutlich aufwendiger und umfangreicher als ursprünglich geplant. Die Arbeiten waren essentiell, um die maßgeblichen Wärmepfade und Wärmetransport-Engpässe aufzudecken und die Zusammenhänge zu verstehen.

AP4 fokussierte die Ausarbeitung von Konzepten zur Verbesserung der Bulkeigenschaften der Katalysatorschicht (Rezepturanpassung, fertigungstechnische Modifikation, gezielte Additivierung) sowie ihrer

thermischen Anbindung an die GDL. Die Arbeiten waren notwendig und angemessen, um diese Konzepte in nachgelagerten Paketen umzusetzen und zu validieren.

In AP5 erfolgten der Aufbau des Messgeräts und die technisch notwendige Funktionsvalidierung. Die anschließenden Testmessungen mit isotropen, nicht für PEMFC typischen Materialien dienten dem Abgleich mit etablierten Verfahren (z. B. stationäre Zylindermethode) und ermöglichen eine erste Bewertung der Messgenauigkeit. Diese Tests waren angemessen und methodisch sinnvoll, da sie bereits in einer frühen Phase wichtige Schwachstellen aufzeigten und so gezielte Optimierungsschritte eingeleitet werden konnten. Eine direkte Validierung mit PEMFC-Materialien war nicht möglich, da hierfür keine etablierten Referenzverfahren existierten; was nochmals die technologische Relevanz und die Unverzichtbarkeit der entwickelten Methode verdeutlicht.

Weitere wichtige und für die weitere Entwicklung notwendige Erkenntnisse konnten dann in AP6 und AP7 bei der Charakterisierung kommerzieller PEMFC Materialien gewonnen werden. In AP6 konnte aufgezeigt werden, wo die Grenzen bestehender Messverfahren liegen, woraus sich die notwendige Abgrenzung und Positionierung des neuen Verfahrens ableiten ließ. In AP7 konnten mit dem neuen Verfahren erstmals verlässliche Werte zum Wärmeleitfähigkeitsverhältnis „In-Plane“ zu „Through-Plane“ relevanter PEMFC Materialien ermittelt werden. Die unternommenen Anstrengungen waren angemessen, da sie zur Präzisierung der Einsatzmöglichkeiten und zur weiteren Optimierung des Verfahrens beitrugen.

Ausgewählte Konzepte im AP3 erarbeitete sowohl werkstoff- als auch fertigungstechnische Konzepte wurden im AP8 erfolgreich umgesetzt. Die vielversprechenden Additive wurden zusammen mit den funktional notwendigen, konventionellen KS-Materialien zu stabilen Dispersionen und anschließend stufenweise zu Katalysatorschichten, CCM und/oder MEA verarbeitet. Die modifizierten Prüflinge wurden in den weiteren Arbeitspakten systematisch charakterisiert sowie iterativ optimiert. Die Arbeiten waren angemessen und notwendig, um die Konzepte zur Verbesserung Katschichteigenschaften und der Zellperformance im AP 11 experimentell testen bzw. validieren zu können.

Mit den in AP9 durchgeföhrten Messungen konnten wichtige Daten für die Entwicklungen am ZBT ermittelt und der Projektfortschritt in angemessener Art und Weise unterstützt werden.

In AP10 wurden die notwendigen Optimierungen am Messverfahren und -gerät durchgeführt, die sich aus den Ergebnissen der APs 5-7 ergeben haben. Ebenfalls in angemessener Form eingeflossen sind die Fortschritte bei der Materialentwicklung (APs 8-9). Notwendige Validierungen sowie Analysen zur Messfähigkeit wurden erfolgreich durchgeführt, ebenso wie Verbesserungen in der Bedienerfreundlichkeit, was die praktische Einsatzfähigkeit des Systems deutlich erhöhte.

AP11 wurden die Maßnahmen (aus AP2, AP3 AP4 und AP8) zur Verbesserung der Wärmeabtransport-Vorgänge von der Katalysatorschicht bis zu Bipolarplatte experimentell getestet und ihre Wirksamkeit anhand der Temperatur, der Temperaturverteilung und schließlich der Performance daten verifiziert. Die Arbeiten waren notwendig und angemessen, um in erster Linie die Performance der Zelle in Abhängigkeit von den Fertigungs-, Werkstoff-, Additiv- und Betriebs-Parameter im Realbetrieb bewerten zu können.

Im abschließenden AP12 wurden die notwendigen Ergänzungen am Messgerät vorgenommen, um auch bei unter anwendungsrelevanten Randbedingungen (Flächenpressung, Temperatur, Feuchtigkeit) messen zu können. Dabei wurden angemessene Grenzen definiert, die sich am typischen Anwendungsbereich der PEMFC orientieren. Die Arbeiten in diesem abschließenden Paket waren sowohl technisch geboten als auch anwendungsnahe ausgerichtet.

## 4 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Das Thermopem-Projekt konnte eine fundierte Wissensbasis über die anisotropen thermophysikalischen Stoffwerte von PEMFC Komponenten unter anwendungsnahen Randbedingungen schaffen und gleichzeitig eine neue Messtechnologie hervorbringen, mit der zukünftig Entwicklungszeiten verkürzt und Trial & Error-Prozesse vermieden werden können. Schon im frühen Entwicklungsstadium ist es möglich, die relevanten thermischen Materialeigenschaften zu ermitteln, darauf basierend Simulationen durchzuführen und zielgerichtete Optimierungen einzuleiten. Der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn umfasst tiefgehende Einblicke in die Struktur-Eigenschafts-Korrelationen von Gasdiffusionsschichten und die thermischen Kontaktwiderstände zwischen den Schichten einer MEA. Der wirtschaftliche Nutzen, insbesondere für KMU, liegt in der niederschweligen Anwendungsmöglichkeit des Messverfahrens und im einfachen Praxistransfer der gewonnenen Erkenntnisse. KMUs aus den Bereichen Brennstoffzellensysteme, Zellfertigung, Messtechnik und Energietechnik profitieren konkret durch:

- ein reduziertes Entwicklungsrisiko: Das Messverfahren ermöglicht frühzeitige Messungen während der Komponentenentwicklung
- Kosteneinsparung durch gezieltere Optimierung: Die Projektergebnisse zeigen, wo die Engstelle in der Wärmeableitung und damit das größte Entwicklungspotential liegt.
- Wettbewerbsvorteile durch Qualitätsführerschaft: Hersteller, die bereits bei der Strategieplanung thermische Kenndaten berücksichtigen, können sich als technologisch führend positionieren.

Der innovative Beitrag des Projekts besteht darin, dass Ansätze aus bestehenden Verfahren und Technologien adaptiert, zielgerichtet und kombiniert und teils völlig neu gedacht wurden. So entstand ein Messverfahren, explizit ausgelegt und optimiert für einen ganz speziellen Anwendungsfall: PEMFC-Komponenten. Gleichzeitig wurde Spielraum gelassen, um das Verfahren zukünftig auch für andere Anwendungsgebiete zu adaptieren. Die technische Umsetzung der Druckbeaufschlagung der Proben ist besonders innovativ. Ein anderes Messverfahren, das derart toleranzausgleichend und probenadaptiv ist wie die umgesetzte Membranlösung existiert bislang nicht. Auch die gleichzeitige Messung von In-Plane und Through-Plane Wärmeleitfähigkeiten in nur einem Aufbau ist mit sonst keinem anderen Verfahren umsetzbar.

Die zukünftigen industriellen Anwendungsmöglichkeiten des Messverfahrens sind vielfältig:

- Implementierung in Technikumsanlagen oder Entwicklungsabteilungen
- Implementierung zur Qualitätskontrolle in der Fertigung
- Adaption für andere Materialtypen und Branchen (Polymerfolien, Interfacematerialien, Faserverbundwerkstoffe, etc...)

## 5 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Der Wissenstransfer in die Wirtschaft wurde über die gesamte Laufzeit hinweg aktiv gefördert. Bereits zu Projektbeginn wurden die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses (PBA) umfassend über Zielsetzung, Vorgehen und erwartete Ergebnisse informiert. In den jährlichen wurden der jeweilige Arbeitsfortschritt, Zwischenergebnisse und abschließende Resultate vorgestellt und intensiv diskutiert. Die beteiligten Industriepartner brachten dabei wertvolle Impulse für die praxisnahe Weiterentwicklung des Messverfahrens ein. Ein besonders wirkungsvoller Transfer ergab sich durch die enge Zusammenarbeit mit mehreren PBA-Mitgliedern, für die bereits während der Projektlaufzeit Testmessungen an industriellen MEA-Komponenten durchgeführt wurden. Diese gemeinsamen Untersuchungen ermöglichten es, das neu entwickelte Messverfahren frühzeitig unter realitätsnahen Bedingungen zu validieren und konkrete Anwendungsszenarien zu erproben. In einzelnen Fällen konnte unmittelbar nach Projektabschluss bereits die erste kommerzielle Nutzung des Verfahrens erfolgen, was den hohen Reifegrad und den direkten industriellen Nutzen der erzielten Ergebnisse unterstreicht.

Darüber hinaus erfolgte die Verbreitung der Projektergebnisse über eine Vielzahl an Kommunikationskanälen. Die Resultate wurden in Fachseminaren und Workshops vorgestellt, unter anderem im Seminar „Wärmemanagement“ des Hauses der Technik in Essen (Mai 2024) sowie an der Technischen Akademie Esslingen (Oktober 2024). Zusätzlich wurden die Projektergebnisse auf mehreren Fachtagungen präsentiert, darunter die „Power of Electronics – Cooling Days“ in Würzburg (September 2024), die Online-Kompaktkonferenz Wärmemanagement des ZFW (Februar 2025) und der DHBW-Technologietag in Stuttgart (März 2025). Diese Veranstaltungen boten eine geeignete Plattform, um die wissenschaftlichen Erkenntnisse und technischen Entwicklungen mit Fachleuten aus Industrie und Forschung zu diskutieren und neue Kooperationen anzustoßen. Zur weiteren Verbreitung in der Fachöffentlichkeit wurde das entwickelte Messverfahren in Artikeln in den Zeitschriften ElektronikPraxis (Januar 2025) und E-Motec (Juli 2025) beschrieben. Ergänzend dazu erfolgte eine kontinuierliche Informationsweitergabe über Newsletter und die Internetpräsenz des ZFW und ZBT, wodurch auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) außerhalb des direkten Projektumfelds erreicht werden konnten. Zusätzlich wurde der Wissenstransfer durch regelmäßige Direktansprachen und Kundenbesuche sowohl am ZFW als auch am ZBT verstärkt. Dabei wurden interessierten Industriepartnern die Projektergebnisse, Messprinzipien und potenziellen Einsatzgebiete vorgestellt. Diese Aktivitäten führten zu einer Reihe von konkreten Anwendungsanfragen, die den hohen Praxisbezug des Projektes belegen. Ein weiterer Baustein des Wissenstransfers war die Integration der Projektergebnisse in die Lehre. Im Rahmen der Vorlesung „Wärmemanagement in der Elektronik“ im Studiengang Mechatronik an der DHBW Stuttgart wurden die neuesten Forschungsergebnisse in den Sommersemestern 2023, 2024 und 2025 in die Lehrinhalte aufgenommen und anhand praktischer Beispiele vermittelt. Dadurch wurde das im Projekt generierte Wissen direkt an Studierende und künftige Fachkräfte weitergegeben.

Insgesamt konnte das Thermopem-Projekt nicht nur einen bedeutenden wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn erzielen, sondern auch einen unmittelbaren wirtschaftlichen Nutzen für Unternehmen, insbesondere für KMU, schaffen. Das neu entwickelte Messverfahren erlaubt eine frühzeitige Charakterisierung thermischer Materialeigenschaften, wodurch Entwicklungszeiten verkürzt, Kosten reduziert und Trial-and-Error-Prozesse vermieden werden können. Die Projektergebnisse liefern darüber hinaus wertvolle Hinweise auf Wärmeleitengpässe und Optimierungspotenziale innerhalb von PEM-Brennstoffzellenkomponenten.

Der Wissenstransfer wurde damit erfolgreich von der Forschung in die industrielle Anwendung geführt. Bereits erste Pilotanwendungen belegen das Potenzial des Verfahrens zur Implementierung in Entwicklungsabteilungen, Qualitätssicherungsprozessen und Technikumsumgebungen.

## 6 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
1. Treffen des Projektbegl. Ausschusses (PBA)	Vorstellung des Forschungsprojekts	Online Meeting	22.11.2022
2. Treffen des Projektbegl. Ausschusses (PBA)	Vorstellung des Forschungsprojekts	Online Meeting	22.11.2023
3. Treffen des Projektbegl. Ausschusses (PBA)	Vorstellung des Forschungsprojekts	Online Meeting	21.11.2024
Vorträge bei Seminaren und Workshops	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	Seminar Wärmemanagement HDT, Essen, Techn. Akademie, Esslingen	13./14.05.2024 01./02.10.2024
Kooperationsseminar Elektrolyse   Brennstoffzelle	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	Seminar im NanoEnergieTechnik-Zentrum (NETZ), Campus Duisburg der Universität Duisburg-Essen	10./11.04.2024
Vorstellung in Newsletter	Information einer breiteren Öffentlichkeit	E-Mail und Internetpräsenz ZFW	August 2023, Oktober 2024 und dauerhaft online
Direktansprache	Information interessierter Partner des ZFW	Informations-veranstaltungen und Kundenbesuche am ZFW	regelmäßig seit Mitte 2023
Lehre	Bereich. der Lehre durch aktuellste Forschungsergebnisse als visual. Projektergebn. Vorstell. der Projektergebn. im Rahmen der Lehre der DHBW Stuttgart, Fak. Technik	Vorlesung „Wärmemanagement in der Elektronik“ Studiengang Mechatronik, Prof. Dr. A. Griesinger	Sommersemester 2023, 2024 und 2025
Direktansprache	Information interessierter Partner des ZBT	Informations-veranstaltungen und Kundenbesuche am ZBT	regelmäßig seit Mitte 2023
Vortrag auf Fachtagung	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	Power of Electronics, Cooling Days, Würzburg	11.09.2024
Vortrag auf Fachtagung	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	Online-Kompaktkonferenz Wärmemanagement, ZFW	13.02.2025
Vortrag auf Fachtagung	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	DHBW Technologietag, Stuttgart	13.03.2025

Veröffentlichung in Fachzeitschrift(en)	Information einer breiten Fachöffentlichkeit	ElektronikPraxis	22.01.2025
Veröffentlichung in Fachzeitschrift(en)	Information einer breiten Fachöffentlichkeit	E-Motec	Juli 2025

## 7 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Treffen des Projektbegl. Ausschusses (PBA)	Abschluss	Online Meeting	18.11.2025
Information der AiF-Mitgliedsvereinigung	Vorstellung des Projekts vor Industrievertretern weiterer Branchen	Mitgliederversammlung des IUTA und IUTA-Innovationstage	November 2025
Vortrag oder Poster Präsentation auf Fachtagung	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	EFCF 2025, Lucern, Switzerland	2025
Vorträge bei Seminaren und Workshops	Vorstellung des Forschungsprojekts und der Ergebnisse	Seminar Wärmeman.: HDT Essen, Techn. Akademie Esslingen	Jährlich (seit 2008): ca. März und Juli, je 2-täg. Seminare
Vortrag mit Versuchsmustern, Präsentation auf einer Fachtagung	Präsentation von Versuchsaufbauten und entspr. Messdaten vor Fachöffentlichkeit	Wasserstofftage, ZBT, Duisburg	Herbst 2025
Veröffentlichung des Abschlussberichtes	Information der Öffentlichkeit	Internetpräsenzen von ZFW und ZBT	Nov 2025
Veröffentlichung in Fachzeitschrift(en)	Information einer breiten Fachöffentlichkeit	J. of Power Sources, Fuel Cell Bulletin etc.	2025
Direktansprache	Information möglicher Anwender zu Messtechnologien u. Ergebnissen, ggf. Einlad. zu Seminar	Industriebesuche ZBT	laufend
Lehre	Bereich. der Lehre durch aktuellste Forschungsergebnisse als visual. Projektergebn. Vorstell. der Projektergebn. im Rahmen der Lehre	Univ. Duisburg (Prof. H. Hoster)	2025