

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Entwicklung eines HT-PEM-Brennstoffzellenstacks mit integrierter Methanol-Reformierung
auf Basis von Compound-Material-Platten***

der Forschungsstelle

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH



Das IGF-Vorhaben 17115 N der Forschungsvereinigung IUTA wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom



aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Duisburg, 30.10.2014

Ort, Datum

Michael Steffen

Name und Unterschrift des Projektleiters
an der Forschungsstelle 1

Inhaltsverzeichnis

1.	VERWENDUNG DER ZUWENDUNG	2
1.1.	GEGENÜBERSTELLUNG DER ANGESTREBTEN ZIELE UND DER ERZIELTEN ERGEBNISSE	2
1.2.	EINSATZ VON WISSENSCHAFTLICHEM PERSONAL.....	4
1.3.	GERÄTEANSCHAFFUNG ÜBER 2500 EURO UND LEISTUNGEN DRITTER	5
1.4.	ERLÄUTERUNGEN DER NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEIT	5
2.	BESCHREIBUNG DER GELEISTETEN ARBEITEN	5
2.1.	REFORMIERUNGSKATALYSATOR (AP1)	5
2.2.	MEMBRAN-ELEKTRODEN-EINHEIT (AP2)	11
2.3.	EINZELZELLE UND SHORTSTACK (AP3)	15
2.3.1.	<i>IRMFC Einzelzelle</i>	15
2.3.2.	<i>Shortstack</i>	18
2.3.3.	<i>Plattenverdampfer</i>	21
2.4.	STACK (AP4)	23
2.4.1.	<i>Inbetriebnahme und H₂-Betrieb</i>	23
2.4.2.	<i>IRMFC-Betrieb</i>	24
2.5.	ENTWICKLUNG EINES AOG-BRENNERS (AP5)	29
2.6.	FUNKTIONSMUSTER (AP6)	30
3.	DARSTELLUNG DES WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFTLICHEN NUTZENS DER ERZIELTEN ERGEBNISSE.....	34
3.1.	WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER NUTZEN	34
3.2.	WIRTSCHAFTLICHER NUTZEN.....	35
4.	ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	35
4.1.	BEREITS DURCHFÜHRTE TRANSFERMAßNAHMEN.....	35
4.2.	GEPLANTE TRANSFERMAßNAHMEN NACH PROJEKTABSCHLUSS.....	36
5.	DURCHFÜHRENDE FORSCHUNGSSTELLE	37
6.	DANKSAGUNG UND FÖRDERHINWEIS	37
7.	LITERATURVERZEICHNIS	37

1. Verwendung der Zuwendung

1.1. Gegenüberstellung der angestrebten Ziele und der erzielten Ergebnisse

Das übergeordnete Ziel dieses Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer HT-PEM-Brennstoffzelle mit vollständig integriertem Methanol-Dampfreformer auf Basis von Compound-Material-Platten.

Geordnet nach den im Antrag formulierten Arbeitspaketen fasst die nachfolgende Tabelle die angestrebten Ziele in der Gegenüberstellung zu den erzielten Ergebnissen zusammen.

Angestrebte Ziele	Erzielte Ergebnisse
Arbeitspaket 1: Reformierungskatalysator	
Katalysatorrecherche und -beschaffung	Sieben Katalysatoren für die Dampfreformierung von Methanol konnten beschafft werden.
Teststandsanpassung und -inbetriebnahme	Ein vorhandener Teststand wurde angepasst und um einen T-FID Gasanalysator zur Bestimmung von Restmethanol erweitert.
Katalysatorqualifizierung	Es wurden Screeningversuche im Metallreaktor durchgeführt und zwei Katalysatoren für weitere Untersuchungen ausgewählt.
Kurze Dauerversuche zur Degradationsabschätzung	Die beiden ausgewählten Katalysatoren wurden in Compoundplattenreaktoren untersucht. Sie zeigten hierbei deutlich höhere Umsätze als im metallischen Plug-Flow-Reaktor.
Automatisierter Langzeittest	Test von Kat E über mehr als 140 h bei 200 °C wurde durchgeführt. Der Umsatz fiel hierbei von 98 % auf 95 % ab.
<u>Meilenstein 1:</u> Auswahl eines geeigneten Reformierungskatalysators	Reformierungskatalysator E wurde für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.
Arbeitspaket 2: Membran-Elektroden-Einheit	
Recherche und Beschaffung von geeigneten Membran-Elektroden-Einheiten	Es konnten insgesamt drei verschiedene Membran-Elektroden-Einheiten beschafft werden.
Teststandsanpassung und -inbetriebnahme	Ein vorhandener Teststand wurde an die Betriebsbedingungen zur Untersuchung von HT-PEMFCs bei 200 °C angepasst.
Charakterisierung der MEA-Leistungsfähigkeit mit H ₂ und synthetischem Reformat	Es wurden Polarisationskurven (UI-Kennlinien) in einem Temperaturbereich zwischen 160 °C und 200 °C mit H ₂ und synthetischem Reformat aufgenommen.
Dauerversuche zur Degradationsabschätzung	Es wurden MEA A_1 über 516 h und MEA B über 95 h bei 200 °C mit H ₂ getestet. Hierbei konnten mittlere Degradationsraten von 223 $\mu\text{V h}^{-1}$ bzw. 821 $\mu\text{V h}^{-1}$ nachgewiesen werden.

Bestimmung des Phosphorsäureaustrags	Der Phosphorsäureaustrag bei MEA A_1 betrug während des Dauerversuchs zwischen 2,9 und 4,3 $\mu\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$.
<u>Meilenstein 2</u> : Auswahl einer geeigneten MEA mit Leistungsdaten	Die Polybenzimidazol basierten MEAs zeigten sowohl eine höhere Leistungsfähigkeit als auch eine bessere Langzeitstabilität als die Pyridin basierte MEA und wurden daher für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Arbeitspaket 3: Einzelzelle & Shortstack

Auslegung, Konstruktion und Modellierung der Compoundplatten	Nach einer Grobauslegung der Compoundplatten auf Basis einer Berechnungstools wurden 3D-CAD-Modelle der einzelnen Platten in mehreren Varianten erstellt.
Simulation	Auf Basis der erstellten 3D-CAD-Modelle erfolgten CFD-Simulationen zur Optimierung der Strömungsführung und Wärmeverteilung.
Fertigung der Platten zur Beurteilung der Herstellbarkeit	Die auf Basis der Simulationen entwickelten Platten wurden in der mechanischen Werkstatt in Fräsversuchen auf ihre Herstellbarkeit untersucht.
Iterative Optimierung	Die in AP1 und AP2 gewonnenen Erkenntnisse sowie Ergebnisse der Fräsversuche flossen in einem iterativen Prozess in die Modellerstellung und Simulation zurück.
Fertigung und Assemblierung einer Einzelzelle	Es wurde eine optimierte Version einer Einzelzelle hergestellt.
Teststandserweiterung	Ein vorhandener Teststand wurde um eine Methanolversorgung erweitert.
Aufbau, Test und Betriebsoptimierung eines Shortstacks mit fünf Zellen	Auf Basis der optimierten Einzelzelle wurde ein Shortstack mit fünf Zellen aufgebaut. Nach Überprüfung der Funktionsfähigkeit wurden experimentelle Untersuchungen zur Betriebsoptimierung durchgeführt.
<u>Meilenstein 3</u> : Optimierte, funktionsfähige Einzelzelle und Shortstack als Basis für den Aufbau des Stacks mit 30 Zellen	Durch den Aufbau einer Einzelzelle und eines Shortstacks und die separat durchgeführte Entwicklung eines Plattenverdampfers standen nach Beendigung von AP3 die benötigten Komponenten für den Aufbau eines Stacks zur Verfügung.

Arbeitspaket 4: Stack

Konzipierung des Stackaufbaus	Mit den gewonnenen Erkenntnissen aus AP3 wurde ein Stack mit 20 Zellen entwickelt.
Fertigung und Assemblierung des Stacks	Die Eigenfertigungsbauteile wurden in der mechanischen Fertigung des ZBT hergestellt. Anschließend erfolgte die Assemblierung des Stacks.
Teststands Anpassung und -erweiterung	Ein vorhandener Teststand wurde umgebaut und unter anderem mit einer Einzelspannungserfassung ausgerüstet.

Experimentelle Untersuchungen am Stack	Nach der Inbetriebnahme des Stacks und Kopplung mit dem externen Verdampfer wurde eine erste Betriebsoptimierung durchgeführt.
Kopplung von Stack mit AOG-Brenner und Betriebsoptimierung	Nach der Kopplung des Stacks mit dem AOG-Brenner wurde die Funktionsfähigkeit des Brenners mit realem AOG überprüft und das Betriebsverhalten in den Zuständen Kaltstart, Nennbetrieb und kontrollierte Abschaltung optimiert.
<u>Meilenstein 4.1:</u> Funktionsfähiger Stack als Vorbereitung für den Funktionsmuseraufbau	Das Ergebnis von AP4 war ein funktionsfähiges System, bestehend aus einem 20-Zell-Stack mit integrierter Methanolreformierung gekoppelt mit einem AOG-Brenner und einem externen Plattenverdampfer.
Arbeitspaket 5: Brenner & Wärmeübertrager	
Auslegung, Konstruktion und Fertigung eines AOG-Brenners	Auf Basis eines Berechnungstools und thermodynamischen Simulationen wurde ein AOG-Brenner konstruiert und in der mechanischen Werkstatt des ZBT gefertigt. Im Rahmen von kurzen Messreihen wurde die Funktionsfähigkeit des Brenners überprüft.
<u>Meilenstein 4.2:</u> Funktionsfähiger Brenner und Kathodenluft-WÜ im integrierten Betrieb mit dem Stack	Der in AP5 entwickelte Brenner ist in der Lage, sowohl das anfallende AOG vollständig zu verbrennen, als auch mit Methanol gestartet zu werden.
Arbeitspaket 6: Funktionsmuster	
Aufbau und Inbetriebnahme des Funktionsmusters	Ein Plattenverdampfer in Langform wurde thermisch in den Stackaufbau integriert.
Testphase mit Betriebsoptimierung	Nach der Inbetriebnahme zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit aller Komponenten, folgte die Optimierung der Betriebszustände Startup, stationärer Betrieb und Shutdown. Als elektrische Maximalleistung wurden im Methanolbetrieb 253 W erzielt.
<u>Meilenstein 5:</u> Abschluss Demonstration und Projekt	Das Funktionsmuster wurde während der Demonstrationsphase interessierten Unternehmen und dem Projektbegleitenden Ausschuss präsentiert. Der Abschlussbericht wurde erstellt.

1.2. Einsatz von wissenschaftlichem Personal

Die für die Forschungsstelle (ZBT) bewilligten wissenschaftlichen Mitarbeiter wurden im Berichtszeitraum planmäßig für das Vorhaben eingesetzt und führten folgende Tätigkeiten im Zusammenhang mit den oben genannten Arbeitspaketen aus:

Entwicklung und Konstruktion, Fertigungsüberwachung, Teststandplanung und Inbetriebnahme, Detailauswertung, Analyse, Dokumentationen, Computersimulationen, PA-Vorbereitungen, Außenkontakte und -darstellung

1.3. Geräteanschaffung über 2500 Euro und Leistungen Dritter

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden keine Geräte über 2500 € angeschafft. Leistungen Dritter wurden nicht in Anspruch genommen.

1.4. Erläuterungen der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit entspricht in vollem Umfang dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

2. Beschreibung der geleisteten Arbeiten

2.1. Reformierungskatalysator (AP1)

Die Dampfreformierung von Methanol zur Erzeugung von Wasserstoff bzw. eines wasserstoffreichen Synthesegases ist ein endothermer Prozess, der üblicherweise in einem Temperaturbereich zwischen 250 und 350 °C stattfindet, wobei CuO/ZnO-Katalysatoren zum Einsatz kommen. Um eine hohe Katalysatoraktivität und vollständigen Methanolumsatz erreichen zu können, sind in der Praxis Temperaturen oberhalb von 250 °C nötig. Abb. 1 zeigt die Gleichgewichtszusammensetzung des trockenen Produktgases der Methanoldampfreformierung als Funktion der Temperatur für ein S/C-Verhältnis von 1,5 bei atmosphärischem Druck unter der Annahme, dass sowohl die Methanbildung als auch die Kohlenstoffabscheidung unterdrückt werden.

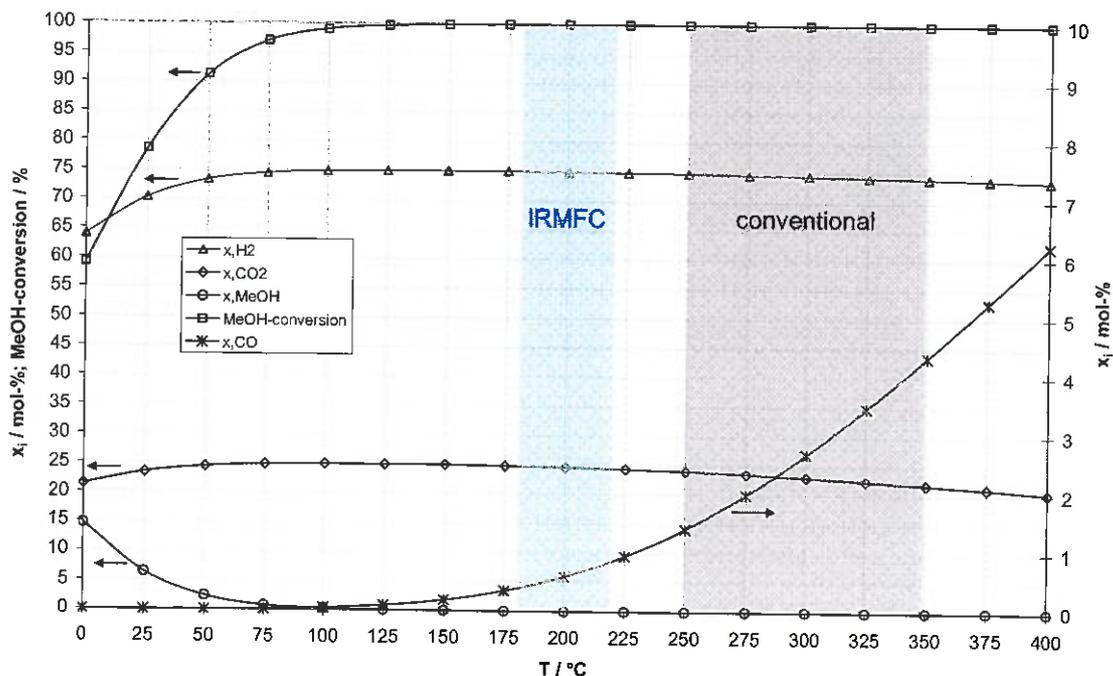


Abb. 1: Umsatz und Gleichgewichtszusammensetzung bei der Methanolreformierung (S/C = 1,5 und atmosphärischer Druck)

Es ist zu erkennen, dass schon bei einer Temperatur von 160 °C ein Methanolumsatz von 99,9 % möglich ist. Das entstehende trockene Produktgas hat in diesem Fall eine Zusam-

mensetzung von 74,8 % H₂, 24,8 % CO₂ und 0,2 % CO. Während eine Anhebung der Temperatur auf 200 °C auf den Wasserstoffanteil keinen Einfluss hat, ändern sich die Konzentrationen von CO₂ bzw. CO auf 24,6 % respektive 0,6 %, da sich mit steigender Temperatur das Gleichgewicht der beteiligten Wassergas-Shift-Reaktion hin zu einem höheren CO-Gehalt verschiebt. Für den Einfluss des S/C-Verhältnisses gilt, dass der CO-Gehalt im Reformatgas mit steigendem Wasseranteil deutlich reduziert wird.

Vor Beginn der experimentellen Arbeiten wurde ein vorhandener Teststand zur Katalysatorqualifizierung mit einer Methanolversorgung ausgestattet und die Teststandsteuerung modifiziert. Parallel zur Anpassung und Erweiterung des Teststandes erfolgte eine Recherche nach Katalysatoren, welche für die Methanol-Dampfreformierung bei niedrigen Temperaturen um 200 °C prinzipiell geeignet sind. Insgesamt konnten sieben verschiedene Katalysatoren zur Dampfreformierung von Methanol beschafft werden. Von den als Pellet oder Extrudat vorliegenden Katalysatoren verfügten sechs über nicht edelmetallhaltige Formulierungen (CuO/ZnO) und einer über eine Formulierung aus Pd/ZnO. Der edelmetallhaltige Katalysator sowie zwei der CuO/ZnO-Katalysatoren waren nicht kommerzielle Katalysatoren im Laborstadium. Die übrigen Katalysatoren konnten kommerziell bei verschiedenen Anbietern bezogen werden.

Die ersten experimentellen Untersuchungen wurden in einem metallischen Plug-Flow-Reaktor mit kubischem Reaktionsraum (l = 50 mm, b = 30 mm, h = 15 mm) durchgeführt. Über insgesamt acht Thermoelemente konnte die Temperatur im Reaktionsraum aufgezeichnet werden. Zur Beheizung verfügte der Reaktor über zwei seitlich integrierte Heizpatronen. Um eine einfache Variation des S/C-Verhältnisses zu erlauben, konnten die Methanol- und Wassermengen über separate Liqui-Flow-Controller (LFC) dosiert werden. Nach Mischung der beiden Komponenten in der flüssigen Phase wurde das Gemisch im Anschluss in einem Teststandsverdampfer verdampft und vor dem Eintritt in den Reaktor auf mind. 180 °C überhitzt.



Abb. 2: Plug-Flow-Reaktor

Im Rahmen der Screeningversuche wurde die Reaktoraustrittstemperatur, welche hier als Reaktionstemperatur definiert wurde, in einem Temperaturbereich von 180 – 300 °C variiert, wobei der Fokus auf dem Bereich zwischen 180 °C und 210 °C gelegt wurde. Das S/C-Verhältnis wurde in einem Bereich von 1,1 bis 1,9 und die Raumgeschwindigkeit (GHSV: gas hourly space velocity) in einem Bereich von 500 bis 1250 h⁻¹ variiert, um den Einfluss dieser beiden Parameter auf Selektivität und Aktivität bzw. Produktgaszusammensetzung und Methanolumsatz zu betrachten.

Die pyrophoren CuO/ZnO-Katalysatoren wurden vor Beginn der Reformierungsversuche bei einer Temperatur von 250 °C mit einer Mischung von 10 % H₂ in N₂ reduziert. Zur Analyse

des Reformats wurde dem Produktgas ein definierter N_2 -Volumenstrom hinzugefügt, ein Teilstrom als Probegas zum Auskondensieren der flüssigen Bestandteile auf $5\text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt und der eingesetzten Online-Gasanalyse zugeführt. Diese ermöglichte eine Bestimmung der Komponenten H_2 , CO_2 , CO und CH_4 .

Die folgende Abb. 3 zeigt den Methanolumsatz der beiden besten Reformierungskatalysatoren (Kat A und Kat E), welche beide kommerziell verfügbar sind, im Vergleich zum besten Katalysator im Laborstadium (Kat G). Die beiden Kurven für jeden Katalysator zeigen einmal die Leistungen bei den bevorzugten Betriebsbedingungen mit hohem S/C-Verhältnis und niedriger Raumgeschwindigkeit (Bedingung I) und bei den ungünstigsten Betriebsbedingungen (Bedingung II) mit niedrigem S/C-Verhältnis und hoher Raumgeschwindigkeit. Die gekennzeichneten Bereiche zwischen den beiden Kurven zeigen somit den untersuchten Leistungsbereich der jeweiligen Katalysatoren.

Unter Bedingung I konnten mit den Katalysatoren A und E oberhalb von $250\text{ }^\circ\text{C}$ vollständige Methanolumsätze erzielt werden. Im unteren Temperaturbereich zeigte Kat E etwas höhere Umsätze, beispielsweise bei $200\text{ }^\circ\text{C}$ einen Umsatz von $88,9\%$ gegenüber $84,4\%$ bei Kat A. Unter Bedingung II verringerte sich der Methanolumsatz erheblich. Er lag hier bei beiden Katalysatoren unter 50% , wobei Kat A insgesamt einen minimal höheren Umsatz zeigte. Die Ergebnisse demonstrieren den starken Einfluss von S/C-Verhältnis, Raumgeschwindigkeit und insbesondere der Temperatur auf die Methanolreformierungsreaktion. Letzteres wird durch den steilen Kurvenverlauf im unteren Temperaturbereich verdeutlicht.

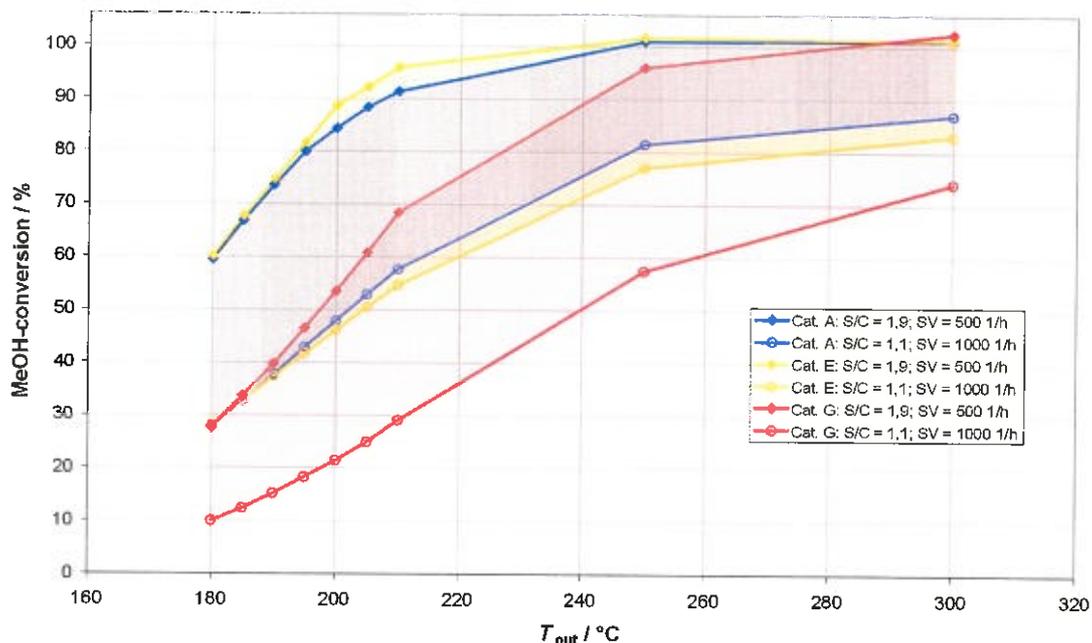


Abb. 3: Methanolumsatz von drei Methanolreformierungskatalysatoren im Plug-Flow-Reaktor (S/C = 1,1 und 1,9; GHSV = 500 und 1000 h^{-1})

Die beiden Katalysatoren A und E wurden anschließend für weiterführende Untersuchungen in plattenförmigen Reformierreaktoren aus Compoundmaterial ausgewählt, um die Katalysatorperformance im realitätsnahen Bauteil zu analysieren. Da die beiden Katalysatoren über unterschiedliche Form und Abmessungen verfügten, musste dies beim Plattendesign berücksichtigt werden. Die äußere Geometrie der Plattenreaktoren wurde bereits für den Einsatz als Reformierplatte im integrierten Stack ausgelegt (siehe Abb. 4). Sie bestanden aus zwei Platten aus Graphit-Compound, wovon eine durch frästechnische Bearbeitung mit an-

gepassten Kanälen zur Aufnahme der Reformkatalysatoren versehen wurde. Die andere Platte fungierte als Deckel. Beide Platten wurden über Endplatten aus Aluminium, welche miteinander verspannt wurden, fixiert. Die Endplatten verfügten jeweils über vier Bohrungen zur Aufnahme von Heizpatronen. Die Reformerplatte wurde zur Bestimmung der Temperaturen mit vier Thermoelementen versehen. Mit einem weiteren Thermoelement wurde die Temperatur des austretenden Gases gemessen.

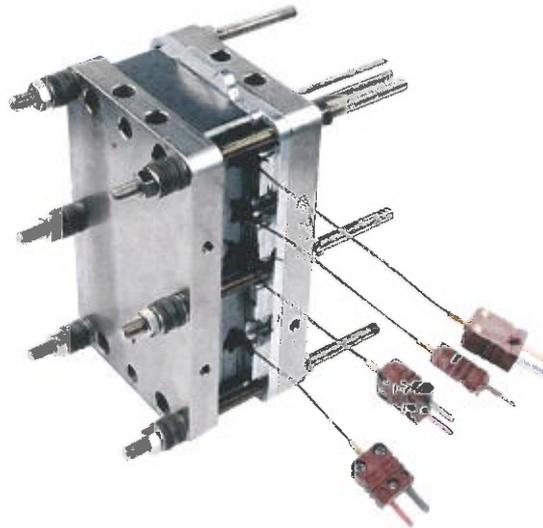


Abb. 4: Compoundplattenreaktor

Vor Beginn der Versuche wurde der vorhandene Teststand um einen Thermo-Flammenionisationsdetektor (T-FID) erweitert, mit dem der Restmethanolgehalt im feuchten Reformatgas bestimmt werden konnte.

Die wesentlichen Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen im Plattenreaktor sind in Abb. 5 dargestellt. Während bei beiden Katalysatoren Steigerungen des Methanolumsatzes von über 10 %-Punkten gegenüber den Untersuchungen im integralen Plug-Flow-Reaktor erzielt werden konnten, zeigten sich zwischen den beiden Katalysatoren deutliche Performanceunterschiede. Bei einer Raumgeschwindigkeit von 685 h^{-1} betrug der Methanolumsatz von Kat E 97,3 % bei S/C von 1,9 und 95,2 % bei S/C von 1,5. Kat A erreichte bei identischen Betriebsbedingungen nur Umsätze von 88,9 % bzw. 85,4 %.

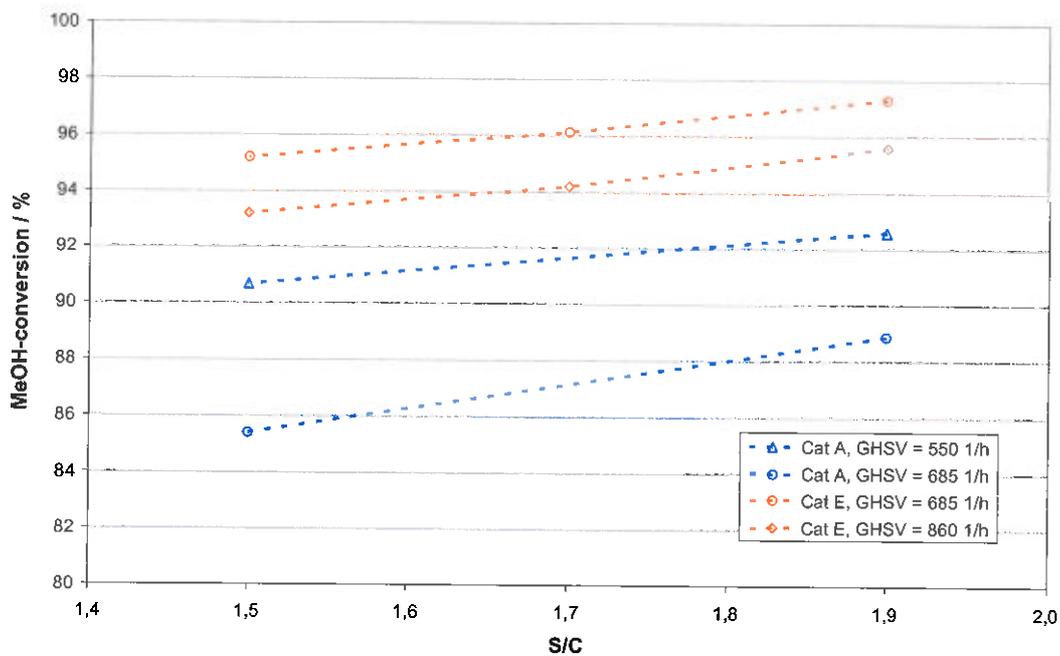


Abb. 5: Einfluss von S/C auf den Methanolumsatz in den Compoundplattenreaktor bei 200 °C für unterschiedliche Raumgeschwindigkeiten

Mit diesen Erkenntnissen wurde Kat E im Compoundplattenreaktor im stationären Betrieb über 144 h bei 200 °C mit einem S/C-Verhältnis von 1,5 und GHSV von 685 h⁻¹ getestet. Die Zusammensetzung des trockenen Reformats entsprach mit einem H₂-Anteil von etwa 75 %, einem CO₂-Anteil von etwa 24,5 % und einem CO-Anteil von etwa 1 % dem thermodynamischen Gleichgewicht. Der Methanolumsatz verringerte sich jedoch über die Versuchsdauer von etwa 95 % auf 93 %, was eine Konzentration von etwa 1 % Methanol im feuchten Reformat bedeutete.

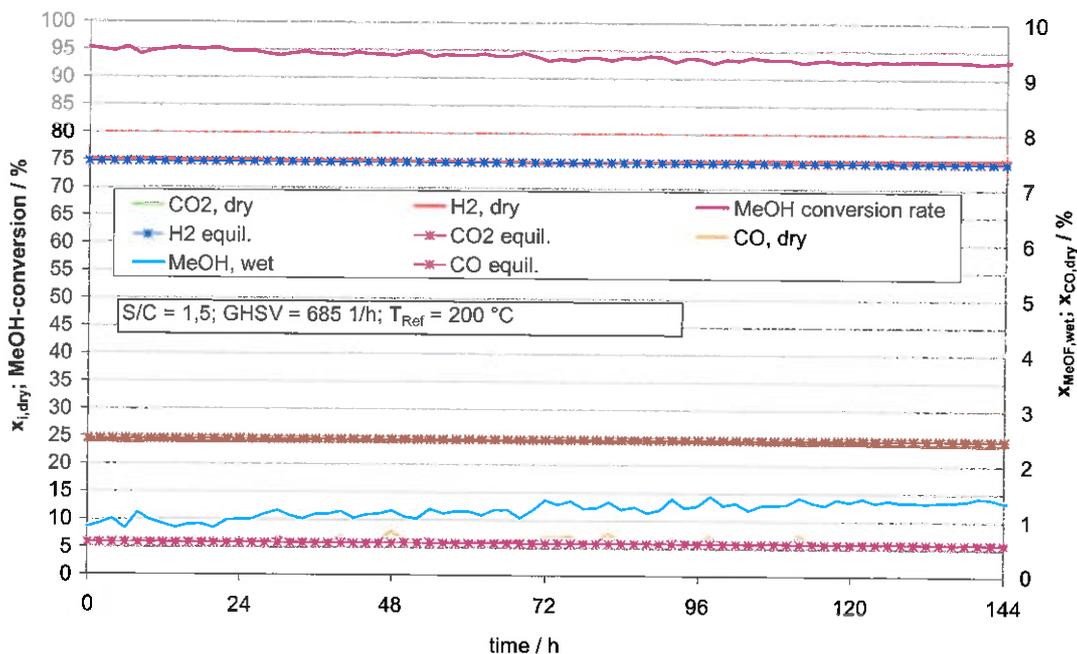


Abb. 6: Dauerversuch Reformerkat E im Compoundplattenreaktor

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass sich das Konzept des Compoundplattenreaktor aufgrund der deutlichen höheren Methanolumsätze gegenüber dem Plug-Flow-Reaktor als gut geeignet für den Einsatz in der IRMFC gezeigt hat. Ursachen hierfür sind einerseits der gute Wärmetransfer und die gute Wärmeverteilung in den Compoundplatten und andererseits das optimierte Strömungsprofil in den mit Katalysatorpellets bestückten Kanälen.

Zum Abschluss der Reformieruntersuchungen wurden Tests bei erhöhten Raumgeschwindigkeiten von 700 h^{-1} bzw. 1200 h^{-1} (GHSV) durchgeführt, um die Leistungsgrenzen des Plattenreformierkonzeptes zu bestimmen. Durch eine schrittweise Erhöhung der Temperatur von 200 °C auf 250 °C wurde ermittelt, wann bei diesen Raumgeschwindigkeiten ein Vollumsatz des Methanols erreicht wird. Aus Abb. 7 ist zu erkennen, dass bei einer Raumgeschwindigkeit von 700 h^{-1} ab einer Temperatur oberhalb von 240 °C von nahezu vollständigem Methanolumsatz ausgegangen werden kann. Bei einer Raumgeschwindigkeit von 1200 h^{-1} muss hierzu die Temperatur mindestens 250 °C betragen.

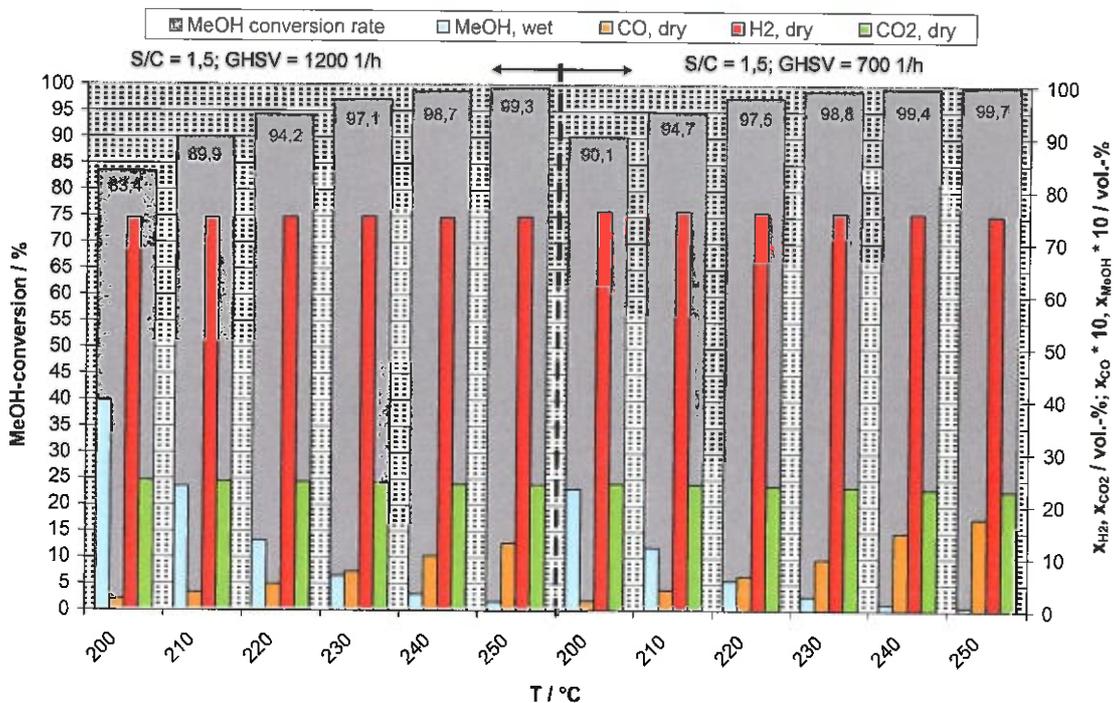


Abb. 7: Temperaturvariation Compoundplattenreaktor bei erhöhter Raumgeschwindigkeit

2.2. Membran-Elektroden-Einheit (AP2)

Für Untersuchungen von Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) in Einzelzellen wurde ein vorhandener Teststand inklusive Messapparatur angepasst (siehe Abb. 8).

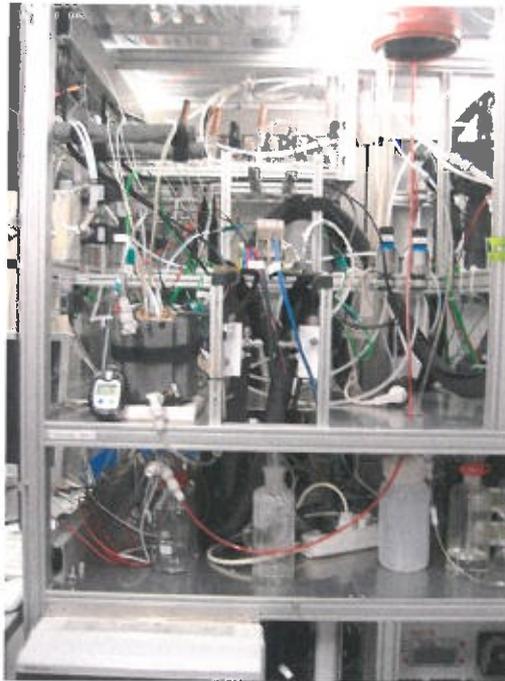


Abb. 8: MEA-Teststand für 1-Zeller-Tests

Im Anschluss an eine parallel durchgeführte Komponentenrecherche wurden MEAs, Dichtungsmaterialien und Compoundmaterialplatten mit den besten Eigenschaften für die zu erwartenden Betriebstemperaturen von ca. 200 °C beschafft. Als Plattenmaterial wurden Graphit-Compound-Platten eines externen Zulieferers in Materialstärken zwischen vier und zehn Millimetern bezogen. Als Dichtungsmaterial kann ein peroxidvernetztes, dampfbeständiges und bleifreies Fluorelastomer (FKM) für Hochleistungs-dichtungsanwendungen zum Einsatz.

Im Bereich der Membran-Elektroden-Einheiten konnten zwei unterschiedliche Arten beschafft werden. Die erste Art waren Polybenzimidazol (PBI) basierte MEAs in zwei unterschiedlichen Ausführungen (A_1 und A_2), wobei seitens des Herstellers zu Projektbeginn der Typ A_1 zur Verfügung gestellt wurde, im Rahmen der Projektlaufzeit jedoch auf den Typ A_2 umgestellt wurde. Gegenüber den MEAs vom Typ A_1 verfügte dieser über einen geänderten Aufbau mit einer neuen GDL. Die zweite MEA-Art waren Pyridin basierte MEAs (MEA B).

Aus den genannten Komponenten wurden Einzeller zur MEA-Charakterisierung aufgebaut. Die experimentellen Untersuchungen starteten mit Referenzmessungen in einem Temperaturbereich von 160 bis 200 °C. Zunächst wurden Strom-Spannungs-Kurven zur Charakterisierung der Leistungsfähigkeit bei Beaufschlagung der MEAs mit reinem Wasserstoff aufgenommen. Anschließend wurde die Degradation bei konstanten Betriebsbedingungen unter Wasserstoff beobachtet.

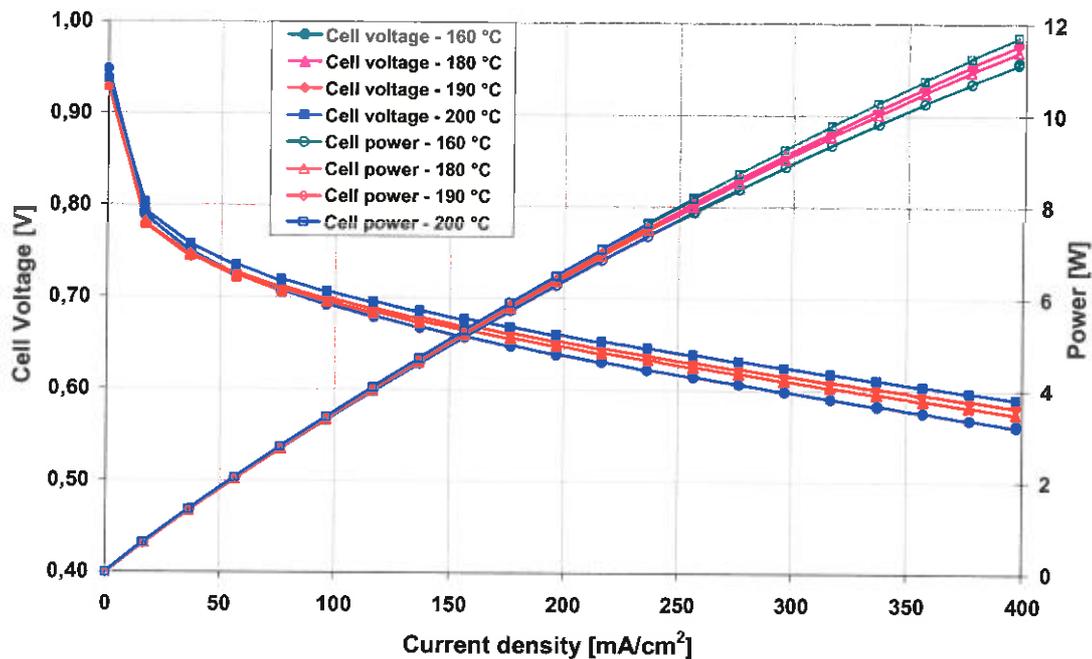


Abb. 9: Leistungsfähigkeit von MEA A_1 im Einzeltest zwischen 160 und 200 °C im Wasserstoffbetrieb ($\lambda_{\text{H}_2} = 1,25$; $\lambda_{\text{Luft}} = 2,5$)

Abb. 9 zeigt die erzielten Leistungen und Zellspannungen von MEA A_1 in diesem Temperaturbereich. Wie zu erwarten, erhöhte sich die Zellspannung mit steigenden Temperaturen. Beispielsweise stieg die Zellspannung bei einer Temperaturerhöhung von 160 auf 200 °C und einer Stromdichte von 400 mA/cm² um 30 mV an.

Um die Stabilität beurteilen zu können, wurde MEA A_1 in einem Langzeitversuch über 516 Stunden bei einer Temperatur von 200 °C mit Wasserstoff beaufschlagt. Mit Ausnahme der Zeit zur Aufnahme von Polarisationskurven (UI-Kennlinien) wurde die Stromdichte während der Versuchsdauer bei 400 mA/cm² konstant gehalten. Die Stöchiometrien betragen 1,25 (λ_{H_2}) bzw. 2,5 (λ_{Luft}).

In Intervallen von etwa 100 h wurden während des Langzeitversuchs Polarisationskurven aufgenommen. Innerhalb des Testzeitraums konnte hierbei bei der Zellspannung ein Verlust von insgesamt 115 mV beobachtet werden. Die kontinuierliche Verringerung der Zellspannung vom Beginn (BOL) bis zum Ende des Versuchs (EOL) ist in Abb. 10 deutlich zu erkennen. Als mittlerer Zellspannungsverlust ergab sich ein Wert von 223 $\mu\text{V h}^{-1}$. Im Vergleich zu Literaturwerten [1], die für PBI basierte Membranen im Bereich zwischen 6 $\mu\text{V h}^{-1}$ und 17 $\mu\text{V h}^{-1}$ bei Temperaturen zwischen 160 °C und 180 °C liegen, war somit eine deutlich erhöhte Degradationsrate festzustellen. Diese verstärkte Zelldegradation, bei gegenüber den Spezifikationen der MEA um ca. 20 °C erhöhter Betriebstemperatur, kann im Wesentlichen zwei Ursachen haben. Einerseits kann die Membranleitfähigkeit durch den verstärkten Ausstrom von Phosphorsäure durch Verdampfen und/oder durch eine erhöhte Viskosität des Elektrolyten, durch den Verlust von Wasser in der Phosphorsäure, verringert werden. Andererseits kann es zu einer verstärkten Schädigung des Katalysatorträgermaterials durch Kohlenstoffkorrosion (carbon corrosion) kommen.

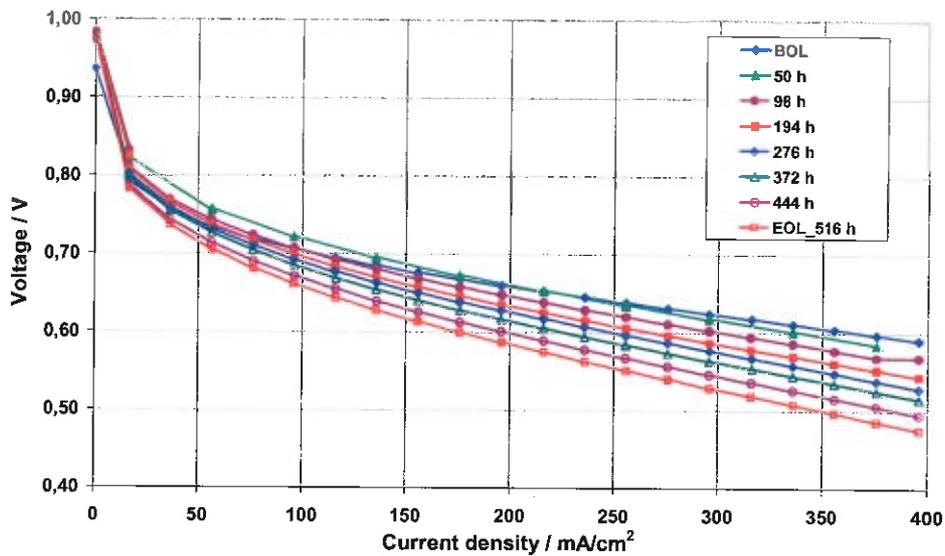


Abb. 10: Polarisationskurven MEA A_1 während des Langzeitversuchs ($T = 200\text{ °C}$, $\lambda_{\text{H}_2} = 1,25$, $\lambda_{\text{L}} = 2,5$)

Der Austrag von Phosphorsäure wurde durch eine Analyse des aufgefangenen Kondensats der Kathodenseite untersucht. Während des geschilderten Dauerversuchs ergaben sich Werte zwischen $2,9\ \mu\text{g m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ und $4,3\ \mu\text{g m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ Phosphorsäure im Kondensat. Dies passt von der Größenordnung zu Vergleichswerte wie sie in der Literatur [1] gefunden werden können. Dort werden etwa $3,9\ \mu\text{g m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$ für einen Betrieb bei 190 °C genannt.

Die folgende Abb. 11 zeigt den Vergleich der Leistungsfähigkeit der eingesetzten MEA-Typen bei identischen Betriebsbedingungen.

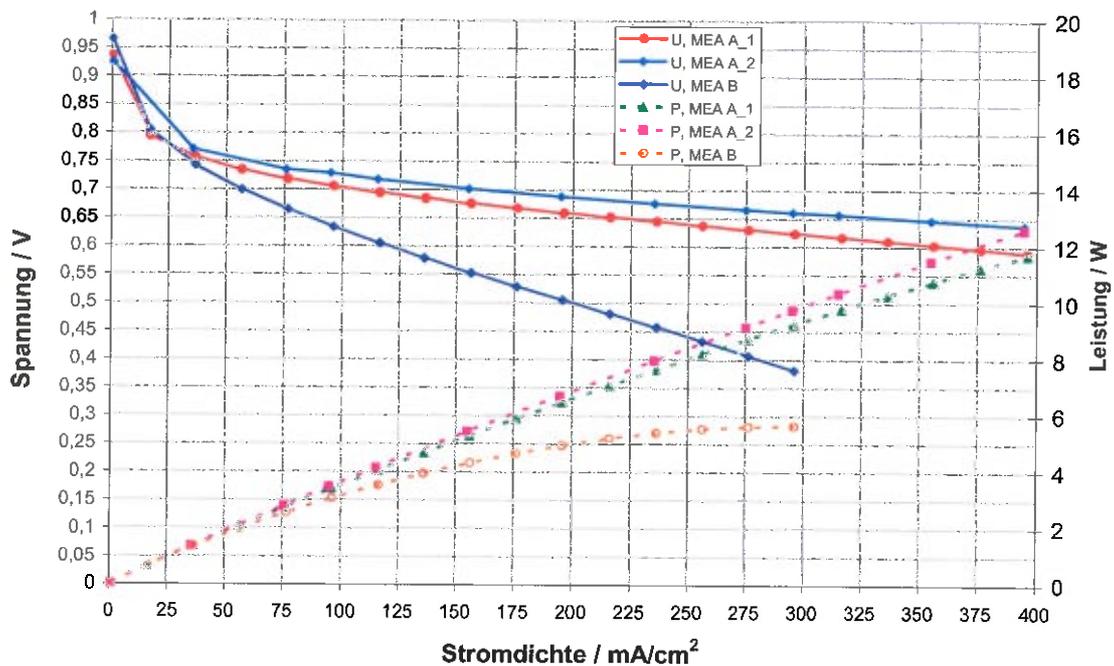


Abb. 11: Vergleich Zellspannung und Leistung der MEA ($T = 200\text{ °C}$, $\lambda_{\text{H}_2} = 1,25$, $\lambda_{\text{L}} = 2,5$)

Die beste Performance zeigte die MEA A_2, die erst zum Abschluss der MEA-Untersuchungen zur Verfügung stand. Bei der anvisierten Zielstromdichte von 400 mA/cm^2 betrug die Zellspannung etwa $0,63 \text{ V}$, während die Spannung bei MEA A_1 bei etwa $0,59 \text{ V}$ lag. Die auf Pyridin basierende MEA B zeigte im Vergleich eine deutlich schlechtere Leistungsfähigkeit. Eine Stromdichte von 400 mA/cm^2 konnte bei einer akzeptablen Zellspannung nicht erzielt werden. Bei einer Zellspannung von $0,65 \text{ V}$, zum Vergleich der drei MEAs, beträgt die Zelleistung der MEA B mit $2,8 \text{ W}$ weniger als 40% der Leistung von MEA A_1 ($7,3 \text{ W}$) und nur 25% der Leistung von MEA A_2 ($11,3 \text{ W}$). Darüber hinaus zeigte MEA B ein deutlich schlechteres Degradationsverhalten als MEA A_1. In einem kurzen Dauerversuch betrug die mittlere Degradationsrate für diese MEA $0,821 \text{ mV h}^{-1}$. Aufgrund der starken Degradation sowie der im Vergleich zu MEA A_1 und A_2 deutlich geringeren Leistungsfähigkeit von MEA B wurde entschieden, den Dauerversuch nach etwa 95 h abzubrechen und alle weiteren Untersuchungen mit MEA Typ A durchzuführen.

Zu diesen weiteren Untersuchungen gehörte zunächst die Betrachtung der Abhängigkeit der Leistung vom Wasserstoffumsatzgrad (Fuel Utilisation, FU). Abb. 12 zeigt den Einfluss von FU auf die Leistungsfähigkeit von MEA A_1 in drei Temperaturschritten bei 160 , 180 und 200 °C mit reinem Wasserstoff. Zunächst verdeutlichen die Kurven noch einmal den Einfluss der Temperatur auf die Zellspannung. Bei 400 mA/cm^2 betrug die Differenz der Zellspannung im Temperaturbereich zwischen 160 und 200 °C bis zu 50 mV . Der Einfluss von FU fiel im Vergleich geringer aus. Hier nahm die Zellspannung mit steigendem H_2 -Umsatzgrad im Schnitt geringfügig ab, wobei der Unterschied mit steigender Temperatur geringer wurde.

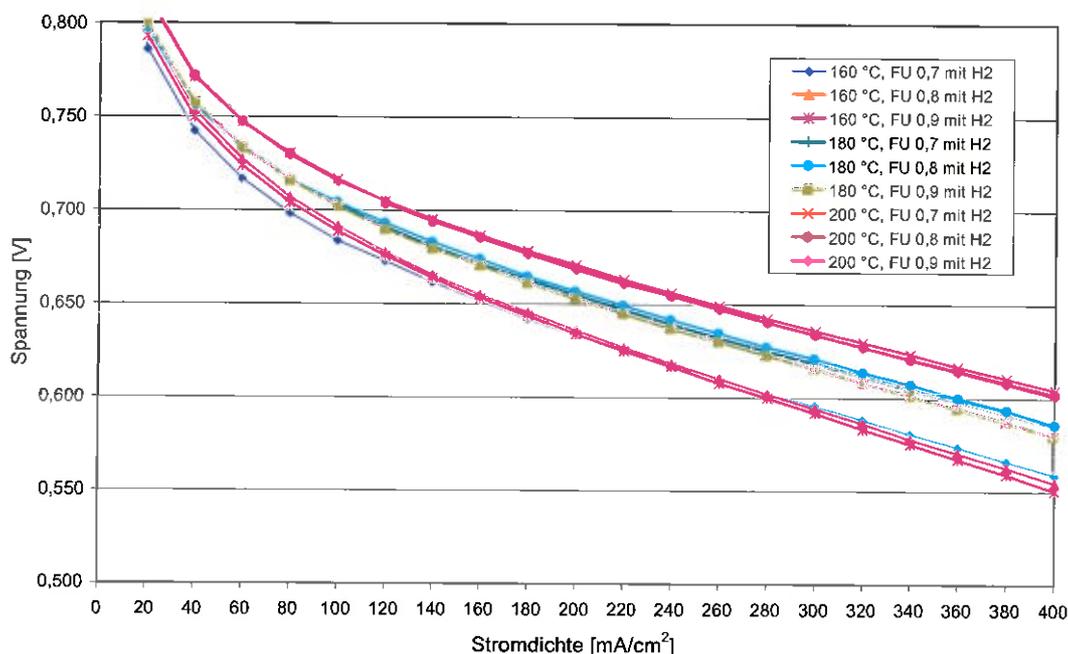


Abb. 12: Einfluss von FU auf die Leistungsfähigkeit von MEA A_1

Der Einfluss des CO_2 - und H_2O -Gehalts im Reformat auf die Leistungsfähigkeit wurde ebenfalls untersucht. Bei einer Temperatur von 200 °C wurde die MEA zunächst mit reinem Wasserstoff beaufschlagt (rote Kurve), um eine Referenzkurve zu erhalten. Anschließend wurde ein Gemisch aus 75% H_2 und 25% CO_2 über die Massflowcontroller dosiert und auf die MEA gegeben. Hiermit sollte die Zusammensetzung des trockenen Reformatgases nach thermodynamischem Gleichgewicht simuliert werden. In weiteren Versuchsreihen wurde diesem Gemisch noch Wasser in unterschiedlichen Mengen hinzugefügt, um den Restwasseranteil nach der Reformierung bei unterschiedlichen S/C-Verhältnissen zu simulieren. Abb. 13

zeigt, dass sich die einstellende Zellspannung bei gleicher Stromdichte mit steigendem Wasseranteil verringerte, da sich der Partialdruck des Wasserstoffs verringerte. Die geringsten Zellspannungen ergaben sich jedoch für das trockene Reformat. Dies wiederum deutete darauf hin, dass ein gewisser Anteil von Wasser die Membranleitfähigkeit positiv beeinflusste. Um mögliche Degradationseffekte auszuschließen, wurde zum Abschluss dieser Untersuchungen eine weitere Referenzmessreihe mit reinem Wasserstoff (dunkelblaue Kurve) durchgeführt. Hier zeigte sich im Bereich von Stromdichten oberhalb von 160 mA/cm^2 noch eine sehr gute Übereinstimmung mit der ersten Referenzkurve. Im unteren Stromdichtenbereich war die Leistungsfähigkeit jedoch geringer als bei der ersten Kurve, was erneut auf eine schnelle Alterung der MEA in diesem Temperaturbereich hindeutete.

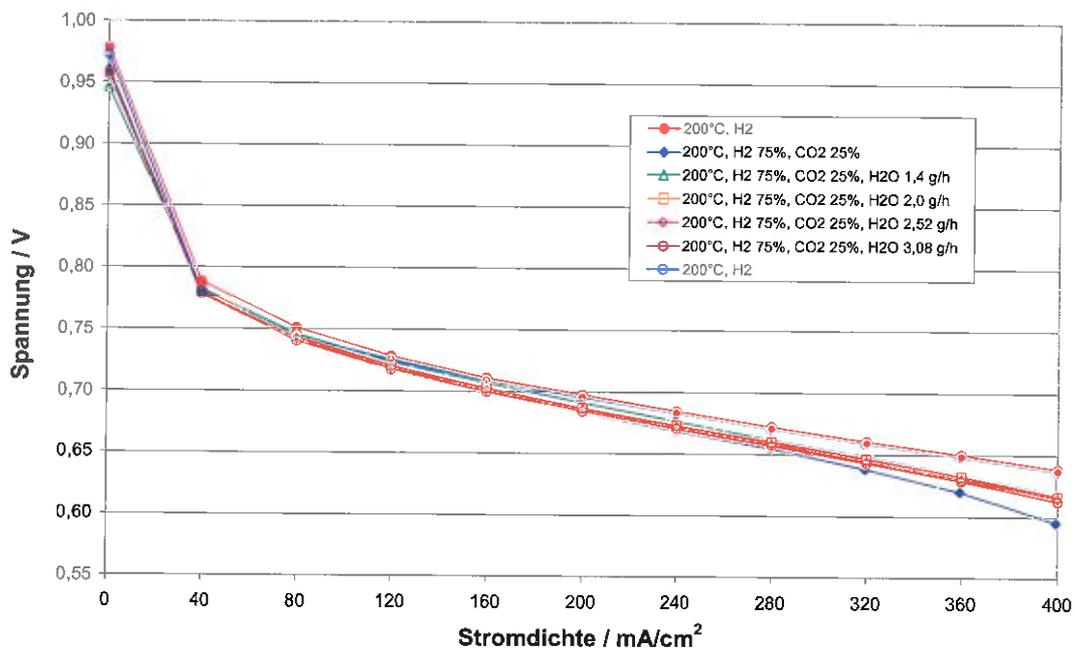


Abb. 13: Einfluss des CO₂- und H₂O-Gehalts auf die Performance von MEA A_2

2.3. Einzelzelle und Shortstack (AP3)

2.3.1. IRMFC Einzelzelle

AP3 begann mit der verfahrenstechnischen Auslegung der integrierten Einzelzelle und der Erstellung erster Skizzen zu Flowfields für Verdampfer-, Überhitzer-, und Reformerbereich. Nach Abschluss der verfahrenstechnischen Grundauslegung und Erarbeitung von unterschiedlichen Designs für die einzelnen Bereiche des integrierten Reformerkonzepts wurden erste 3D-CAD-Modelle erstellt. Um rechtzeitig Aussagen zur praktischen Umsetzbarkeit der Plattendesigns zu erhalten, wurde unmittelbar nach der Erstellung der ersten CAD-Modelle mit der Herstellung erster Compoundplatten auf den CNC-Fräsen in der mechanische Werkstatt des ZBT begonnen. In einem iterativen Prozess flossen die praktischen Erfahrungen aus der Herstellung wieder in die Modellerstellung zurück, um hinsichtlich ihrer Herstellbarkeit optimierte Varianten zu erhalten. Zusätzlich wurden die letzten Erkenntnisse aus den Katalysator- und MEA-Untersuchungen berücksichtigt. Die frästechnischen optimierten Varianten wurden dann auf ihre Eignung für den Zusammenbau getestet. Außerdem wurden diverse Einzeller aufgebaut, um Druckverluste zu ermitteln und die Dichtigkeit zu testen. Die

3D-Modelle dienten auch als Vorlage für die CFD-Untersuchungen mit dem Simulationstool FLUENT®. Hier wurden Untersuchungen zur Temperaturverteilung und Druckverlust in den einzelnen Platten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden ebenfalls in den Designoptimierungen berücksichtigt und schließlich wurden erste funktionsfähige Einzelzellen für die experimentellen Untersuchungen aufgebaut. Die 1-Zell-Module verfügten, wie in Abb. 14 exemplarisch dargestellt, über je eine Compoundplatte für Reformer, Verdampfer/Überhitzer, Kathode und Anode.

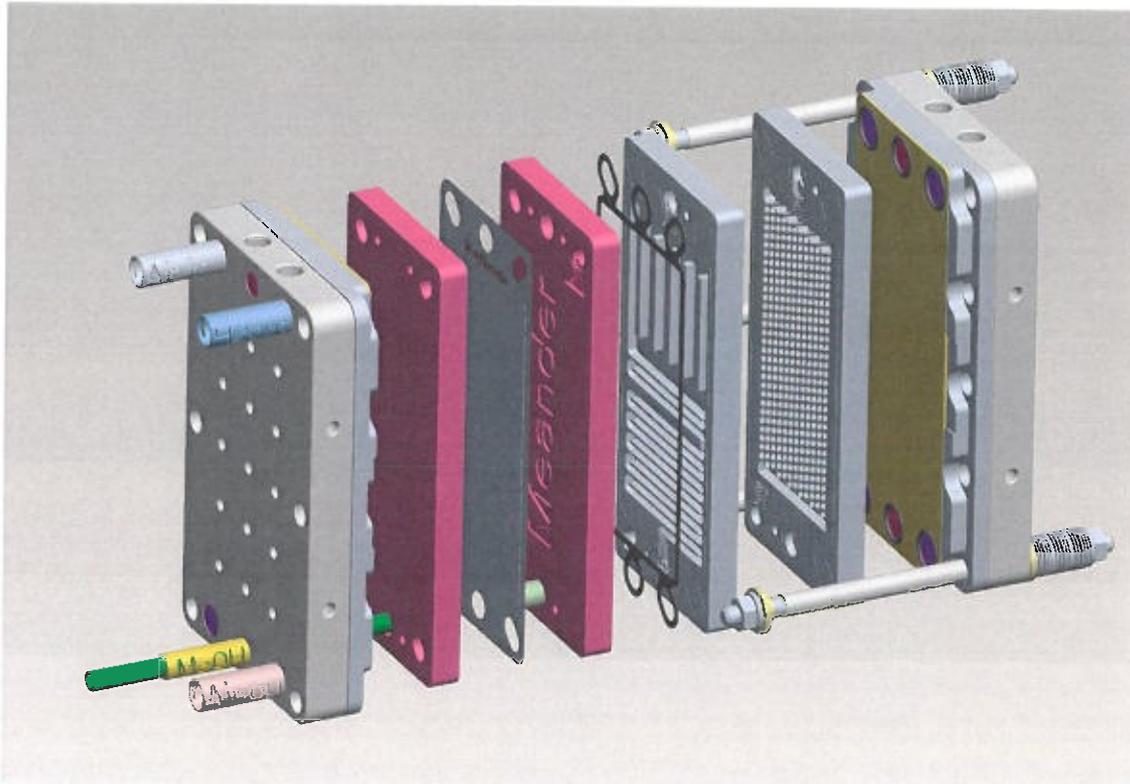


Abb. 14: Aufbau 1-Zell IRMFC

Für die experimentellen Untersuchungen wurde der Teststand, auf welchem die Reformeruntersuchungen durchgeführt worden waren, um eine Einzelspannungserfassung sowie eine elektronische Last erweitert. Nach Wiederinbetriebnahme des Teststandes konnten die Untersuchungen an verschiedenen Varianten von integrierten Reformer-Brennstoffzellen-Modulen begonnen werden.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der optimierten Einzelzelle dargestellt. Die Untersuchungen wurden mit reinem Wasserstoff begonnen, um aussagekräftige Ergebnisse in einem Referenzzustand zu haben. Hierbei wurden während der Aufnahme der Polarisationskurve die Volumenströme von Wasserstoff und Luft konstant gehalten, wobei ein Betriebspunkt von 400 mA/cm^2 bei $FU = 0,8$ und $\lambda_{\text{Luft}} = 2,5$ abgebildet wurde (Fall I). Anschließend wurden Versuchsreihen mit synthetischem Reformat, bestehend aus H_2 , CO_2 und H_2O durchgeführt (Fall II), wobei die Wasserstoff- und Luftmengen identisch zu Fall I dosiert wurden. Danach wurde ein Methanol/Wassergemisch mit zwei unterschiedlichen Raumgeschwindigkeiten von 770 bzw. 1030 h^{-1} dem IRMFC-1-Zell-Modul zugeführt (Fall III). Aufgrund des hochintegrierten Aufbaus der IRMFC mussten in den ersten beiden Fällen die Brennstoffvolumenströme vor Erreichen der Anodenseite zunächst durch die integrierte Verdampfer/Überhitzerplatte und die Reformerplatte strömen. In beiden Fällen erfolgte die Zufuhr von außen bei Raumtemperatur. In Fall III erfolgte die Zufuhr des Methanol/Wassergemisches vorverdampft durch einen

externen Verdampfer, da sich in ersten Versuchen gezeigt hatte, dass die integrierte Verdampfer/Überhitzereinheit erhebliche Druckschwankungen bzw. Pulsationen erzeugte. Da ein aussagefähiger Testbetrieb des 1-Zell-Moduls somit nicht möglich war, wurde im Zuge eines zügigen Projektfortschrittes entschieden, die weiteren Versuche zunächst mit externer Verdampfung durchzuführen und die Verdampferentwicklung in einem gesonderten Entwicklungspfad weiterzuverfolgen (siehe Kap. 2.3.3). Die Luft wurde in allen drei Fällen mit Raumtemperatur zugeführt. Um die Degradation der MEA und des Reformerkatalysators während dieser ersten Versuche im integrierten Betrieb gering zu halten, wurden die Versuche mit einem S/C-Verhältnis von 1,9 durchgeführt.

Abb. 15 zeigt die Polarisations- bzw. Leistungskurven für die drei genannten Fälle. Die Kurven zeigen den erwarteten Verlauf. Die höchste Leistung ergab sich für den Betrieb mit reinem Wasserstoff (Fall I). Danach folgte der Betrieb mit synthetischem Reformat (Fall II) und schließlich der IRMFC-Betrieb mit Methanol. Aufgrund der geringen Brennstoffmenge bei dem gewählten S/C-Verhältnis von 1,9 war der Betrieb bei der Raumgeschwindigkeit von 770 h^{-1} auf eine Stromdichte von maximal 300 mA/cm^2 limitiert. Die höhere Raumgeschwindigkeit von 1030 h^{-1} erlaubte hingegen einen stabilen Betrieb bis zu einer Stromdichte von 360 mA/cm^2 . In beiden Betriebspunkten mit Methanol war die Zellspannung etwa 30 mV geringer als im reinen Wasserstoffbetrieb. Da alle Versuche nacheinander mit derselben MEA durchgeführt wurden, muss jedoch berücksichtigt werden, dass evtl. bereits eine leichte Zelldegradation stattgefunden haben könnte, so dass ein absoluter quantitativer Vergleich schwierig ist.

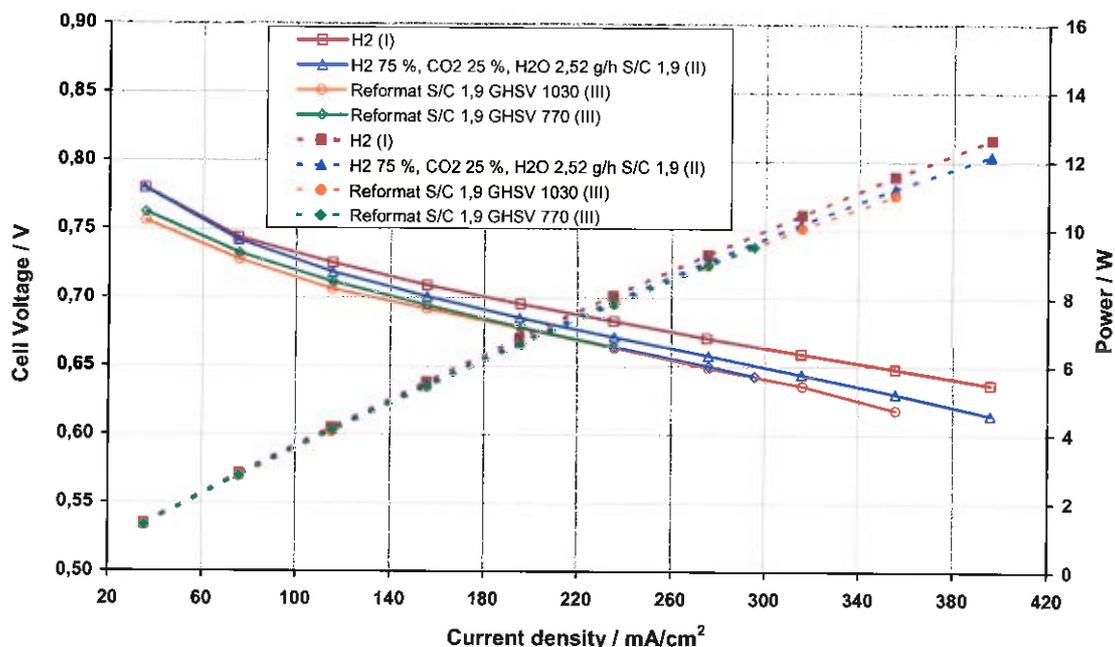


Abb. 15: Polarisationskurven für das 1-Zell-IRMFC-Modul im Betrieb mit reinem Wasserstoff, synthetischem Reformat und Methanol bei $200 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\text{S/C} = 1,9$

Um die Stärke der Degradation im Methanolbetrieb beurteilen zu können, wurde im Anschluss ein Langzeitversuch über mehr als 170 Stunden durchgeführt. Da die zu erzielende Zelleistung mindestens 10 W betragen sollte, wurde eine Stromdichte von 300 mA/cm^2 angestrebt. Um diese über den Dauerversuch konstant halten zu können, wurde die Brennstoffmenge und damit die Raumgeschwindigkeit erhöht auf 900 h^{-1} , um auch im Falle einer Degradation des Reformerkatalysators ausreichend Wasserstoff zur Verfügung stellen zu

können. Das S/C-Verhältnis wurde bei 1,9 belassen. Abb. 16 zeigt den Verlauf der Zellspannung sowie der Temperatur und des Methanolmassenstroms. Über einen Zeitraum von mehr als 170 Stunden nahm die Zellspannung bei konstanten Betriebsbedingungen von etwa 0,63 V auf unter 0,56 V ab, wobei der Degradationsrate mit steigender Versuchsdauer zunahm. Für die ersten 50 h betrug die Degradationsrate etwa $0,06 \text{ mV h}^{-1}$, für die folgenden 50 h erhöhte sich der Wert auf etwa $0,36 \text{ mV h}^{-1}$. Nach 100 h wurde schließlich eine Degradationsrate von $0,7 \text{ mV h}^{-1}$ erreicht.

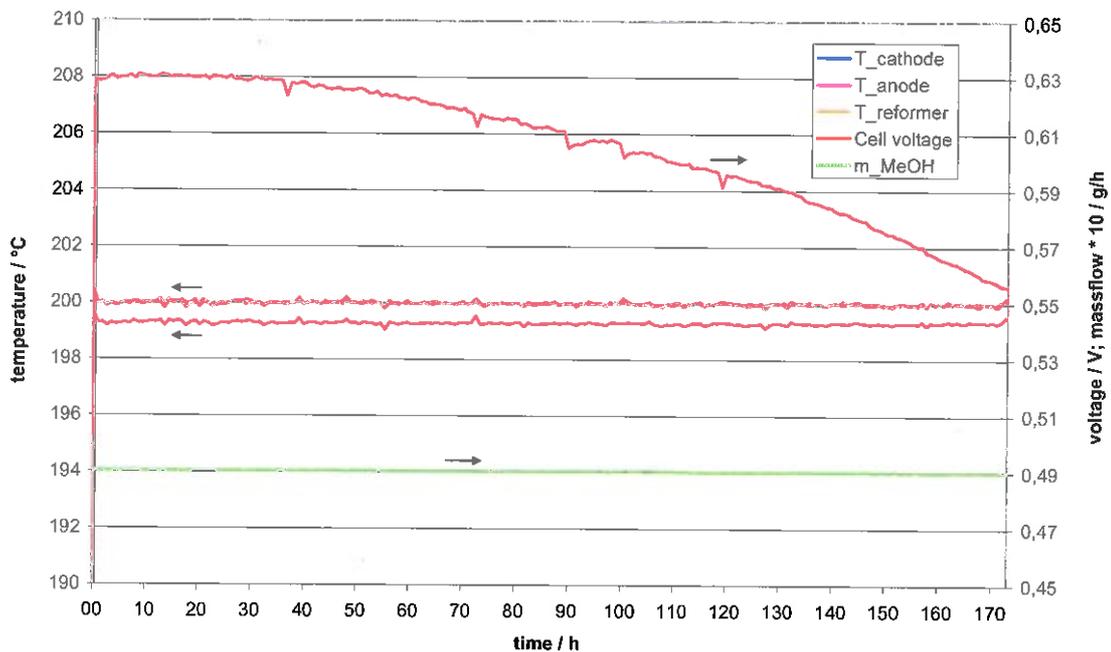


Abb. 16: MEA-Degradation im Methanolbetrieb (Stromdichte 300 mA/cm^2)

2.3.2. Shortstack

Nachdem das Konzept der internen Methanolreformierung in einer HT-PEMFC am 1-Zell-Modul erprobt und verbessert wurde, konnte im Anschluss ein Shortstack aus fünf Zellen aufgebaut werden, siehe Abb. 17. Der optimierte Aufbau bestand aus gefrästen Platten aus Compoundmaterial mit äußeren Abmessungen von $140 \times 60 \text{ mm}$. Die dickere der beiden Platten einer Zelle beinhaltete den Reformierbereich mit dem Katalysator E und auf der anderen Seite das Kathoden-Flowfield. Die dünnere Platte enthielt das Anoden-Flowfield. Die Endplatten aus Aluminium verfügten über Aufnahmen zur Integration von Heizpatronen zur Temperierung des Shortstacks. Die Temperaturverteilung in den Platten konnte über drei seitlich angebrachte Thermoelemente je Platte bestimmt werden. Ohne die Isolierung aus schwarzem Polyamidschaum betragen die Abmessungen des Stacks $140 \times 118 \times 84 \text{ mm}$.

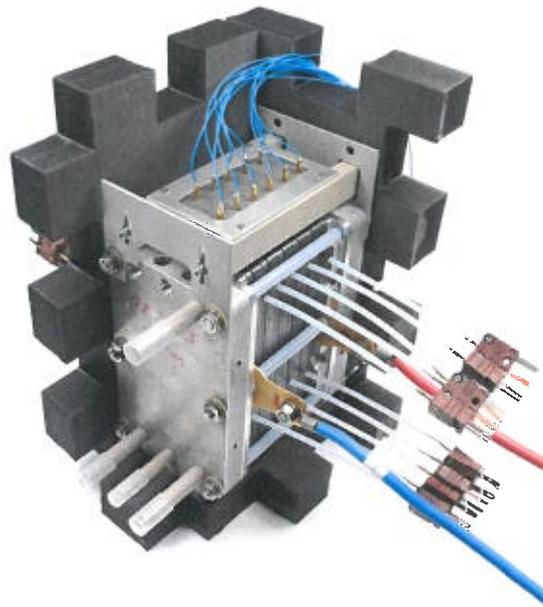


Abb. 17: 5-Zell-Shortstack-IRMFC

Da sich in den vorherigen Versuchen an dem 1-Zell-Modul gezeigt hatte, dass sich bei der gewählten Geometrie mit dem internen Verdampfer keine gleichmäßige und pulsationsfreie Verdampfung einstellen ließ, wurde auch bei den experimentellen Untersuchungen am Shortstack ein externer Verdampfer eingesetzt, um aussagekräftige Ergebnisse erzielen zu können. Die Optimierung des Verdampferbereichs wurde in einem parallelen Entwicklungspfad separat behandelt und wird in Kap. 2.3.3 dargestellt.

Bei den experimentellen Untersuchungen am Shortstack wurden ebenfalls wieder Versuchsreihen mit reinem Wasserstoff, synthetischem Reformat und Methanol durchgeführt. Abb. 18 zeigt die Polarisations- und Leistungskurven für diese Betriebsarten. Vor den Untersuchungen am Shortstack wurde festgelegt, das S/C-Verhältnis auf 1,5 zu reduzieren.

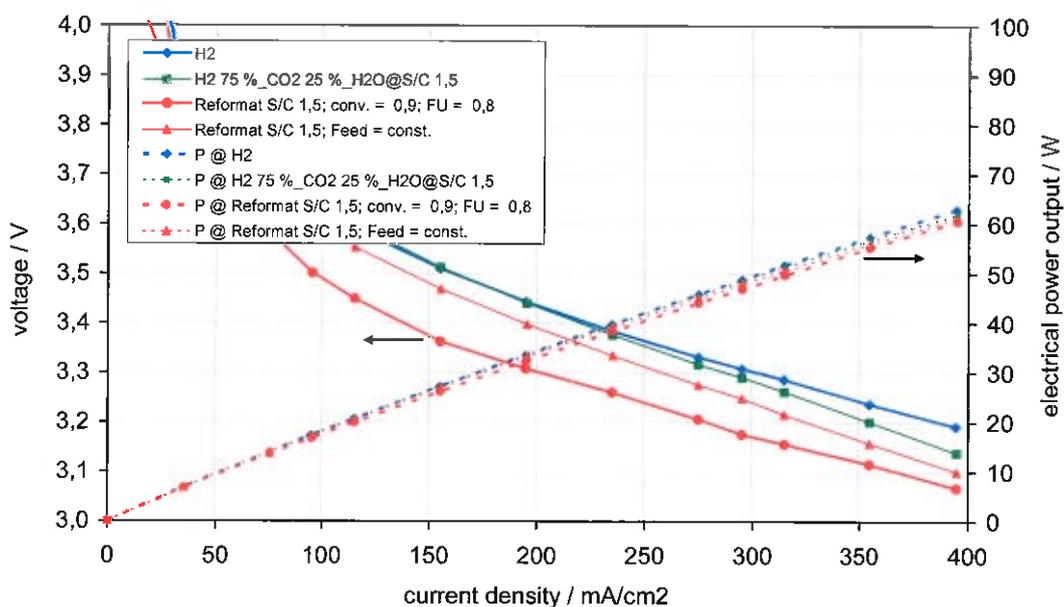


Abb. 18 Performance IRMFC-Shortstack bei 200 °C

Im Methanolbetrieb konnten mit dem Shortstack unter dieser Voraussetzung mehr als 60 W bei einer Gesamtspannung mehr als 3 V generiert werden. Der Leistungsunterschied zwischen dem Betrieb mit Wasserstoff und Methanol betrug weniger als 5 % bei einer Stromdichte von etwa 400 mA/cm².

Die Zusammensetzung des Reformats und der Methanolumsatz für drei unterschiedliche Betriebszustände sind in Abb. 19 dargestellt. Bei 200 °C konnten ein nahezu vollständiger Methanolumsatz und elektrische Wirkungsgrade über 40 % erzielt werden, wobei der H₂-Umsatzgrad in der Brennstoffzelle jeweils über 72 % betrug. Eine Reduzierung der Temperatur auf 190 °C führte nur zu einer geringen Abnahme des Methanolumsatzes und elektrischen Wirkungsgrads.

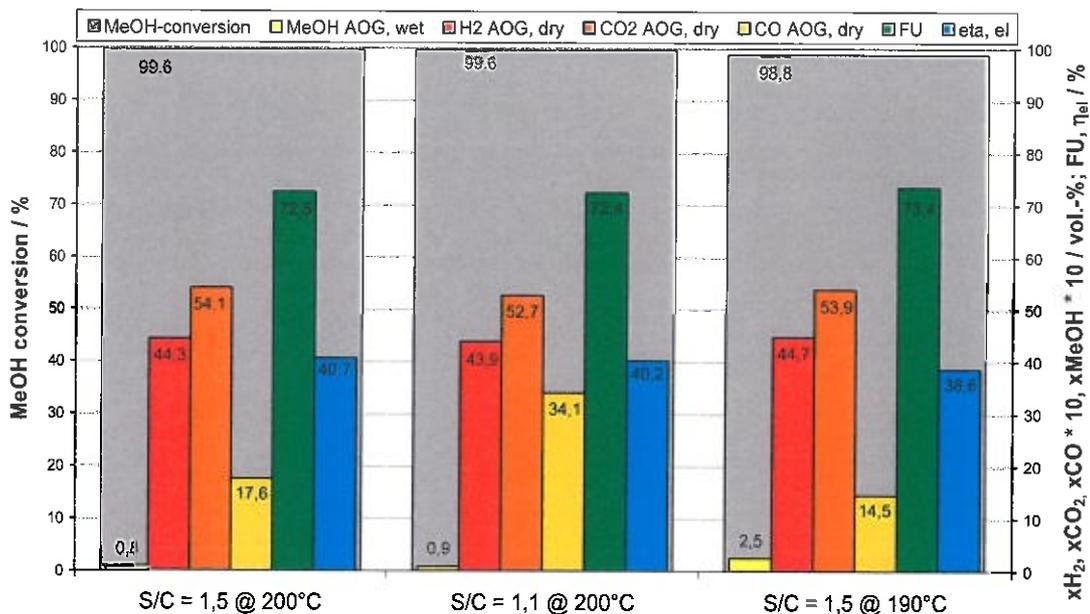


Abb. 19: Methanolumsatz, elektrischer Wirkungsgrad, Fuel Utilisation und AOG-Zusammensetzung des Shortstacks

Wie in Abb. 17 zu erkennen, verfügte der Shortstack über zahlreiche Temperaturmessstellen. Die Temperaturen wurden in 5 mm tiefen Bohrungen im Randbereich der Platten in drei unterschiedlichen Höhen gemessen. Während eines Versuches wurden neun Temperaturen der Compoundplatten und drei Medientemperaturen aufgezeichnet, um die Temperaturverteilung beurteilen zu können. Abb. 20 zeigt die Temperaturverteilung im Methanolbetrieb bei ca. 200 °C. Zusätzlich sind die Medienströme in den einzelnen Platten skizziert. Die Eintrittstemperatur des im externen Plattenverdampfer überhitzten Methanol/Wassergemisches in den Stack betrug 188 °C. Die Luft wurde nicht vorgewärmt und somit mit Umgebungstemperatur dem Shortstack zugeführt. Innerhalb der dickeren Reformer/Kathodenplatten war jeweils nur ein geringer Temperaturgradient zu erkennen. Dies verdeutlichte die guten Wärmetransporteigenschaften der Platten aus Compoundmaterial.

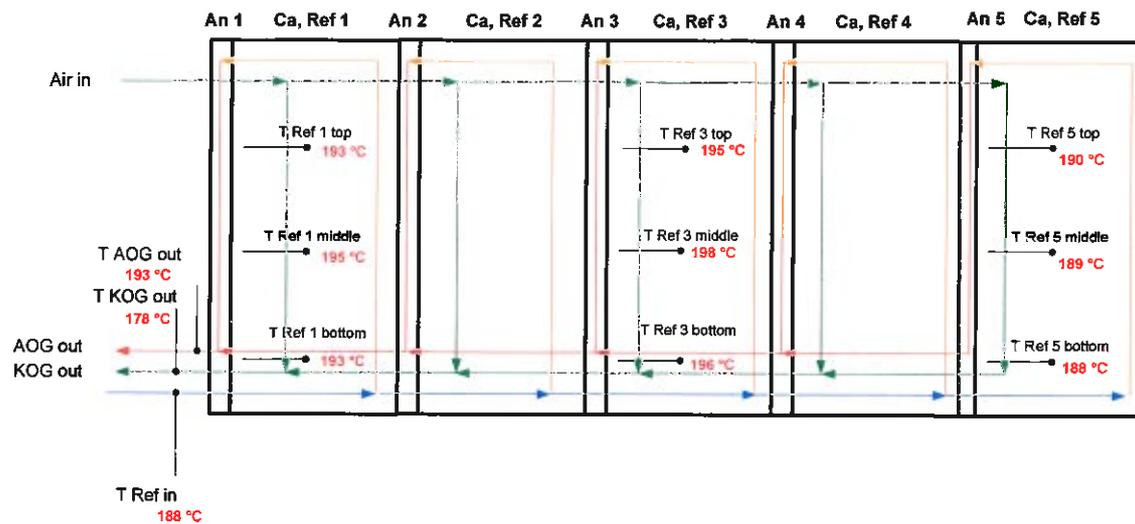


Abb. 20: Temperaturverteilung und Flowrichtung Shortstack

2.3.3. Plattenverdampfer

Die Auslegung von Verdampfern zur Verdampfung und Überhitzung eines Zweistoffgemischs ist Gegenstand zahlreicher grundlagenorientierter Forschungsvorhaben. Die komplexen Vorgänge in Strömungen mit Phasenwechsel in Mikro- bzw. Minikanälen sind bis heute im Vergleich zu einphasigen Strömungen weit weniger verstanden. Daher stehen für einen solchen Verdampfungsvorgang bislang keine ausreichenden Simulationswerkzeuge zur Verfügung, die eine geeignete Auslegung unter der Berücksichtigung des jeweiligen Anforderungsprofils erlauben [2].

Nachdem die ursprüngliche Variante einer Verdampfer- und Überhitzerstruktur in einer separaten Platte je Zellmodul sich als nicht praxistauglich erwiesen hatte, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein empirischer Ansatz gewählt, bei dem eine Reihe von unterschiedlichen Verdampferversionen experimentell auf ihre Eignung für den Einsatz in einer IRMFC untersucht werden sollten. Untersucht wurden Verdampferkonzepte mit gefrästen Mini- bzw. Mikrokanälen, mit Metallschäumen und mit Drahtgeflechten.

Vorgabe war, dass die mini- bzw. mikrostrukturierten Verdampfer in Plattenform an die Geometrie des IRMFC-Stacks angepasst werden mussten. Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein weiterer Teststand aufgebaut und in Betrieb genommen. Es wurden mehrere Varianten von Plattenverdampfern konstruiert und gefertigt. Abb. 21 und Abb. 22 und zeigen beispielhaft die Verdampferplatte und den Zusammenbau der Verdampferversion, mit dem besten Betriebsverhalten. Dieser Plattenverdampfer verfügt über einen sehr einfachen Aufbau, bei dem die Aluminiumplatte auf der Rückseite eine Eintrittsöffnung aufweist, durch die das flüssige Methanol/Wassergemisch in den unten gelegenen Verteilkanal gelangt. Von hier aus wird das Gemisch auf vier Kanäle aufgeteilt und entlang des Weges verdampft und überhitzt. Im oberen Bereich befindet sich der Dampfraum. Über eine Bohrung in der oberen Ecke der Platte kann das verdampfte und überhitzte Gemisch den Verdampfer verlassen.

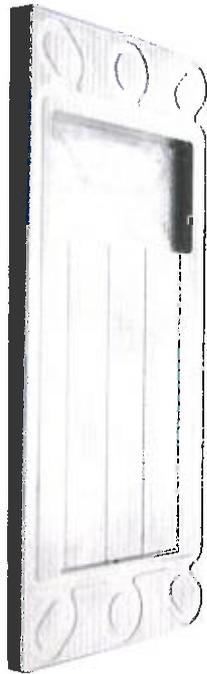


Abb. 21: Verdampferplatte mit Minikanälen

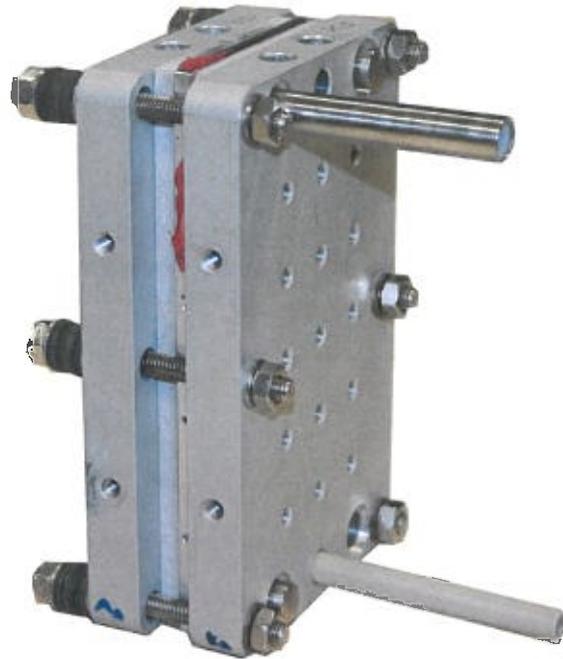


Abb. 22: Plattenverdampfer Zusammenbau

Abb. 23 zeigt exemplarisch die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit dieser Struktur. Durch Variation der Massenströme wurde ermittelt, welche Anzahl von Zellen mit dem verdampften Methanol/Wassergemisch versorgt werden könnte.

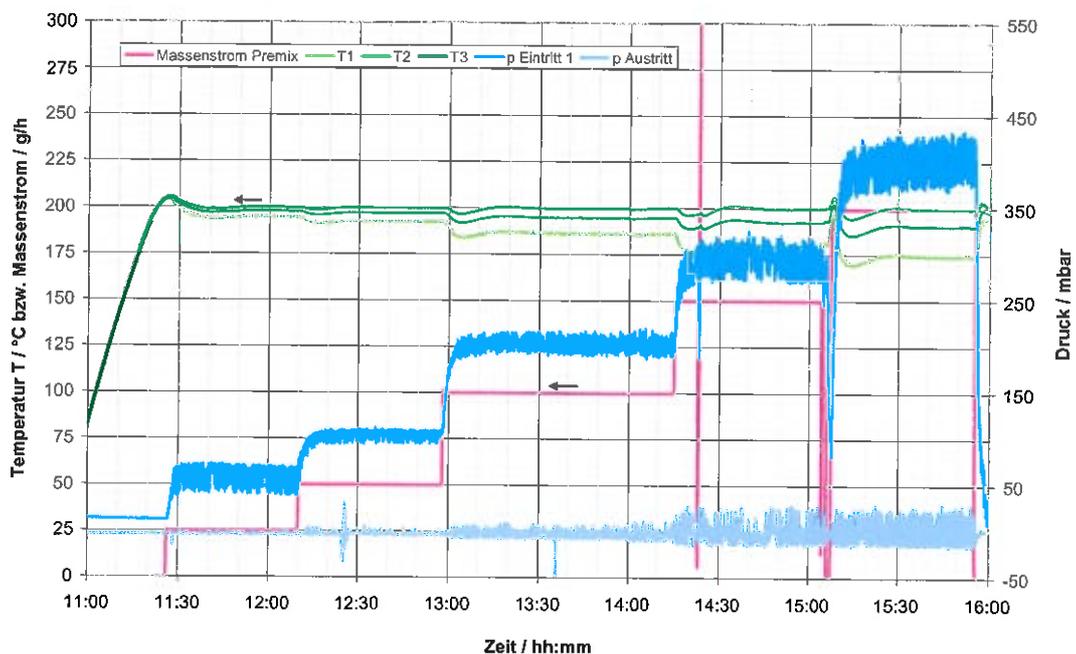


Abb. 23: Druckverlauf Plattenverdampfer

Die Austrittstemperatur (T3) wurde auf 200 °C geregelt. Der Massenstrom des Methanol/Wassergemischs (Premix) wurde schrittweise von 25 g h⁻¹ auf 200 g h⁻¹ (Nennlastpunkt für den 20-Zell-Stack) erhöht. Es ist zu erkennen, dass sich der Eintrittsdruck mit steigendem Massenstrom von etwa 50 mbar auf etwa 400 mbar im Mittel erhöhte. Die Schwankungen

des Eintrittsdrucks betrug im Nennlastpunkt etwa 50 mbar. Das Minimum lag bei einem Premixmassenstrom von 50 g h^{-1} . Der für den Stack maßgebliche Austrittsdruck stieg über den Versuchszeitraum von ca. 0 mbar auf etwa 5 mbar an. Die wichtigste Erkenntnis für diese Verdampferstruktur war, dass der Druckverlauf insgesamt stabil blieb und es weder starke Einbrüche noch extreme Druckspitzen gab. Daher wurde eine solche Struktur für die weiteren Untersuchungen und die Kopplung mit dem 20-Zell-Stack ausgewählt. Für den Stackaufbau bedeutete dies eine konzeptionelle Änderung am Aufbau, da ein einziger plattenförmiger Verdampfer für die Versorgung des gesamten Stacks ausreichen würde. Der ursprünglich gedachte Aufbau mit einem Verdampfer je Reformier/Brennstoffzellenmodul musste somit überarbeitet werden.

2.4. Stack (AP4)

Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen am Shortstack und den Plattenverdampfern bildeten die Grundlage für Konstruktion, Fertigung und Assemblierung eines IRMFC-Stacks mit 20 Zellen. Die Fertigung der Einzelteile und die Assemblierung des Stacks wurden in der Brennstoffzellenmontage des ZBT durchgeführt. Gegenüber dem Shortstack wurde das Konzept um demontierbare Kühlfinnen erweitert, um eine Eingriffsmöglichkeit in die Temperaturverteilung des Stacks zu haben. Die Kühlfinnen wurden seitlich an einer Seite des Stacks positioniert (siehe Abb. 24) und über eine Halterung an die dickeren Kathoden/Reformierplatten angepresst. Das Bild verdeutlicht, dass bei der Konstruktion der sichere Betrieb im Vordergrund stand und noch kein Wert auf eine Gewichtsoptimierung gelegt wurde.

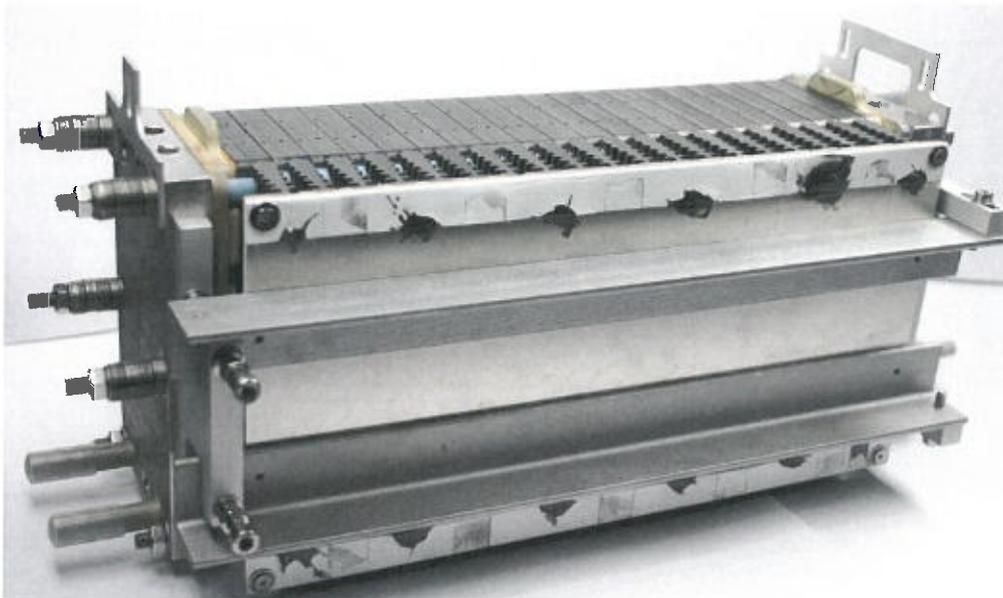


Abb. 24: 20-Zell-IRMFC-Stack mit Kühlfinnen

2.4.1. Inbetriebnahme und H₂-Betrieb

Die Inbetriebnahme des Stacks erfolgte zunächst mit reinem Wasserstoff. Bis zu einer Temperatur von ca. 120 °C wurde der Stack elektrisch vorgeheizt. Anschließend wurde er mit Wasserstoff und Luft beaufschlagt, um die exotherme Brennstoffzellenreaktion zur weiteren Temperaturerhöhung zu nutzen. Die ersten Versuchsreihen wurden bei Temperaturen um 160 °C durchgeführt. Sie dienten dazu, den Stack auf seine Funktionsfähigkeit hin zu überprüfen und das Betriebsverhalten zu ermitteln. Gleichzeitig konnten die MEAs in einem Temperaturbereich, der ihren Spezifikationen entspricht, eingefahren werden. Darüber hinaus

konnten erste Parameter zur Steuerung der elektrischen Beheizung und des Lüfters zur Kühlung ermittelt und der Aufheizvorgang optimiert werden.

Nach Abschluss der Inbetriebnahme wurde die Stacktemperatur schrittweise gesteigert und die jeweilige Leistungsfähigkeit durch Aufnahme von UI-Kennlinien ermittelt. Die folgende Abb. 25 zeigt, dass sich die Stackleistung mit steigender Stacktemperatur erwartungsgemäß erhöhte. Bei der maximalen Stromdichte von 440 mA/cm^2 , was einem Strom von 22 A entspricht, betrug die elektrische Gesamtleistung des Stacks zwischen 238 und 248 W.

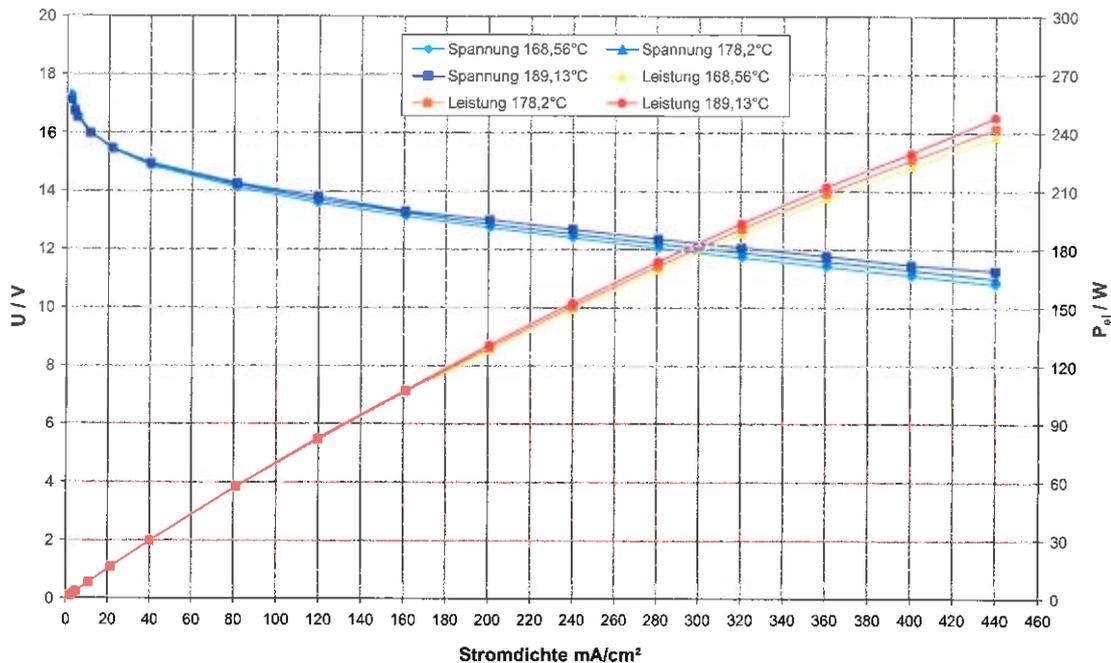


Abb. 25: Stackspannung und -leistung bei unterschiedlichen mittleren Stacktemperaturen ($\lambda_{\text{H}_2} = 1,35$; $\lambda_{\text{Luft}} = 2,5$)

2.4.2. IRMFC-Betrieb

Im Anschluss an die Inbetriebnahme des Stacks und die Untersuchungen im H_2 -Betrieb, wurde der Stack mit dem zuvor entwickelten externen Plattenverdampfer gekoppelt und das Betriebsverhalten mit interner Methanolreformierung (IRMFC-Betrieb) untersucht. Abb. 26 zeigt den entsprechenden Teststandsaufbau. Aus dem Tank wurde das vorgemischte Methanol/Wasser-Gemisch über einen Liqui-Flow dosiert und dem Verdampfer zugeführt. In diesem wurde das Premix verdampft und auf eine Temperatur von etwa $200 \text{ }^\circ\text{C}$ überhitzt. Vom Austritt des Verdampfers gelangte das überhitzte Gemisch in den IRMFC-Stack. Dort wurde es über einen Sammelkanal auf die 20 Reformierplatten verteilt.

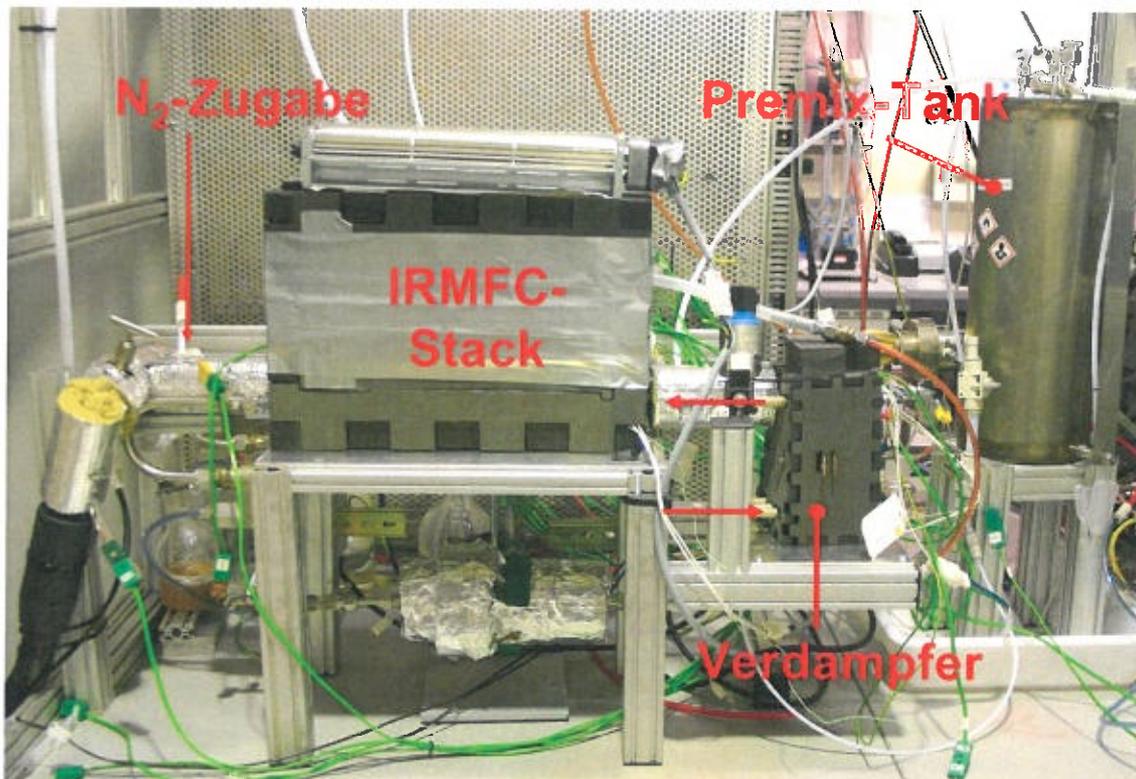


Abb. 26: Teststands Aufbau 20-Zell-IRMFC mit externem Verdampfer

Zur Aufheizung des Stacks dienten elektrisch beheizte Endplatten an der Stackeintritts- und Austrittsseite und eine Heizmatte unterhalb des Stacks. Um eine Analyse des Anodenrestgases auf Restmethanol zu ermöglichen und eine Bestimmung des Methanolumsatzes gewährleisten zu können, wurde das Anodengas nach Austritt aus dem Stack mit einem definierten Stickstoffstrom verdünnt.

Ein typischer Startupvorgang mit Umschaltung von H_2 - auf IRMFC-Betrieb ist in Abb. 27 anhand der Temperaturverteilung im Stack dargestellt. Zunächst wurde der Stack, unter Zufuhr von Stickstoff, bis zu einer Temperatur ca. 120 °C vorgeheizt, anschließend wurden Wasserstoff und Luft auf den Stack gegeben und über eine elektronische Last Strom gezogen, um die bei der Stromerzeugung entstehende Wärme für eine schnellere Aufheizung auf die Zieltemperatur von 200 °C zu nutzen. Über einen in die Isolierung aus Polyamidschaum integrierten Lüfter an der Stackoberseite konnte gewährleistet werden, dass eine Maximaltemperatur von 200 °C nicht überschritten wurde. Nach einer Phase der Stabilisierung und Kontrolle, ob der Stack ordnungsgemäß funktionierte, wurde schließlich in den IRMFC-Betrieb mit interner Methanolreformierung umgeschaltet. Die Dauer des Startups von Raumtemperatur auf IRMFC-Betrieb bei 200 °C betrug ca. 3 h. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens standen die Machbarkeit und ein stabiler Betrieb im Vordergrund.

Durch konstruktive Maßnahmen, insbesondere Verringerung des Gewichts und Verbesserung der Stackisolierung, und durch eine Optimierung der Beheizung und des Regelverhaltens, sind hier zukünftig deutlich schnellere Startup-Zeiten zu erwarten.

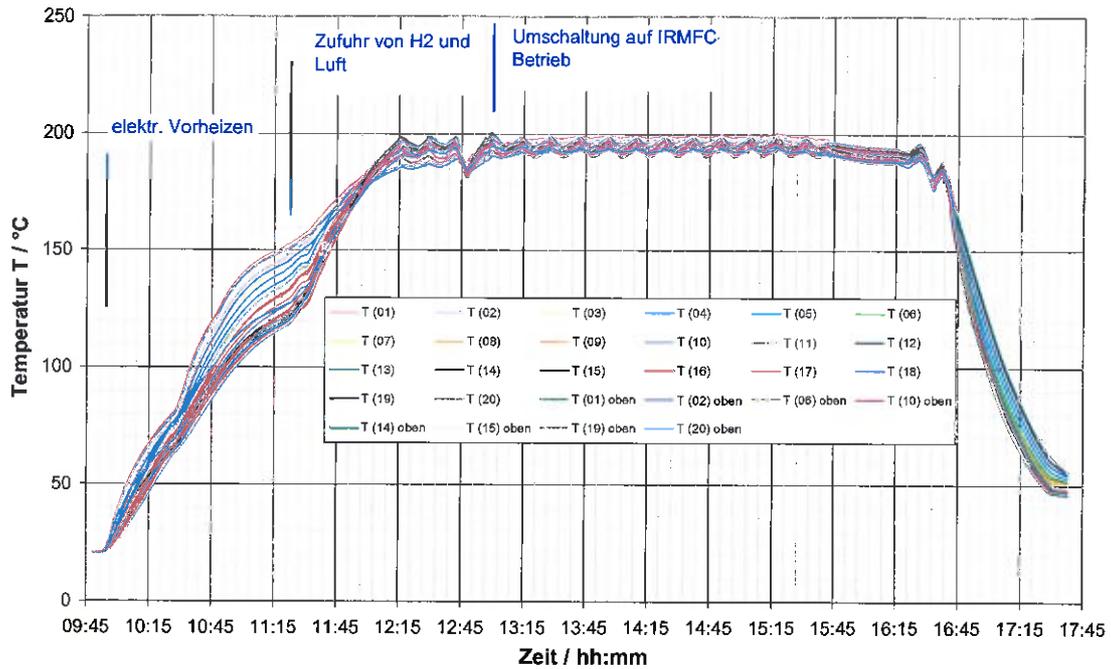


Abb. 27: Aufheizvorgang und Temperaturverteilung 20-Zell-IRMFC

Das folgende Diagramm (Abb. 28) zeigt den Druck- und Temperaturverlauf der Medien während des Aufheizens und der Umschaltung auf den IRMFC-Betrieb.

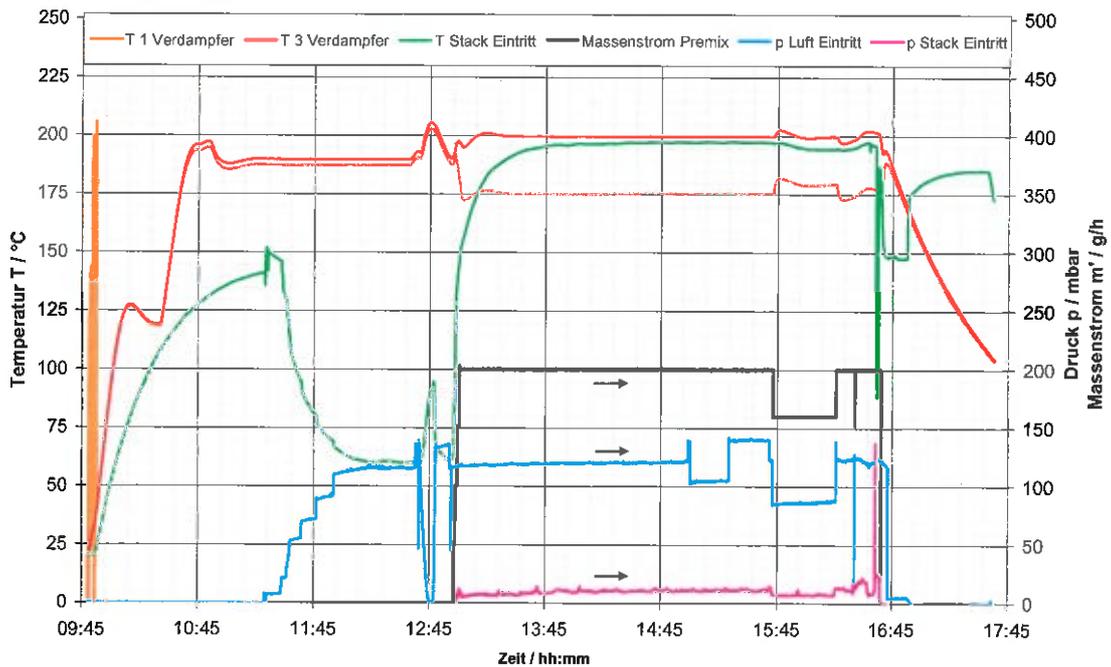


Abb. 28: Druck- und Temperaturverlauf

Der Druck am Austritt des externen Plattenverdampfers und somit am Stackeintritt betrug im IRMFC-Betrieb etwa 10 mbar im Standardbetriebspunkt bei 200 g h⁻¹ Premix. Ein stabiler Betrieb des Stacks mit integrierter Reformierung war somit möglich. Die Temperatur des Gemisches am Stackeintritt betrug ca. 197 °C.

Als elektrische Leistung konnte im IRMFC-Betrieb beim Standardbetriebspunkt mit 200 g h⁻¹ Methanolpremix eine elektrische Leistung P_{el} von ca. 233 W (20 A, 11,65 W) erzielt werden.

Aus Abb. 29 ist zu erkennen, dass die Einzelspannungen im Wesentlichen im Bereich zwischen 570 und 605 mV lagen. Die Einzelspannung der letzten Zelle (U20) lag wie bereits in vorherigen Versuchen deutlich darunter im Bereich um 525 mV. Die Ursachen für die Minderleistung dieser Zelle konnten während des Testzeitraums nicht ermittelt werden. Bei einer Reduzierung des Stroms auf 16 A verringerte sich die elektrische Leistung auf 195 W.

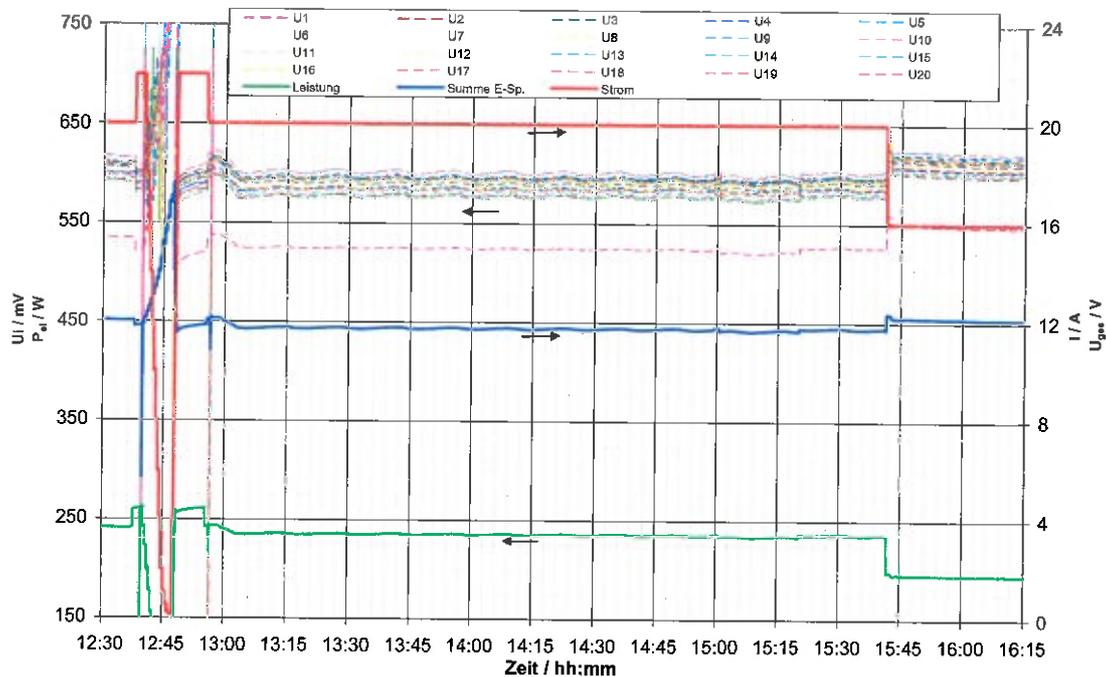


Abb. 29: Einzelspannungen und Leistung im IRMFC-Betrieb

Ein Vergleich der Leistungsfähigkeit im H_2 - und Methanolbetrieb ist in Abb. 30 dargestellt. Hierbei muss erwähnt werden, dass die Polarisationskurven im Wasserstoffbetrieb bei konstanter Stöchiometrie aufgenommen wurden, während die Polarisationskurven im Methanolbetrieb mit konstanten Massen- bzw. Volumenströmen aufgezeichnet wurden. Dies führte im Bereich unterhalb des Nennbetriebspunktes bei 400 mA/cm^2 dazu, dass im Methanolbetrieb die Spannungen tendenziell höher ausfielen als dies bei konstanter Stöchiometrie und somit Verringerung der Massen- bzw. Volumenströme der Fall gewesen wäre. Dennoch kann geschlussfolgert werden, dass die Stackperformance in beiden Betriebsmodi nur geringe Abweichungen zeigte. So beträgt der Leistungsunterschied bei 400 mA/cm^2 gerade einmal $8,3 \text{ W}$ und somit weniger als 4% .

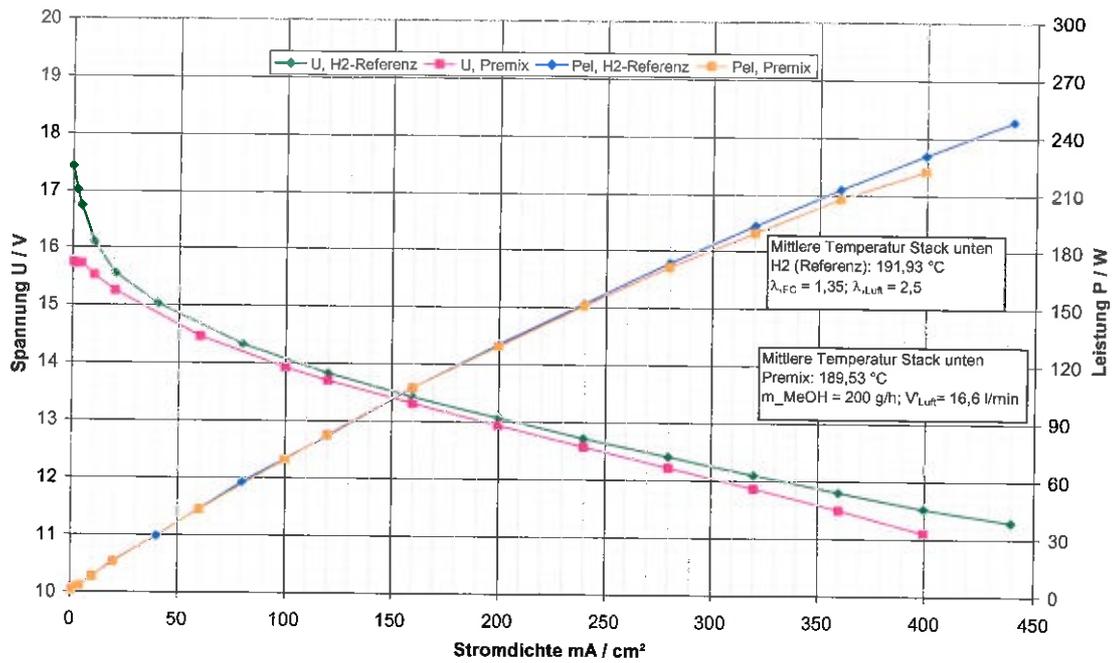


Abb. 30: Vergleich H₂- und Methanolbetrieb

Die gemessene Zusammensetzung des mit N₂ verdünnten AOG sowie der Methanolumsatz im Reformier sind in Abb. 31 dargestellt.

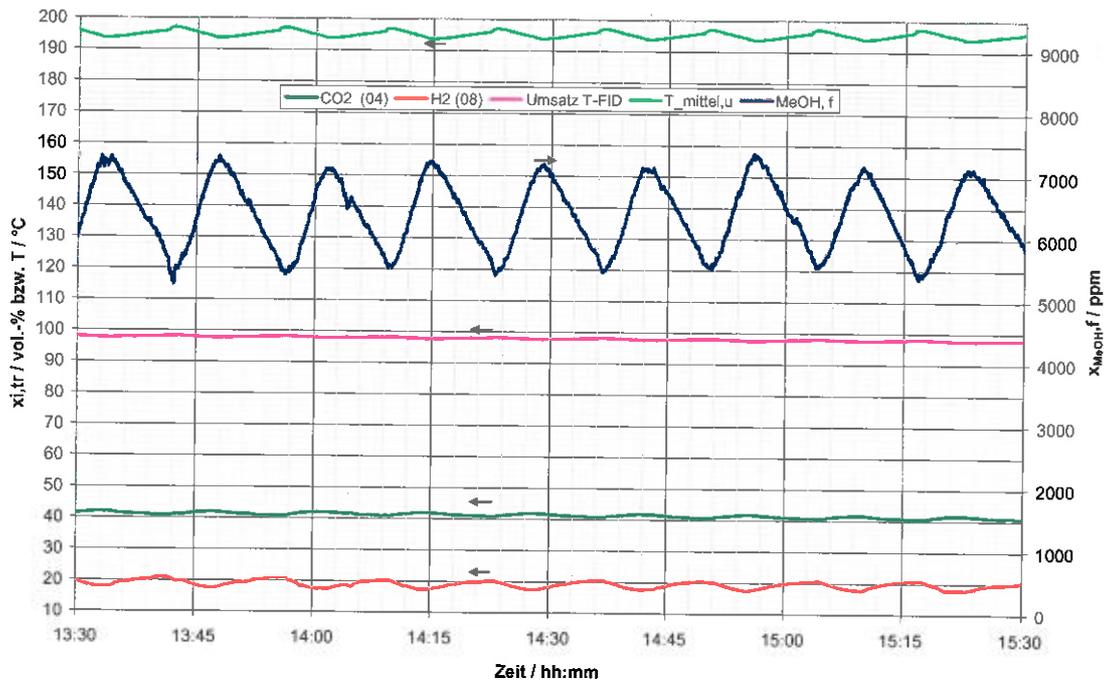


Abb. 31: Methanolumsatz und Konzentrationen des verdünnten AOG

Gut zu erkennen ist die Sensibilität der Reformierungsreaktion hinsichtlich Temperaturschwankungen. Schon geringe Veränderungen der mittleren Stacktemperatur um etwa 4 K führen zu einer Veränderung der Restmethanolkonzentration um 1500 ppm. Auch bei den H₂- und CO₂-Konzentrationen kann dieser Effekt beobachtet werden, wobei Wasserstoff gegenüber den anderen beiden Komponenten ein gegenläufiges Verhalten zeigt und mit steigender Temperatur zunimmt. Dieser Effekt bestätigt noch einmal die bereits zu Beginn des

Forschungsvorhabens gemachte Beobachtung, dass die eingesetzten Reformierungskatalysatoren im unteren Temperaturbereich hinsichtlich ihrer Aktivität eine sehr starke Temperaturabhängigkeit aufweisen (vgl. Abb. 3).

2.5. Entwicklung eines AOG-Brenners (AP5)

In AP 5 wurde ein Brenner ausgelegt, konstruiert und gefertigt, um das anfallende AOG der HT-PEMFC vollständig zu oxidieren. Darüber hinaus sollte er die Möglichkeit bieten, mit flüssigem Methanol und/oder Methanol/Wassergemisch gestartet werden zu können, um ggf. Wärme in einer zukünftigen Weiterentwicklung zum Startup des IRMFC-Systems bereitzustellen.



Abb. 32: Katalytischer AOG-Brenner

Hierzu verfügt der entwickelte katalytische AOG-Brenner (siehe Abb. 32) im Eintrittsbereich über eine Heizmanschette zur elektrischen Beheizung von außen. Das flüssige Edukt wird im Inneren des Rohres in einer metallischen Wabenstruktur mit Luft vermischt und verdampft. Am Austritt der Struktur erfolgt die Zufuhr des Anodenoffgases. Anschließend wird das Brenngas/Luft-Gemisch zur Verbrennung über eine katalytisch beschichtete keramische Wabenstruktur geleitet. Nach Fertigung des Brenners in der mechanischen Werkstatt des ZBT wurde der Brenner auf einem hierfür angepassten Teststand auf seine Funktionsfähigkeit getestet.

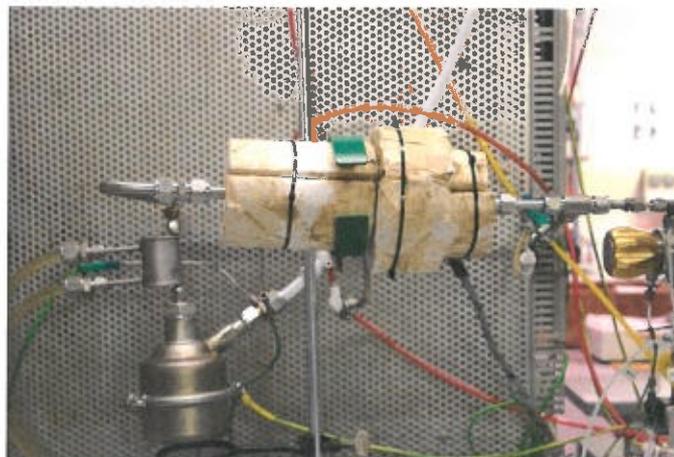


Abb. 33: Versuchsaufbau AOG-Brenner

Im Rahmen von kurzen Testreihen wurde der Funktionsnachweis für den AOG-Brenner erbracht. Der Brenner wurde zum Startup mit flüssigem Methanol betrieben, wobei die elektrische Beheizung nur zu Beginn benötigt wurde. Nach Zündung des Methanol/Luft-Gemisches reichte die entstehende Wärme zur Verdampfung des Methanols im Brenneintritt und somit zum stabilen Betrieb aus. Darüber hinaus wurde auch die Funktionsfähigkeit des Brenners mit synthetischem Anodenoffgas untersucht. Nach Abschluss der Inbetriebnahme und den experimentellen Untersuchungen des Stacks in Kombination mit dem externen Verdampfer (siehe Kap. 2.4) folgte im nächsten Schritt die Kopplung des Stacks mit dem AOG-Brenner. Während der anschließenden Inbetriebnahme des gekoppelten Systems wurden erneut kurze Testreihen zum Funktionsnachweis mit realem Reformat und zur Betriebsoptimierung durchgeführt. Hierbei war insbesondere darauf zu achten, dass einerseits die Brenner Temperatur in keiner Phase (Startup, stationärer Betrieb, Shutdown) über 850 °C anstieg, um die katalytische Brennerwabe nicht zu schädigen, und andererseits die Temperatur noch hoch genug war, um einen vollständigen Umsatz der brennbaren Bestandteile zu gewährleisten. Dies wurde über eine Anpassung des Volumenstroms der Brennerluft gewährleistet.

2.6. Funktionsmuster (AP6)

Nach der erfolgreichen Kopplung von Stack und Anodenoffgasbrenner wurde im letzten Schritt die thermische Integration des entwickelten Verdampfers angestrebt, um den Funktionsmustersaufbau abzuschließen. Dazu wurde der externe Plattenverdampfer, der seitlich neben dem Stack angeordnet war und über eine eigene elektrische Beheizung verfügte, durch einen Plattenverdampfer in Langform ersetzt. Dieser wurde unterhalb des Stacks angebracht und über eine Wärmeleitfolie mit dem Stack verbunden (siehe Abb. 34). Die elektrische Heizmatte, die sich zuvor unterhalb des Stacks zur Aufheizung befand, wurde nun unterhalb des Verdampfers positioniert.

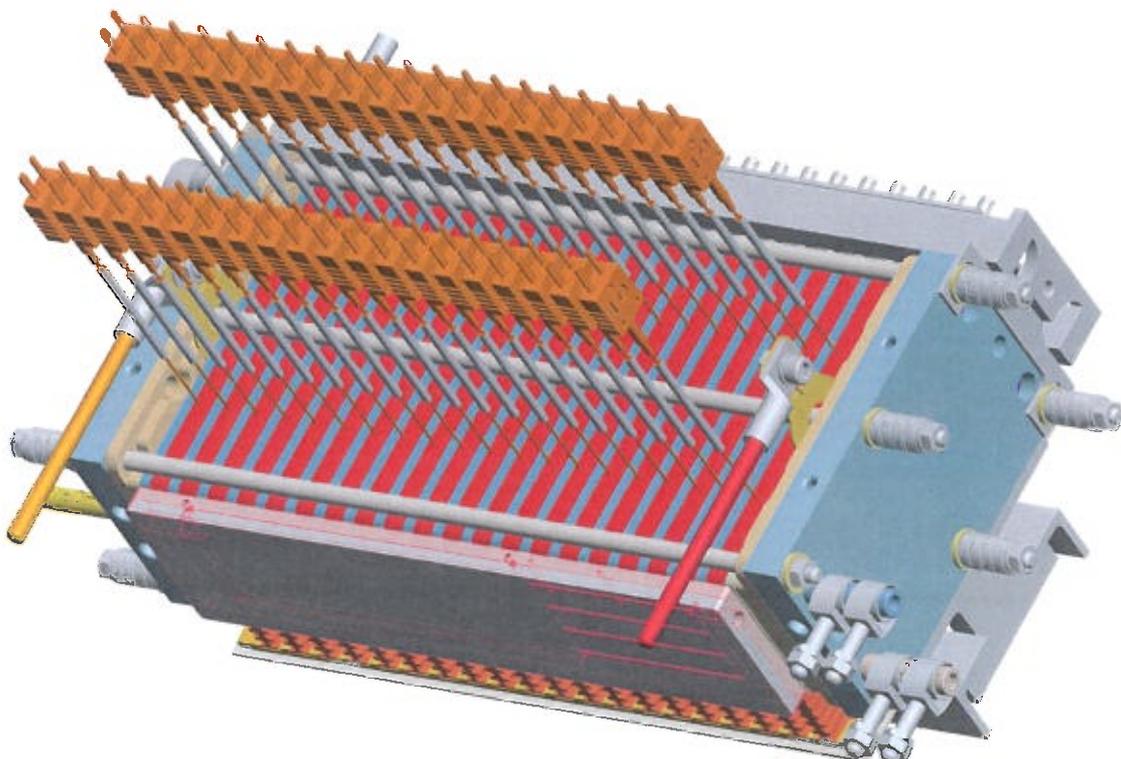
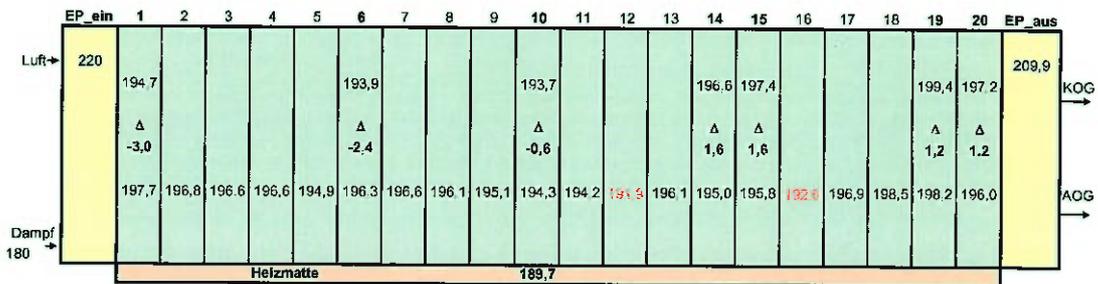


Abb. 34: 3D-CAD-Modell 20-Zell-IRMFC mit thermisch integriertem Verdampfer

Wie in der unteren Darstellung auf Abb. 35 zu erkennen, erfolgte die Zufuhr des kalten Methanol/Wassergemisches in den Langformverdampfer auf der Seite, wo Anoden- und Kathodenoffgas den Stack verließen. Auf der gegenüberliegenden Seite trat das überhitzte Gemisch aus und wurde über eine Schlauchverbindung dem Stack zugeführt. Dort wurde das Gemisch über einen Verteilkanal auf die einzelnen Reformierplatten verteilt. Aus Abb. 35 geht deutlich der Unterschied in der Temperaturverteilung zwischen externem (obere Darstellung) und thermisch integriertem Langformverdampfer (untere Darstellung) hervor. Im Betrieb mit dem Langformverdampfer konnte auf eine zusätzliche Luftkühlung verzichtet werden. Außerdem ist zu erkennen, dass sich sowohl zwischen der Stackeintritts- und Austrittsseite als auch innerhalb der einzelnen Platten deutlich größere Temperaturgradienten einstellten (Hinweis: Nach Abschluss der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Thermolemente 12 und 16 aus ihren Führungsbohrungen herausgerutscht waren. Daher werden sie in diese Betrachtungen nicht miteinbezogen). Insbesondere auf der Seite, wo das flüssige Gemisch in den Verdampfer eintrat, wurde eine erhebliche Wärmemenge über den Stack in den Verdampfer geleitet. Die Temperaturen liegen hier bis zu 13 K niedriger als mit externem Verdampfer, und das obwohl die Temperatur der elektrisch beheizten Endplatte um 40 K höher lag. Auf der Eintrittsseite des Verdampfers wurde die Temperatur in der Aluminiumplatte gemessen. Die beiden anderen Messstellen des Verdampfers zeigen die Temperatur im Dampfraum.

I. T-Verteilung IRMFC-Betrieb 20 ZM externer Verdampfer

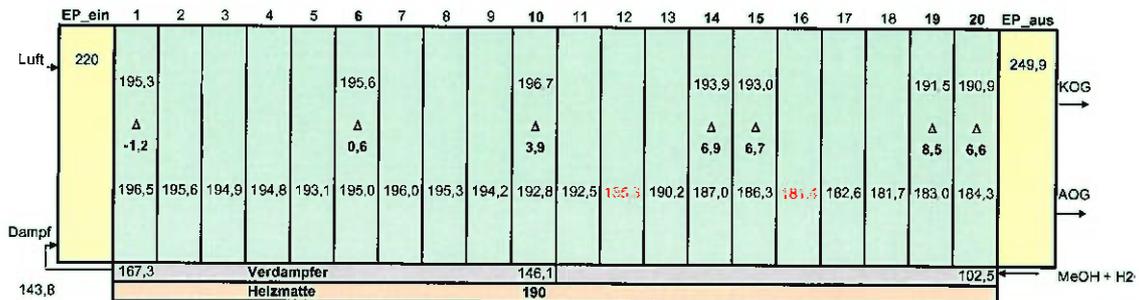
200 g/h Premix S/C = 1,5; I=20A
 Lüfter in Betrieb, Entlüftungsschlitze der Isolierung offen



T12 u. T16 vermutlich falsch positioniert

II. T-Verteilung IRMFC-Betrieb 20 ZM thermisch integrierter Verdampfer

200 g/h Premix S/C = 1,5; I=20A
 Lüfter nicht in Betrieb, Entlüftungsschlitze der Isolierung geschlossen



T12 u. T16 vermutlich falsch positioniert

Abb. 35: Temperaturverteilung in °C im Stack ohne und mit thermisch integriertem Verdampfer

Die Temperatur- und Druckverteilung im IRMFC-Betrieb mit thermisch integriertem Verdampfer ist in Abb. 36 dargestellt. Das überhitzte Methanol/Wassergemisch trat mit einer Temperatur zwischen 140 und 150 °C in den Stack ein, wobei der Langformverdampfer Druckschwankungen unterhalb von 10 mbar verursachte. Hierdurch wurde ein stabiler Betrieb des Stacks ermöglicht, so dass insgesamt von einer erfolgreichen Verdampferentwicklung gesprochen werden kann.

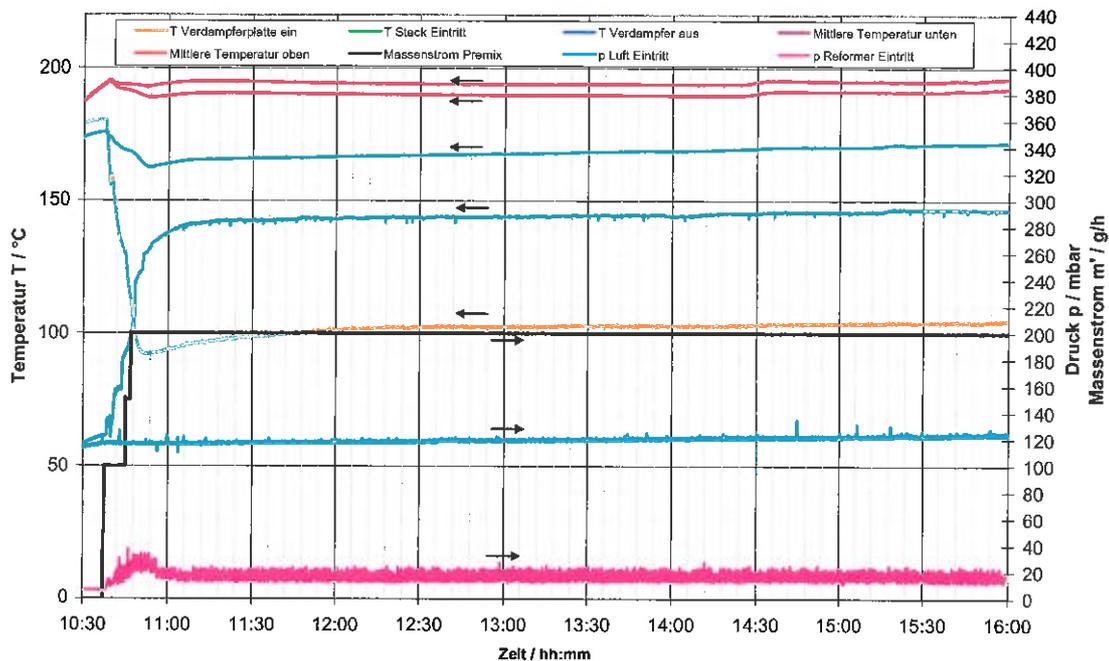


Abb. 36: Druck- und Temperaturverteilung im IRMFC-Betrieb mit Langformverdampfer

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des thermisch integrierten Verdampfers folgte eine Phase der Betriebsoptimierung. Die folgende Abb. 37 stellt die Startupphase mit anschließender Umschaltung auf den stationären IRMFC-Betrieb in Bezug auf den angeschlossenen Brenner dar. Nach Vorheizen des Stacks mit Stickstoff erfolgte die weitere Aufheizung, wie bereits geschildert, unterstützt durch die Zufuhr von Wasserstoff auf den Stack. Der nun im Anodenrestgas vorhandene Wasserstoff sorgte für die Zündung des AOG-Brenners, was durch den steilen Anstieg der Temperaturen im katalytischen Brenner verdeutlicht wurde. Mit Erreichen der Zieltemperatur im Stack von etwa 200 °C wurde schrittweise innerhalb von 8 Minuten auf den Betrieb mit Methanolpremix umgeschaltet. Während der gesamten Versuchszeit konnten im Rauchgas praktisch keine Konzentrationen von Restmethanol oder Kohlenmonoxid nachgewiesen werden, so dass die Funktionsfähigkeit des AOG-Brenners im realen Betrieb bestätigt werden konnte.

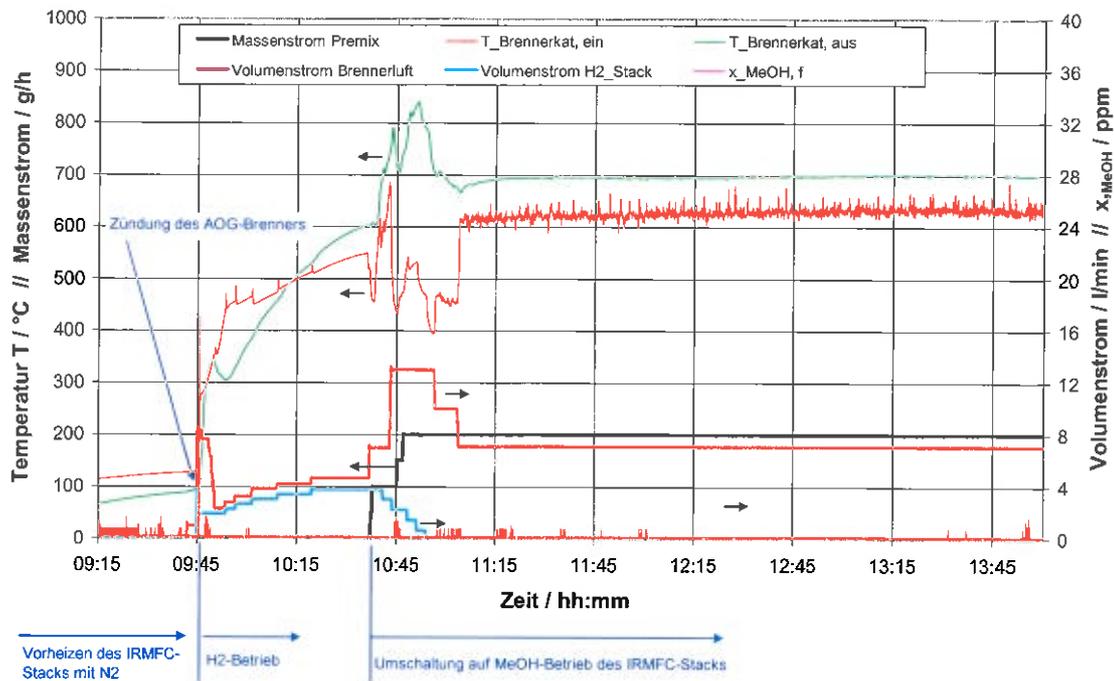


Abb. 37: Betriebsverhalten AOG-Brenner

Als letzte Versuchsreihe wurde eine Variation des Brennstoffzellenumsatzgrades (FU) durchgeführt, um den elektrischen Wirkungsgrad zu maximieren. Im Zuge dessen konnte die Stromdichte auf 460 mA/cm^2 gesteigert werden. Dies war gleichbedeutend mit einem Umsatzgrad von $88,4 \%$ bezogen auf den im Reformat vorhandenen Wasserstoff. Tab. 2.1 vergleicht die Betriebsdaten des Standardbetriebspunktes mit dem bei maximiertem FU.

Tab. 2.1: Betriebsdaten FU-Maximierung im Methanolbetrieb

	Standard	Max.
Massenstrom Premix: m_{Premix}	200 g/h	200 g/h
Therm. Methanolleistung: $P_{\text{Meoh, th}}$	592,5 W	592,5 W
Methanolumsatz: X_{MeOH}	96 %	96 %
Stromdichte: J	400 mA/cm^2	460 mA/cm^2
Strom: I	20 A	23 A
Spannung: U	11,4 V	11,0 V
elektr. Leistung: P_{el}	228 W	253 W
FU	76,9 %	88,4 %
$\eta_{\text{el, brutto}}$	38,5 %	42,7 %

Oberhalb der genannten Stromdichte kam es in diesem Betriebspunkt zu Einbrüchen bei der Zellspannung, was auf eine lokale Unterversorgung mit Wasserstoff hindeutete. Durch die Steigerung der elektrischen Leistung auf 253 W bei unveränderter Methanolzufuhr konnte der elektrische Wirkungsgrad auf 42,7 % erhöht werden. Die erfolgreiche Entwicklung einer IRMFC mit 20 Zellen sowie der Integration von Verdampfung und AOG-Brenner konnte hiermit aufgezeigt werden.

Jedoch konnte beim Betrieb des 20-Zell-Stacks trotz der geringen Betriebszeiten bereits eine Degradation der MEAs nachgewiesen werden. Nachdem der Stack zunächst bei Temperaturen zwischen 120 und 170 °C mit Wasserstoff für 12 h eingefahren worden war, wurden im Anschluss in unregelmäßigen Abständen zwischen den Versuchen mit Methanol Referenzmessungen mit Wasserstoff durchgeführt. Abb. 38 zeigt, dass sich die erzielte Stackleistung bei gleichen Betriebsbedingungen und vergleichbarer mittlerer Stacktemperatur stetig reduzierte von 242,8 auf 234,9 W. Die Betriebsdauer des Stacks mit einer Temperatur > 190 °C betrug dabei ca. 39 h, wovon etwa 26 h auf Methanolbetrieb entfielen. Dies verdeutlicht noch einmal den Entwicklungsbedarf für eine MEA mit verbesserter Langzeitstabilität für Betriebstemperaturen um 200 °C.

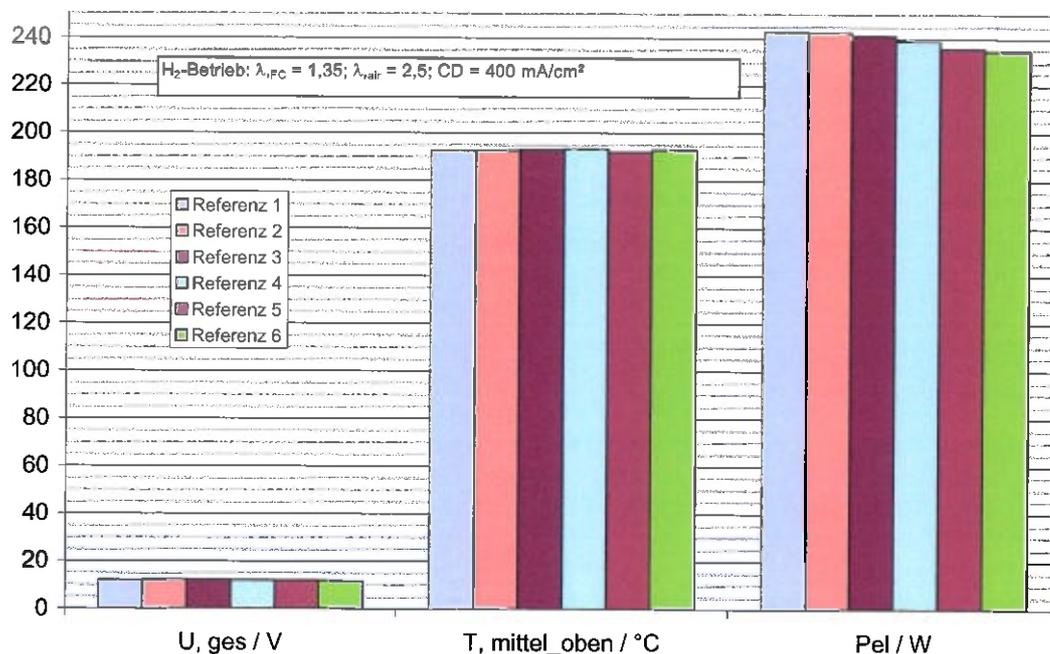


Abb. 38: Degradation des Stacks

3. Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

3.1. Wissenschaftlich-technischer Nutzen

Der wissenschaftlich-technische Nutzen des vorliegenden Forschungsvorhabens liegt im erbrachten Funktionsnachweis eines HT-PEM-Brennstoffzellenstacks mit integrierter Methanolreformierung.

Im Rahmen der Katalysatorqualifizierung konnte ein Katalysator identifiziert werden, der in einem Plattenreaktor aus Compoundmaterial bei Temperaturen um 200 °C Methanolumsätze

über 97 % erzielt. Bei den experimentellen Untersuchungen an den Membran-Elektroden-Einheiten konnte gezeigt werden, dass im Methanolbetrieb nur ein geringer Leistungsverlust zu verzeichnen ist. Gleichzeitig wurde aufgezeigt, dass im Bereich der Langzeitstabilität noch ein erheblicher Entwicklungsbedarf besteht. Der entwickelte Plattenverdampfer bietet die Möglichkeit ein Methanol/Wassergemisch pulsationsarm zu verdampfen und kann auch in anderen Anwendungen eingesetzt werden. Auch für den entwickelten AOG-Brenner, sind Einsatzfelder außerhalb der IRMFC-Technologie denkbar. Dieser ist zuverlässig in der Lage das anfallende AOG vollständig zu verbrennen und kann zudem auch mit flüssigem Methanol betrieben werden.

Die erzielten Forschungsergebnisse bilden die Basis für das beantragte Anschlussvorhaben. Eine Weiterentwicklung des Stacks, die Betriebsoptimierung und der Aufbau eines autarken Demonstrationssystems sind Gegenstand der geplanten Forschungsinhalte. Dabei wird eine neue Generation von MEAs mit einer verbesserten Langzeitstabilität bei gleichzeitig ausreichend hohen Stromdichten eingesetzt.

3.2. Wirtschaftlicher Nutzen

Mit den im Rahmen dieses Forschungsprojektes erzielten Ergebnissen und einer erfolgreichen Weiterentwicklung der IRMFC-Technologie im beantragten Anschlussvorhaben bestehen gute Erfolgsaussichten für die industrielle Verwertung der Forschungsergebnisse.

Das IRMFC-Konzept bietet mit sehr hohen Wirkungsgradpotential, vereinfachtem und hoch modularisiertem Aufbau und hohem Kostenreduktionspotential KMU zahlreiche Möglichkeiten, die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Für KMU gibt es diverse Möglichkeiten Forschungsergebnisse aus den Bereichen Brennstoffzelle, Reformierung, Verdampfung, Brennertechnik, IRMFC-Stack oder Systemintegration zu nutzen. Forschungsergebnisse für einzelne Komponenten, z.B. die Optimierung des Flowfields reformatbetriebener Brennstoffzellen oder die prozesstechnische Optimierung von integrierten Reformersystemen können in die Produktentwicklung von KMUs der Zulieferbranche einfließen. Hersteller von Brennstoffzellenstacks erhalten die Möglichkeit, die IRMFC-Stacktechnik in Produkte für unterschiedliche Leistungsklassen zu überführen und Unternehmen, die als Systemintegratoren auftreten, können Knowhow aus dem Systemaufbau und der Systemsteuerung für eigene Produktentwicklungen nutzen.

4. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Nachfolgend werden die im Bewilligungszeitraum (01.08.2011 – 31.07.2014) durchgeführten und die darüber hinaus geplanten Transfermaßnahmen aufgeführt.

4.1. Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

Rahmen/Veranstaltung	Methode/Ziel	Datum/ Zeitraum
1. Projekttreffen		
1. Projektbegleitender Ausschuss im ZBT	Vorstellung der Forschungsstelle, des Projektziels und der bisher erzielten Ergebnisse mit abschließender Diskussion	Mai 2012
2. Projektbegleitender Ausschuss im ZBT	Präsentation weiterer Ergebnisse und Planung des weiteren Vorgehens mit abschließender Diskussion	März 2013

3. Projektbegleitender Ausschuss im ZBT	Abschlusspräsentation und Diskussion aller der Ergebnisse.	Juli 2014
2. Seminare/Vortragsveranstaltungen/Workshop		
Posterpräsentation bei Workshop „AiF-Brennstoffzellenallianz (ZBT)“	Bekanntmachung der Forschungsaktivitäten, Vorstellung der Ergebnisse	2. Quartal 2012 2. Quartal 2013
Vortrag bei Workshop „AiF-Brennstoffzellenallianz (ZBT)“	Bekanntmachung der Forschungsaktivitäten, Vorstellung der Ergebnisse	7. Mai 2014
Vortrag auf Fachtagung „4th European PEFC & H2 Forum“	Bekanntmachung der Forschungsaktivitäten, Vorstellung der Ergebnisse	2.-5. Juli 2013
3. Sonstiges		
Gespräche mit interessierten Unternehmen außerhalb des PA	Informationen über die Forschungsergebnisse und den Nutzen für KMU	2012 - 2014
Hannover Messe Industrie	Kurzdarstellung der Aktivitäten und Ergebnisse zur Diskussion mit Unternehmen und interessiertem Publikum Ausstellung 1-Zell-Modul (2012), Ausstellung 5-Zell-Modul (2013)	2. Quartal 2012 2. Quartal 2013
Bau und Demonstration eines Funktionsmodells	Demonstrationszwecke, d.h. interessierte Unternehmen sind eingeladen, die Ergebnisse des Vorhabens in der Praxis zu evaluieren	2014
4. Akademische Ausbildung		
Bachelorarbeit	Thema: „Inbetriebnahme eines IRMFC-Systems“	2014

4.2. Geplante Transfermaßnahmen nach Projektabschluss

Rahmen/Veranstaltung	Methode/Ziel	Datum/ Zeitraum
1. Zeitschriften		
Publikation in Fach- oder Branchenzeitschrift, z.B.: - Chemie Ingenieur Technik - Journal of Power Sources	Bekanntmachung der Forschungsaktivitäten, Vorstellung der Ergebnisse	2015
2. Akademische Ausbildung		
Einbindung in die universitäre Lehre	Einbeziehung neuester Forschungsergebnisse in Lehrveranstaltungen	ab 2014
3. Berichte		
Abschlussbericht auf den Internetseiten der Forschungsvereinigung und der Forschungsstelle	Dokumentation der Forschungsaktivitäten und Zusammenfassung der Forschungsergebnisse	3. Quartal 2014
4. Sonstiges		
Gespräche mit interessierten Unternehmen außerhalb des PA	Informationen über die Forschungsergebnisse und den Nutzen für KMU	2015
Hannover Messe Industrie	Kurzdarstellung der Aktivitäten und Ergebnisse zur Diskussion mit Unternehmen und interessiertem Publikum Ausstellung: 20-Zell-Modul	2. Quartal 2015

5. Durchführende Forschungsstelle

Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH
Carl-Benz-Straße 201
47057 Duisburg
Leiterin der Forschungsstelle: Prof. Dr. A. Heinzel
Projektleiter: Dipl.-Ing. Michael Steffen

6. Danksagung und Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17115N der Forschungsvereinigung IUTA wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für diese Förderung sei gedankt.

Das Forschungsinstitut Zentrum für BrennstoffzellenTechnik GmbH dankt außerdem den Teilnehmern aus der Wirtschaft für die Diskussionsbereitschaft und aktive Teilnahme an den Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses sowie für die Unterstützung durch Sach- und Dienstleistungen.

7. Literaturverzeichnis

- [1] D. C. Seel, B. C. Benicewicz, L. Xiao, und T. J. Schmidt, „High-temperature polybenzimidazol-based membranes“, in *Handbook of fuel cells: fundamentals, technology, and applications. Volume 6*, W. Vielstich, H. Yokokawa, und H. A. Gasteiger, Hrsg. Chichester, West Sussex; Hoboken, N.J.: Wiley, 2009.
- [2] A. Freund, „Experimentelle Untersuchung und Auslegung von ministrukturierten Verdampfern unterschiedlicher Bauweise“, Logos, Berlin, 2010.