

## Abschlussbericht



### FUELCELL 4 LEISURE

Stromversorgung von Booten und Caravans im Freizeitbereich mit 250 Watt Brennstoffzellensystemen im Bodenseeraum

Förderkennzeichen: 03BS207C  
 Bewilligungszeitraum: 01.06.2009 – 30.06.2012  
 Berichtszeitraum: 01.06.2009 – 30.06.2012  
 Zuwendungsempfänger: ZBT GmbH  
 Zuwendungsgeber: Gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung

Gefördert durch:



Koordiniert durch:



Partner: enymotion GmbH  
 Dometic GmbH  
 ZBT GmbH

Projektleiter: M. Steffen  
 Bearbeiter: U. Gardemann  
 N. Kocks  
 W. Krutsch  
 P. Lenke  
 T. Optenhostert

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.  
 Duisburg, im Dezember 2012



Zentrum für BrennstoffzellenTechnik  
 ZBT GmbH  
 Carl-Benz-Straße 201  
 47057 Duisburg  
 Geschäftsführung:  
 Prof. Dr. rer. nat. A. Heinzel

Telefon: +49-203-7598 0  
 Telefax: +49-203-7598 2222  
 www.zbt-duisburg.de  
 info@zbt-duisburg.de

Handelsregister Duisburg HRB 9229  
 USt. Ident. Nr./ VAT No.  
 DE 219646965  
 Konto 20 900 91 25  
 BLZ 350 500 00  
 Sparkasse Duisburg

## Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung des Projektes 03BS207C .....	2
1.1	Aufgabenstellung .....	2
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	3
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	8
2	Eingehende Darstellung .....	10
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse .....	10
2.1.1	Qualifizierung CO-Feinreinigung (SelOx) .....	10
2.1.2	Qualifizierung Entschwefelung .....	12
2.1.3	Untersuchungen im Klimaschrank .....	21
2.1.4	Brennstoffzellenverspannung (Kraft-Weg-Messung) .....	30
2.1.5	Untersuchung der Gemischbildung .....	35
2.1.6	Untersuchung der Strömung im Gehäuse .....	39
2.1.7	Untersuchung der Strömung im Gasprozessor .....	41
2.2	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	45
2.3	Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	46
2.4	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	47



# 1 Kurze Darstellung des Projektes 03BS207C

## 1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes FUELCELL 4 LEISURE entwickelt enymotion mit seinen Kooperationspartnern Dometic und dem Zentrum für BrennstoffzellenTechnik (ZBT) einen mobilen Stromerzeuger auf Basis des weltweit verfügbaren Brennstoffs Flüssiggas. Durch Verwendung der Brennstoffzellentechnik besteht das Potential einer orts- und zeitunabhängigen sowie geräusch- und emissionsarmen Stromerzeugung. Das System wird für den Einsatz im Freizeitmarkt wie beispielsweise für Wohnmobile und Boote optimiert und besitzt eine Netto-Leistung von ca. 200 W bzw. 4800 Wh pro Tag.

Ausgangspunkt des Projektes ist ein Laborfunktionsmuster eines Systems bestehend aus einem Wasserstoffherzeuger und einer Brennstoffzelle. Die Überführung in ein funktionsfähiges Feldtestsystem und die Anpassung an den genannten Markt ist die Kernaufgabe des Projektes. Herausforderungen an das System wie eine möglichst geringe Größe und Lautstärke bedingen die Entwicklung integrierter Bauteile. Des Weiteren ist eine optimierte Wärmeintegration zu entwickeln. Neben der Qualifizierung der peripheren Bauteile, stehen die Neuentwicklung eines Energiemanagementsystems (EMS), einer Entschwefelungseinheit sowie einer sicherheitsgerichteten Gasregelungseinheit im Vordergrund. Um auch bei niedrigen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt ein funktionsfähiges System zu gewährleisten, ist die Entwicklung und Erprobung eines innovativen Wassermanagementsystems notwendig.

ZBT führt in dem Projekt theoretische und experimentelle Arbeiten zur Entwicklungsunterstützung im Bereich des Wasserstoffherzeugers (Gasprozessor), der Brennstoffzelle und der Peripheriekomponenten durch. Ein weiteres zentrales Arbeitspaket stellt für ZBT die Qualifikation von Entschwefelungsmaterialien und -patronen dar. Darüber hinaus begleitet ZBT die Feldtestphase durch die experimentelle Untersuchung von Feldtestgeräten sowie durch die Entwicklungsanpassung einzelner Komponenten. Schließlich werden durch Qualifikation verbesserter Komponenten die durchgeführten Optimierungen von ZBT evaluiert. Alle Arbeitsinhalte werden in enger Absprache mit den Projektpartnern zu Beginn der jeweiligen Bearbeitung festgelegt.



## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Zentrum für BrennstoffzellenTechnik arbeitet seit ca. 10 Jahren als Entwicklungsdienstleister in den Bereichen Wasserstofferzeugung und -speicherung, Brennstoffzellen- und Systemtechnik, Qualitätssicherung und Prüfwesen sowie der Fertigungstechnik. Mit aktuell ca. 100 Mitarbeitern mit vorwiegend wissenschaftlich technischem Hintergrund unterschiedlicher Fachrichtungen, die in insgesamt sieben Fachabteilungen organisiert sind, bietet das ZBT die passende Kompetenz für alle Fragestellungen rund um Brennstoffzellensysteme. Die moderne Laborausstattung des ZBT bietet auf über 2.400 m<sup>2</sup> Laborfläche vielfältige Möglichkeiten für zielgerichtete wissenschaftliche Untersuchungen, die bei der Entwicklung von Brennstoffzellensystemen unerlässlich sind. Im Speziellen standen für das Projekt Teststände zur Qualifizierung von Katalysatoren, Reformersystemen, Brennstoffzellen, Peripheriekomponenten, ein Analyselabor mit dem Schwerpunkt der Schwefelanalytik, Klimakammern zur Simulation von variierenden Umweltbedingungen, eine Kraft-Weg-Messapparatur und Werkzeuge zur Strömungssimulation zur Verfügung.

Zahlreiche Forschungsprojekte, die sowohl durch öffentliche Förderung als auch durch Industrieaufträge abgewickelt wurden, erweiterten und festigten das Know-how im Bereich der Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik. Ein Auszug der in der Durchführung befindlichen sowie der abgeschlossenen Projekte ist im Statusbericht 2010 [13] zusammengefasst.

ZBT pflegt seit der Unternehmensgründung von enymotion im Jahr 2008 eine intensive Kooperation und konnte durch eine Vielzahl von gemeinsamen Projekten die Entwicklung von mobilen Brennstoffzellensystemen wissenschaftlich-technisch mitgestalten. So war ZBT z.B. maßgeblich an der Erstellung des Laborfunktionsmusters beteiligt, dass der Ausgangspunkt dieses Vorhabens war.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In Bild 1 ist der Zeitplan gemäß Antragstellung dargestellt. Hieraus sind die einzelnen Arbeitspakete sowie die Arbeitsteilung der einzelnen Projektpartner zu entnehmen. Die Firma Dungs wurde als Unterauftragnehmer eingeplant.



Partner	Sub-Arbeitspaket	AP-Nr.	Arbeitspakettyp	Mannmonate			2009				2010				2011				Mann Monate
				Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4					
Dometic GmbH	Auswahl/Integration in die Feldtestobjekte	1	Erprobung			0,5	0,5											1	
	Marktpotentialuntersuchung	2	Marktanalysen	0,5	0,5	0,5												1,5	
	Simulation des Regelungsverhaltens des EMS	3	Entwicklung		1	0,5	0,5											2	
	Erstellen eines Energiemanagementsystems	4	Entwicklung	1	1	1	1											4	
	Integration und Feldtestbetreuung des Energiemanagementsystems	5	Erprobung				1	0,5	0,5	0,5								2,5	
EnyMotion GmbH	Anpassung BZ-System an die Anwendung	6	Entwicklung	2	2	1	1											6	
	Durchführung der Feldtests	7	Erprobung			1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5					10	
	Qualifikation Entschwefelung	8	Erprobung			1	1	1	1	1	1	1	1					6	
	Messdatenauswertung	9	Erprobung				0,5	0,5	0,5	0,5								5	
	Redesign aus Feldtesterfahrungen	10	Entwicklung										2	2	3	2		9	
	Prüfung des Betriebsverhaltens bei extremen Aussenbedingungen	11	Erprobung			0,5	0,5	0,5	0,5	1								3	
	KWK-Kopplung (Wärmeauskopplung)	12	Entwicklung								1	1	1	1				4	
	Projektleitung	13	Projektleitung	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	4,4	
Karl Dungs GmbH & Co. KG Urbach	Entwicklungsanpassung einer sicherheitsgerichteten Steuerung	14	Entwicklung	1	1	1	1											4	
	Gassteuerungsoptimierung	15	Entwicklung	1	1	1	1	1										5	
Zentrum für BZ-Technik ZBT gGmbH Duisburg (Institut)	Entwicklungsunterstützung System-Anpassung	16	Entwicklung	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5								1,5	1,5	10,5	
	Qualifikation Entschwefelung (übergeordnet)	17	Marktanalysen			0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75				6	
	Entwicklungsanpassung an Feldtestobjekte	18	Entwicklung							1	1	1	1					4	
	Qualifikation verbesserter Komponenten	19	Entwicklung									1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		7,5	

**Bild 1: Zeitplan, ursprüngliche Fassung aus Antrag**

Die ursprüngliche Planung umfasste für ZBT die im Folgenden aufgelisteten Inhalte der Arbeitspakete AP 16 – 19, die im Laufe des Projektes in Absprache mit allen Projektbeteiligten im Detail festgelegt wurden:

#### **Arbeitspaket 16: Entwicklungsunterstützung Systemanpassung**

- Qualifizierung CO-Feinreinigung
- Untersuchungen Peripheriekomponenten im Klimaschrank
- Brennstoffzellenverspannung (Kraft-Weg-Messung)

#### **Arbeitspaket 17: Qualifikation Entschwefelung**

- Materialauswahl
- Patronenvermessung

#### **Arbeitspaket 18: Entwicklungsanpassung an Feldtestobjekte**

- Untersuchungen Gesamtsystem im Klimaschrank

#### **Arbeitspaket 19: Qualifikation verbesserter Komponenten**

- Untersuchung der Gemischbildung
- Untersuchung der Strömung im Gehäuse
- Untersuchung der Strömung im Gasprozessor



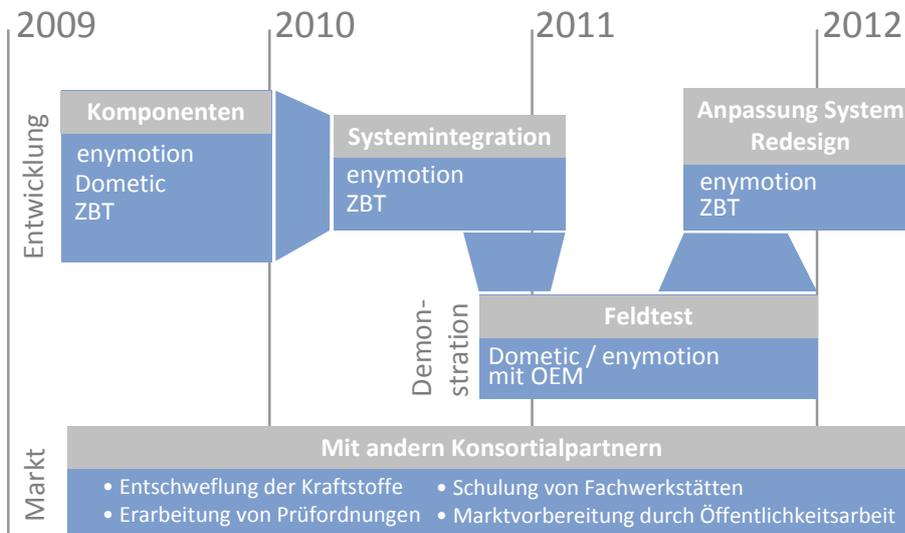
Aufgrund von Erkenntnissen, die in der ersten Projektphase erlangt wurden, erfolgte zum Quartal Q1 2010 ein Technologieschwenk im Bereich der Brennstoffzelle. Die ursprünglich vorgesehene Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle (NT-PEM) wurde durch eine Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzelle ersetzt. Für das ZBT ergaben sich hieraus keine wesentlichen Änderungen der Arbeitspakete.

Ende 2010 hat Dometic nach Absprache mit allen Beteiligten und nach Genehmigung durch den Zuwendungsgeber die Arbeiten im Projekt eingestellt. enymotion hat die verbleibenden Arbeitspakete AP 4 und AP 5 übernommen, wodurch eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes bis Ende des Quartals Q2 2012 erforderlich und genehmigt wurde. Für ZBT ergab sich daraus eine Verschiebung der Arbeitspakete AP 18 und AP 19, wie im aktualisierten Zeitplan in Bild 2 dargestellt, die Arbeitsinhalte änderten sich hierdurch nicht. Bild 3 zeigt den angepassten Verlauf des Projektes mit den wesentlichen Arbeitsfeldern.

Partner	Sub-Arbeitspaket	AP-Nr.	Mannmonate Arbeitspakettyp	2009			2010				2011				2012		Mann Monate
				Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	
Dometic GmbH Siegen	Auswahl/Integration in die Feldtestobjekte	1	Erprobung			0,5	0,5										1
	Marktpotentialuntersuchung	2	Marktanalysen	0,5	0,5	0,5											1,5
	Simulation des Regelungsverhaltens des EMS	3	Entwicklung		1	1	1										
	Erstellen eines Energiemanagementsystems	4	Entwicklung					0,5	0,5	0,5							
	Integration und Feldtestbetreuung des Energiemanagementsystems	5	Erprobung							1							1
Enymotion GmbH Heilbronn (KMU)	Erstellen eines Energiemanagementsystems	4	Entwicklung									0,2	0,3	0,5	0,6		5,3
	Integration und Feldtestbetreuung des Energiemanagementsystems	5	Erprobung									0,3	0,4	0,7	1		2,8
	Energiemanager erstellt und integriert	M2	AP 3; 4; 5													+	0
	Anpassung BZ-System an die Anwendung	6	Entwicklung	2	2	2	1										7
	Entwicklungsanpassung einer sicherheitsgerichteten Steuerung (durch Heatec)	14	Entwicklung														0
	Gassteuerungsoptimierung (durch Heatec)	15	Entwicklung														0
	Gasversorgungs- und Regelungssystem erstellt	M3	AP 14; 15													+	0
	Durchführung der Feldtests	7	Erprobung						1	1,5	1,5	1,5	1,5				9
	Qualifikation Entschwefelung	8	Erprobung		0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5				5,8
	Messdatenauswertung	9	Erprobung						0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5		4,7
	Fieldesign aus Feldtesterfahrungen	10	Entwicklung						0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5		2,8
	Prüfung des Betriebsverhaltens bei extremen Aussenbedingungen	11	Erprobung					1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,25	0,25		4,5
	KWK-Kopplung (Wärmeauskopplung)	12	Entwicklung							1	0,5	0,5					3
Feldtestdaten vorhanden	M5	AP 7; 11; 12													+	0	
Projektleitung	13	Projektleitung	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	6,7
Zentrum für BZ-Technik ZBT g3mbH Duisburg (Institut)	Entwicklungsunterstützung System-Anpassung	16	Entwicklung	1,5	1,5	1,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75		10,5
	Feldtest vorbereitet und in Feldtestobjekte integriert	M1	AP 1; 2; 6; 16													+	0
	Abbruchmeilenstein aus Zuwendungsbescheid	MA														+	0
	Qualifikation Entschwefelung (Überschneidung)	17	Marktanalysen		0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75			6
	Verifikation bestehender bzw. entwickelter Entschwefelungsverfahren	M4	AP 8; 17													+	0
	Entwicklungsanpassung an Feldtestobjekte	18	Entwicklung								1	1	1				4
Qualifikation verbesserter Komponenten	19	Entwicklung									0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	7,5
Optimierung aus Feldtesterfahrung abgeschlossen (Nullsenenstatus)	M6	AP 9; 10; 18; 19														+	0

Bild 2: Zeitplan, gegenüber Antrag geändert im August 2011

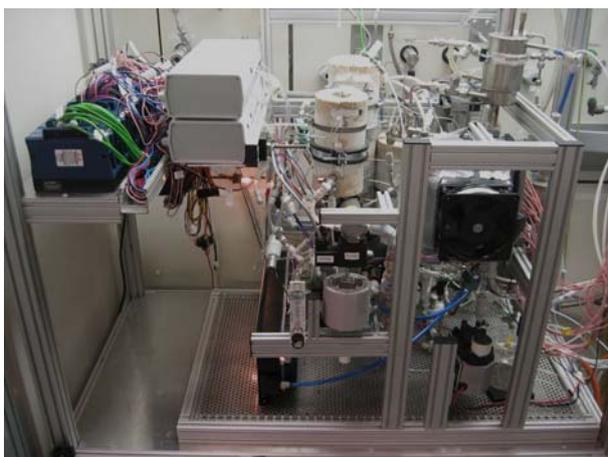




**Bild 3: Ablauf des Vorhabens, Übersicht**

### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

ZBT kann auf ein umfangreiches Know-how über Techniken und Verfahren sowie über theoretische und praktische Untersuchungsmethoden im Bereich der Brennstoffzellentechnik zugreifen (siehe auch [13]). Die durch die oben beschriebene Kooperation mit enymotion erlangten Ergebnisse und Erfahrungen sowie die gemeinsam erstellten und qualifizierten Bauteile und Systemkomponenten bilden im Wesentlichen den technischen Stand, an den in diesem Projekt angeknüpft wurde. Hier sei speziell auf das für enymotion im Jahr 2008 erstellte Laborfunktionsmuster (Bild 4) und auf ein umfangreiches Materialscreening für Entschwefelungsmaterialien hingewiesen.



**Bild 4: Laborfunktionsmuster des Reformerbrennstoffzellensystems (Nov 2008)**



Die Bearbeitung des Projektes erfolgte zudem auf Basis von Fachliteratur, die über die einschlägigen Informationsdienste fortlaufend ermittelt wurde. Im Folgenden sind wesentliche Literaturstellen aufgelistet.

- [1] A. Heinzl, F. Mahlendorf, J. Roes: *Brennstoffzellen. Entwicklung, Technologie, Anwendung*, C.F. Müller Verlag, ISBN: 3-7880-7741-7, 2006
- [2] G. Kolb; *Fuel Processing: for Fuel Cells*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KG; Auflage: 1. Auflage 2008, ISBN 3527315810
- [3] Shekhawat, D, Spivey, J.J., Berry, D.A.: *Fuel Cells: Technologies vor Fuel Processing*, Elsevier Books; Auflage: 1 2012, ISBN: 0444535632
- [4] E. Truckenbrodt: *Fluidmechanik*, Band 1, Springer, 1996, S. 255
- [5] P.J. de Wild, R.G. Nyqvist, F.A. de Bruijn, E.R. Stobbe: *Removal of sulphur-containing odorants from fuel gases for fuel cell-based combined heat and power applications*, Journal of Power Sources 159 (2006) S. 995 – 1004
- [6] Hidalgo-Vivas, A., Cooper, B.H., *Sulfur removal methods*, Handbook of Fuel Cells- Fundamentals, Technology and Applications, John Wiley & Sons, Ltd., 2010, ISBN: 978-0-470-97400-1
- [7] Dokupil, M.; Spitta, C.; Mathiak, J.; Beckhaus, P.; Heinzl, A.: *Compact propane fuel processor for auxiliary power unit application* Journal of Power Sources, Volume 157, Issue 2, 3 Juli 2006, Seite 906-913
- [8] Spitta, C., Mathiak, J., Dokupil, M., Heinzl, A.: *Coupling of a Small Scale Hydrogen Generator and a PEM Fuel Cell* Fuel Cells - from fundamentals to Systems - Volume 7, Issue 3 , Pages 197 - 203 (Special Issue: 3rd International German Hydrogen Energy Congress 2006)
- [9] G. Bandlamudi, M. Saborni, P. Beckhaus, F. Mahlendorf, A. Heinzl *Performance Analysis of HT PEMFCs under the Influence of Reformates* ASME, Proceedings of the European Fuel Cell Technology and Applications Conference, 2007, Pages 227-228, ISBN: 0-7918-4801-9.
- [10] Spitta, C., *Reformer-Module für mobile Brennstoffzellen-APUs im kleinen Leistungsbereich*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, Logos Verlag, Berlin, 2008, ISBN: 978-3-8325-1979-7
- [11] P. Beckhaus, J. Burfeind, G. C. Bandlamudi, F. Filusch, A. Heinzl *Experience in stack development for high temperature PEM fuel cells*



proceedings of 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 (WHEC2010), 16 - 21 May 2010 in Essen

- [12] FLUENT 6.3 User's Guide, Kapitel 7.19.2, *Momentum Equations for Porous Media*, September 2006
- [13] ZBT Statusbericht 2010, [http://www.zbt-  
duisburg.de/aktuell/publikationen/informationsmaterial/](http://www.zbt-<br/>duisburg.de/aktuell/publikationen/informationsmaterial/)
- [14] Gerhard Hirn, *Bordstromversorgung mit Brennstoffzellen*, Projektinfo 10/2011, Bine Informationsdienst, ISSN: 0937-8367

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es fanden regelmäßig Projekttreffen und Telekonferenzen mit allen beteiligten Partnern im Projekt statt, um den Projektverlauf zu besprechen und die weitere Vorgehensweise zu koordinieren (siehe Tabelle 1). Ab Quartal Q4 2010 war Dometic nicht mehr in dem Konsortium beteiligt, die entsprechenden Aufgaben wurden durch enymotion übernommen.

Auf technischer Ebene fand ein intensiver Austausch von Ergebnissen und Messdaten zwischen enymotion und ZBT durch Telefongespräche und E-Mails statt. Darüber hinaus erfolgte die gemeinsame Bearbeitung von Teil-Arbeitspaketen durch Zusammenarbeit von enymotion- und ZBT-Mitarbeitern in den Laborräumen des ZBT.



**Tabelle 1:** Projekttreffen und Telefonkonferenzen im Rahmen des Projektes FUELCELL 4 LEISURE

<b>Art</b>	<b>Datum</b>
Kick-Off-Projekttreffen mit allen Beteiligten bei enymotion in Heilbronn	03.02.2010
Projekttreffen mit enymotion und ZBT bei ZBT in Duisburg	08.04.2010
Telefonkonferenz mit allen Beteiligten	02.08.2010
Projekttreffen mit enymotion und ZBT bei enymotion in Heilbronn	12.01.2011
Telefonkonferenz mit enymotion und ZBT	08.02.2011
Telefonkonferenz mit enymotion und ZBT	10.06.2011
Projekttreffen mit enymotion und ZBT bei ZBT in Duisburg	09.08.2011
Telefonkonferenz mit enymotion und ZBT	05.09.2011
Projekttreffen mit enymotion und ZBT bei enymotion in Heilbronn	29.09.2011
Projekttreffen mit enymotion und ZBT bei enymotion in Heilbronn	30.11.2011
Telefonkonferenz mit enymotion und ZBT	16.01.2012
Telefonkonferenz mit enymotion und ZBT	16.03.2012
Abschlusstreffen mit enymotion und ZBT in Duisburg	11.07.2012



## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

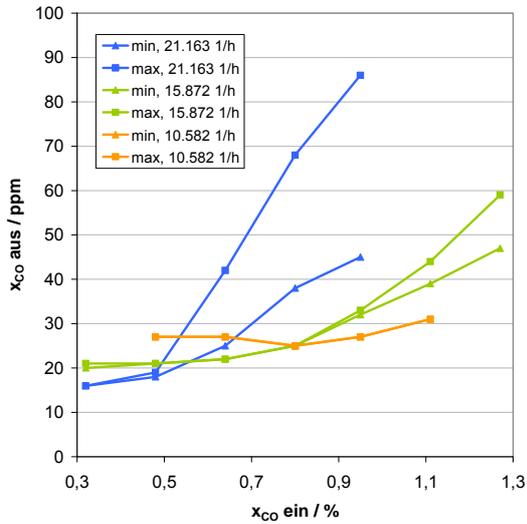
Nachfolgend werden die wesentlichen durch das ZBT im Projekt durchgeführten Arbeiten thematisch strukturiert erläutert. Die Zuordnung zu den in Bild 2 genannten Arbeitspaketen erfolgt durch textliche Kennzeichnung.

#### 2.1.1 Qualifizierung CO-Feinreinigung (SelOx)

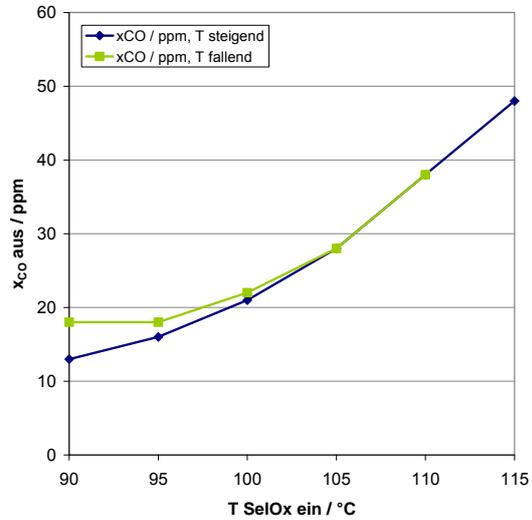
In AP16 *Entwicklungsunterstützung Systemanpassung* wurden experimentelle Untersuchungen am vorhandenen Feinreinigungsreaktor zur selektiven Oxidation von Kohlenmonoxid (SelOx-Reaktor) durchgeführt. Die CO-Feinreinigung ist eine erforderliche Prozessstufe des Reformersystems zur Herstellung eines wasserstoffreichen Produktgases mit einer CO-Konzentration unterhalb 50 ppm. Die CO-Eintrittskonzentration für die Feinreinigungsstufe beträgt durch die prozesstechnisch vorgelagerten Reaktoren zur CO-Konvertierung zwischen 0,8 bis 1,0 %. Für den Einsatz im Brennstoffzellensystem zur Stromversorgung ist ein kontinuierlicher Betrieb von mindestens 12 Stunden notwendig. Der Betrieb des 2008 entwickelten Reformersystems hat jedoch gezeigt, dass der SelOx-Reaktor keine ausreichende Performance über eine längere Betriebszeit aufweist.

Zu Beginn des Arbeitspakets wurde ein vorhandener Laborteststand für Einzelreaktor tests hardware- und softwareseitig modifiziert, um alle relevanten Betriebsbedingungen des realen Reformersystems abbilden zu können. Im Rahmen der Qualifizierung unter definierten Betriebsbedingungen erfolgten Variationen der Raumgeschwindigkeit, CO-Eintrittskonzentration und Temperatur, so dass eine detaillierte Bewertung des Reaktors möglich wurde. Des Weiteren wurde das Langzeitverhalten des Reaktors für ausgewählte Betriebspunkte untersucht. Bild 5 zeigt die Abhängigkeit der CO-Austrittskonzentration von der CO-Eintrittskonzentration bei Variation der Raumgeschwindigkeit. Die Kennzeichnung „min“ zeigt die Messwerte zu Beginn der Messung und „max“ nach einer Messdauer von 90 Minuten. Es wird deutlich, dass die CO-Austrittskonzentration mit der Zeit zunimmt. Dieser Effekt wird durch erhöhte CO-Eintrittskonzentrationen und Raumgeschwindigkeiten verstärkt.





**Bild 5: CO-Austrittskonzentration bei Variation der Raumgeschwindigkeit und CO-Eintrittskonzentration**

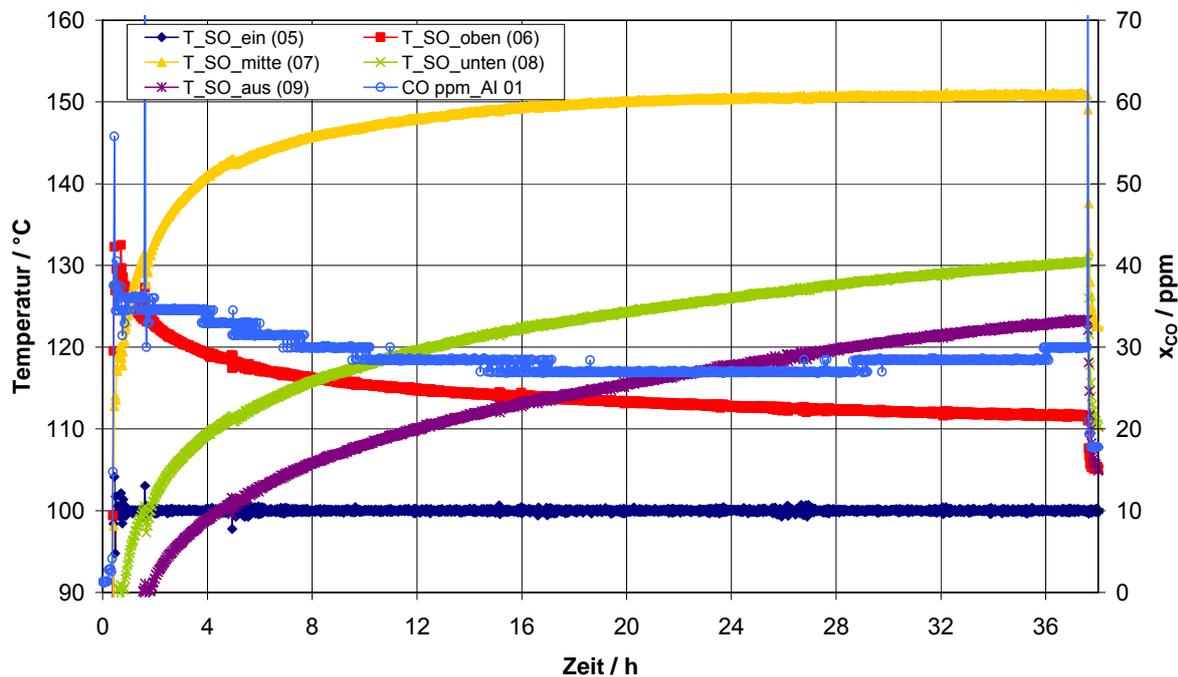


**Bild 6: CO-Austrittskonzentration bei Variation der Reaktoreintrittstemperatur (CO-Eintrittskonzentration = 0,8 %, RG = 10.582 1/h)**

Die Abhängigkeit der CO-Austrittskonzentration von der Reaktoreintrittstemperatur ist in Bild 6 dargestellt. Grundsätzlich konnten bei geringerer Temperatur niedrigere CO-Austrittskonzentrationen erreicht werden. Da die Messpunkte zuerst bei steigender Temperatur (T steigend) aufgenommen und folgend bei abnehmender Temperatur (T fallend) wiederholt wurden, konnte für geringe Temperaturen zwischen 90 und 100 °C wieder eine Abhängigkeit von der Betriebsdauer nachgewiesen werden. Durch die dargestellten Ergebnisse wurde eine Grundlage für die Reaktoroptimierung geschaffen, anhand der die Raumgeschwindigkeit als wesentliche Größe für die Reaktorauslegung festgelegt werden kann. Für CO-Eintrittskonzentrationen zwischen 0,8 und 1,0 % wird die erforderliche Reaktoreintrittstemperatur zu 90 bis 100 °C bestimmt.

Zur Bewertung des vorhandenen Reaktors bei längerer Betriebszeit wurden Messungen unter Berücksichtigung der optimierten Betriebsparameter durchgeführt. Bild 7 zeigt das Reaktorverhalten bei einer Messung über 38 Stunden.





**Bild 7: Langzeitmessung (CO-Eintrittskonzentration = 0,95 %, RG = 15.872 1/h, T = 100 °C)**

Grundsätzlich können anhand der erzielten Ergebnisse die ausgewählten, optimierten Betriebsparameter bestätigt werden, so dass auch über die Betriebszeit von 38 Stunden die CO-Konzentration kontinuierlich auf unter 50 ppm reduziert wird. Aufgrund der detaillierten Messung mehrerer Reaktortemperaturen entlang des Reaktionswegs wird jedoch deutlich, dass sich keine stationären Temperaturen im Reaktor einstellen. Bei einer auf 100 °C geregelten Reaktoreintrittstemperatur zeigen alle weiteren Temperaturen erhebliche Änderungen über der Zeit, so dass auf örtliche und zeitliche Änderungen des Reaktionsablaufs geschlossen werden kann. Dieses Verhalten ist bezüglich der Robustheit des Systems als kritisch zu betrachten.

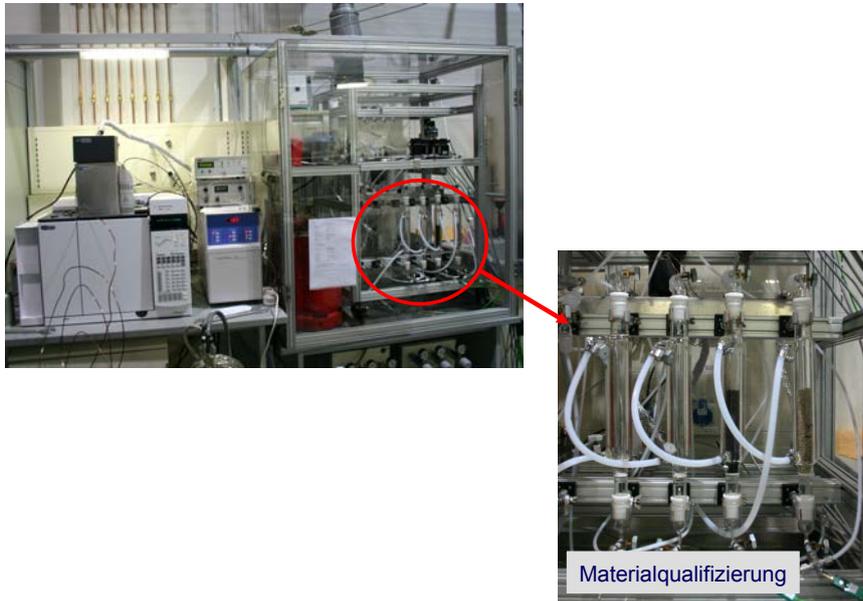
## 2.1.2 Qualifizierung Entschwefelung

### 2.1.2.1 Materialauswahl

In AP17 *Qualifikation Entschwefelung* wurden Arbeiten zur Qualifizierung von ausgewählten Entschwefelungsmaterialien unter Temperatureinfluss durchgeführt.

Zu Beginn wurde hierzu ein neuer Laborteststand geplant, aufgebaut und erfolgreich in Betrieb genommen, mit dem mehrere Entschwefelungsmaterialien und -patronen zeitgleich qualifiziert werden können (siehe Bild 8).





**Bild 8: links: Gesamtaufbau des Laborteststands mit Gaschromatograph  
rechts: Teststandsbereich mit beheizten Reaktoren zur Materialqualifizierung**

Der Teststandsbereich für die Materialqualifizierung kann mit maximal sechs beheizbaren Reaktoren betrieben werden. Für die Patronenqualifizierung sind drei separate Einbauplätze vorhanden. Die Flüssiggasversorgung wurde mittels automatischer Flaschenumschaltung unterbrechungsfrei ausgelegt. Der Eingang und der Ausgang jedes Reaktors bzw. jeder Patrone sind mit Anschlüssen zur Probenentnahme für den Gaschromatographen ausgestattet. Um die hochsensiblen Messungen von geringsten Schwefelkonzentrationen im ppb-Bereich unverfälscht durchführen zu können, wurden alle metallischen Bauteile, z.B. Ventile, Massenflussregler, Gasleitungen mit einer inerten Beschichtung versehen und alle Kunststoffbauteile aus PTFE ausgeführt. Durch eine Teststandsteuerung können alle Ventile und Massenflussregler vollautomatisiert gesteuert sowie die notwendigen Parameter wie z.B. Temperaturen, Drücke und Volumenströme kontinuierlich erfasst werden. Zusätzlich wurden Sicherheitskomponenten integriert, die einen unbemannten Teststandsbetrieb ermöglichen.

Zur Gasanalyse wird ein Gaschromatograph der Firma Agilent eingesetzt. Als Schwefel-Detektor wird der SCD 355 (Sulfur Chemiluminescence Detector) der Firma Agilent verwendet, der zurzeit der empfindlichste und selektivste kommerziell erhältliche Schwefeldetektor ist. Mit dieser am ZBT vorhandenen Gaschromatograph/Detektor-Kombination sind die hochempfindlichen und genauen Konzentrationsmessungen verschiedener Schwefelspezies möglich.

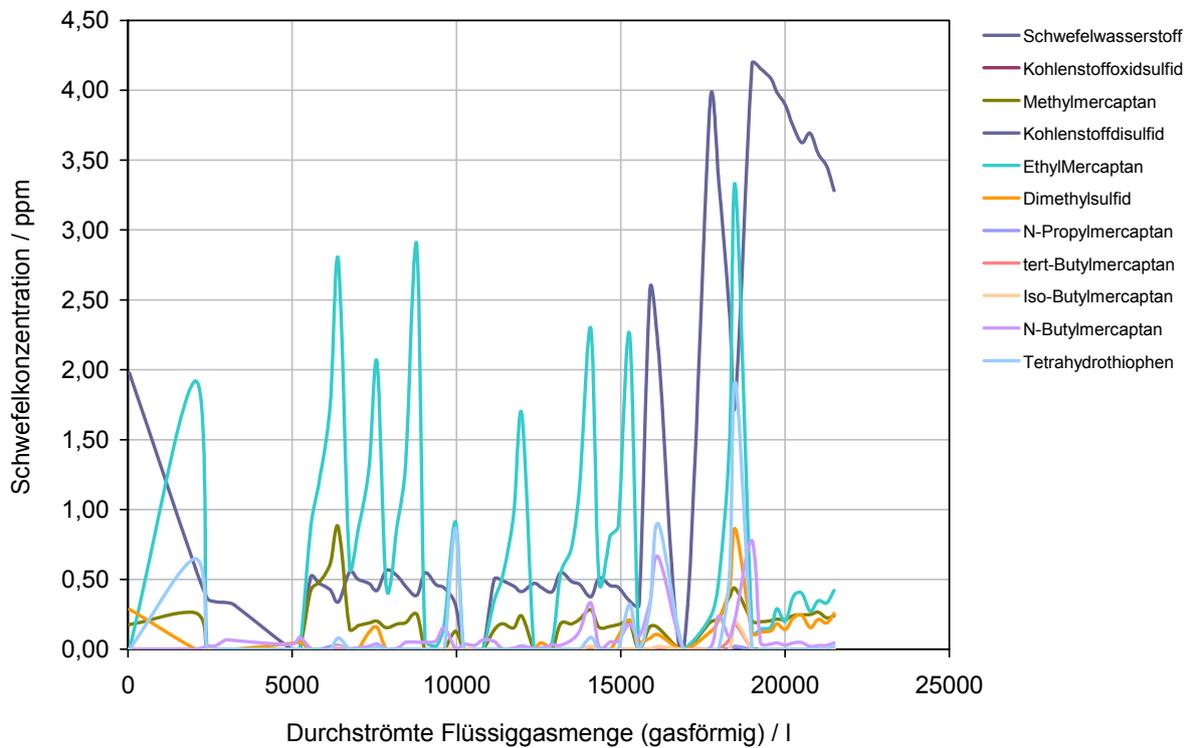


Im Rahmen der GC-Inbetriebnahme erfolgte eine Methodenentwicklung für die zu erwartenden Schwefelverbindungen und Konzentrationsbereiche. Auf Basis dieser Methoden wurde das Gerät mittels Prüfgasflaschen für eine Vielzahl von Schwefelverbindungen (z.B. Schwefelwasserstoff, Kohlenstoffoxidsulfid, Methylmercaptan, Kohlenstoffdisulfid, Ethylmercaptan, Dimethylsulfid, N-Propylmercaptan, Iso-Butylmercaptan, N-Butylmercaptan, Ter-Butylmercaptan, Tetrahydrothiophen) im Konzentrationsbereich von 100 ppb bis 10 ppm kalibriert. Die gemäß der technischen Spezifikation angegebene hohe Linearität des Detektormesssignals konnte innerhalb dieser Kalibrierung bestätigt werden.

Die dem Projekt vorangegangene Qualifizierung unterschiedlicher kommerziell erhältlicher Entschwefelungsmaterialien für Flüssiggas bei Raumtemperatur hat gezeigt, dass zur erfolgreichen Tiefentschwefelung bis in den ppb-Bereich eine zweistufige Kombination von Materialien zu empfehlen ist. Es wurden mit dem Projektpartner enymotion geeignete Materialien ausgewählt, die in zwei Kombinationen als zweistufige Entschwefelungen bei erhöhter Temperatur ( $T = 80\text{ °C}$ ) qualifiziert werden. Um möglichst realitätsnahe Ergebnisse zu generieren, werden kommerzielle Flüssiggasflaschen (Füllgewicht 11 kg) eingesetzt. Durch eine automatisierte Ventilsteuerung des Gaschromatographen werden alle relevanten Messpunkte in diskreten Zeitabständen analysiert.

Bild 9 zeigt die Konzentrationen der einzelnen Schwefelspezies am Eintritt des ersten Reaktors seit Beginn der Untersuchung entsprechend der durchströmten Flüssiggasmenge. Es wird deutlich, dass die Schwefelkonzentrationen von Flasche zu Flasche erhebliche Unterschiede aufweisen. Des Weiteren besteht eine Abhängigkeit der Schwefelkonzentration vom Füllstand der Flüssiggasflasche.

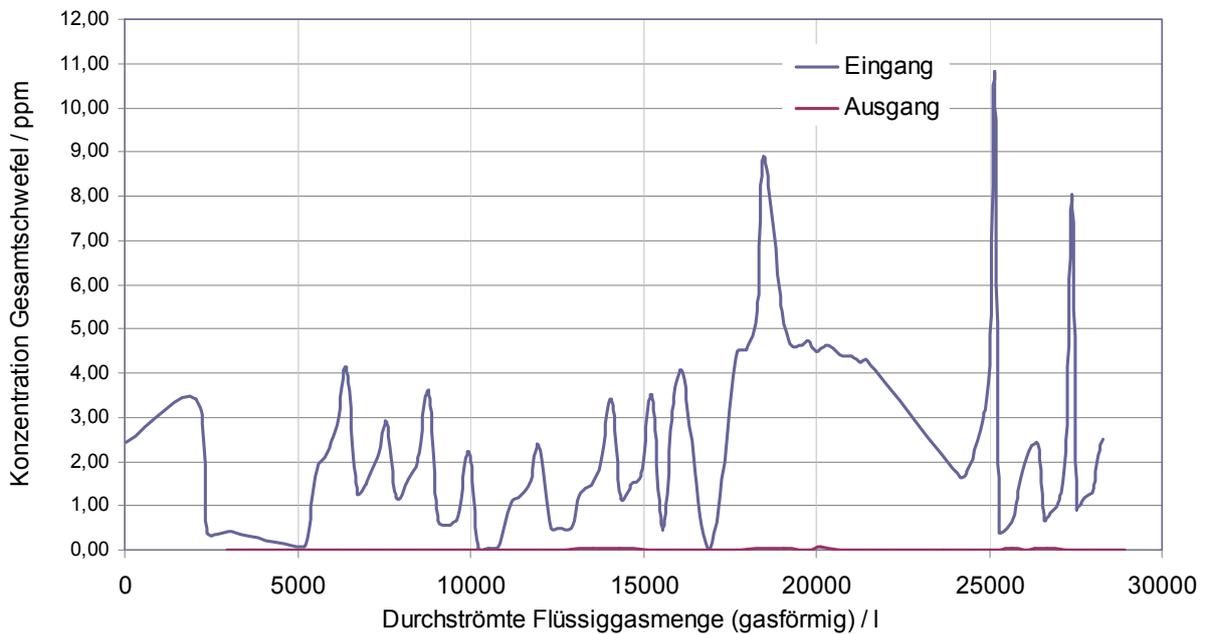




**Bild 9: Konzentrationen einzelner Schwefelspezies im Flüssiggas, Eintritt erste Stufe**

In Bild 10 wird vereinfachend die Summe aller gemessenen Schwefelspezies vor der ersten Entschwefelungsstufe und hinter der zweiten Entschwefelungsstufe aufgezeigt. Es kann nachgewiesen werden, dass die Entschwefelung des eingesetzten Flüssiggases auch bei erhöhter Temperatur von 80 °C zuverlässig funktioniert. Nachdem das Material mit ca. 29.000 l Flüssiggas durchströmt wurde, ohne einen Schwefeldurchbruch ( $C_S > 50$  ppb) zu detektieren, wurde dieser Test nach Rücksprache mit enymotion beendet.

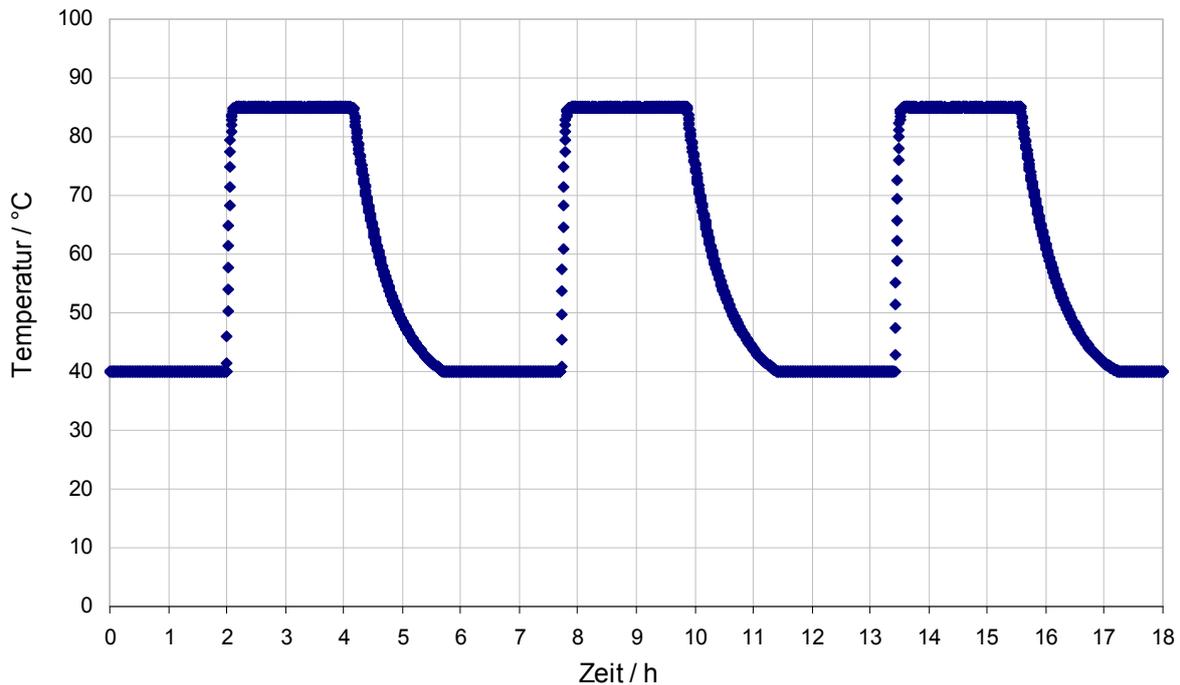




**Bild 10: Verlauf der Gesamtschwefelkonzentration vor der ersten und nach der zweiten Entschwefelungsstufe (statische Temperaturtests 80°C)**

Anschließend erfolgte die Qualifizierung von zwei zweistufigen Entschwefelungsmaterialien (Materialkombination 1 & 2) unter wechselnder Temperaturbelastung. Hierzu wurde die Steuerungssoftware des Teststandes modifiziert. Das Bild 11 illustriert einen Ausschnitt des Temperaturprofils, das im Ölbad-Thermostat einzustellen ist, um eine Maximaltemperatur von 80 °C im Testreaktor zu erzielen. Die Reaktoren werden zyklisch auf die Zielwerte von 40 °C und 80 °C aufgeheizt bzw. abgekühlt. Nach dem Erreichen eines Zielwertes wird dieser für 2 Stunden konstant gehalten.





**Bild 11: Temperaturprofil des Ölbad-Thermostaten**

In Bild 12 und Bild 13 sind jeweils der Gesamtschwefelanteil am Austritt der Reaktoren und die Temperatur in Abhängigkeit der Versuchsdauer dargestellt. Für die Materialkombination 1 zeichnet sich bereits nach ca. 250 Betriebsstunden eine Verminderung der Rückhaltegröße ab ( $x_s > 0,05$  ppm). Im weiteren Verlauf steigt der gemessene Gesamtschwefelanteil bis auf ca. 5 ppm.

Die Materialkombination 2 ermöglicht eine deutlich längere Entschwefelung des Gasstromes bei ausreichender Qualität. Hier wird eine erste signifikante Schwefelmenge ( $x_s > 0,05$  ppm) erst nach ca. 1.000 Betriebsstunden detektiert. Die maximalen Konzentrationen steigen im Folgenden bis auf ca. 10 ppm. Bei dem eingestellten Volumenstrom resultiert daraus eine „vollständig“ entschwefelte Flüssiggasmenge von ca. 41.000 l. Im Vergleich zum Betrieb bei Raumtemperatur ist eine Reduktion der „vollständig“ entschwefelten Flüssiggasmenge von ca. 10 – 15 % zu verzeichnen.



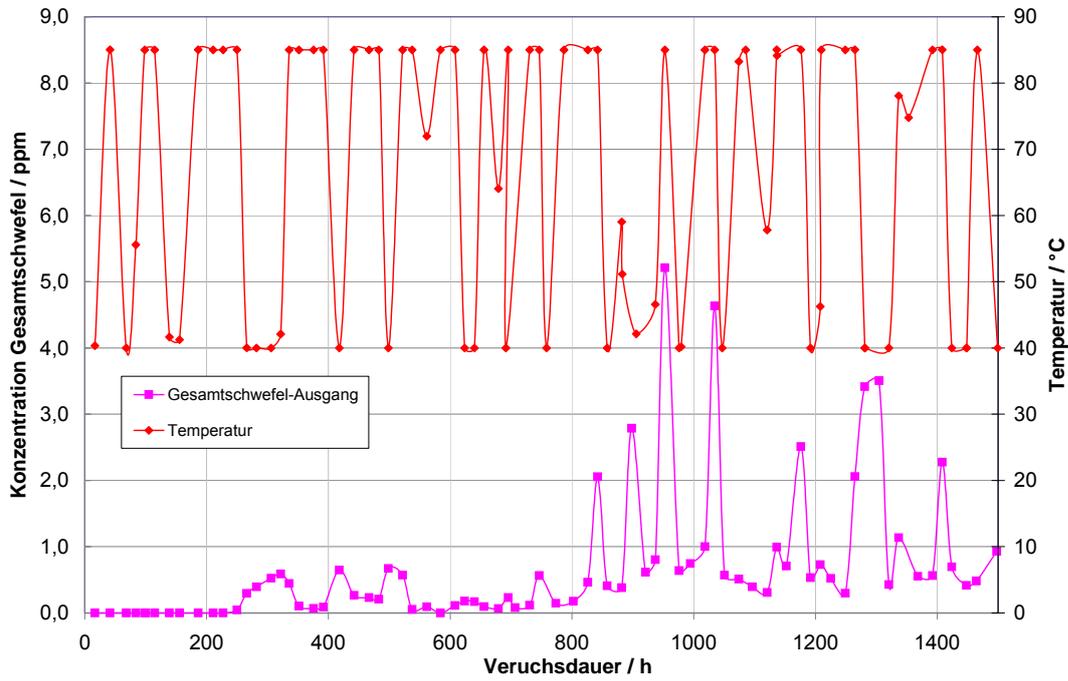


Bild 12: T-Zyklus, Gesamtschwefelkonzentration Austritt der Materialkombination 1

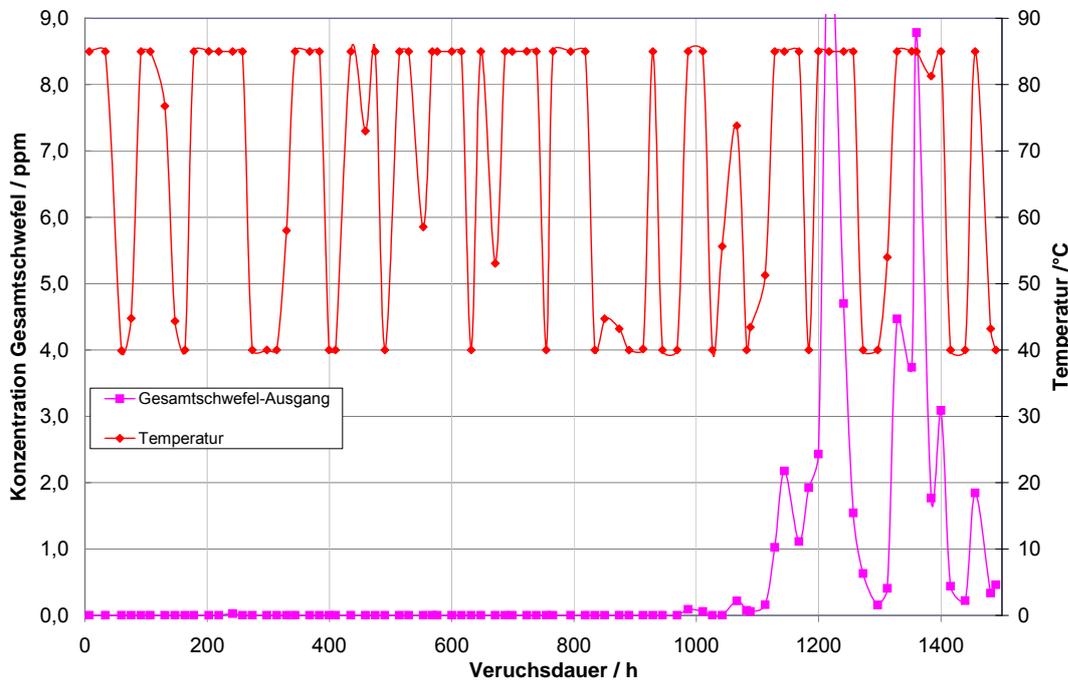
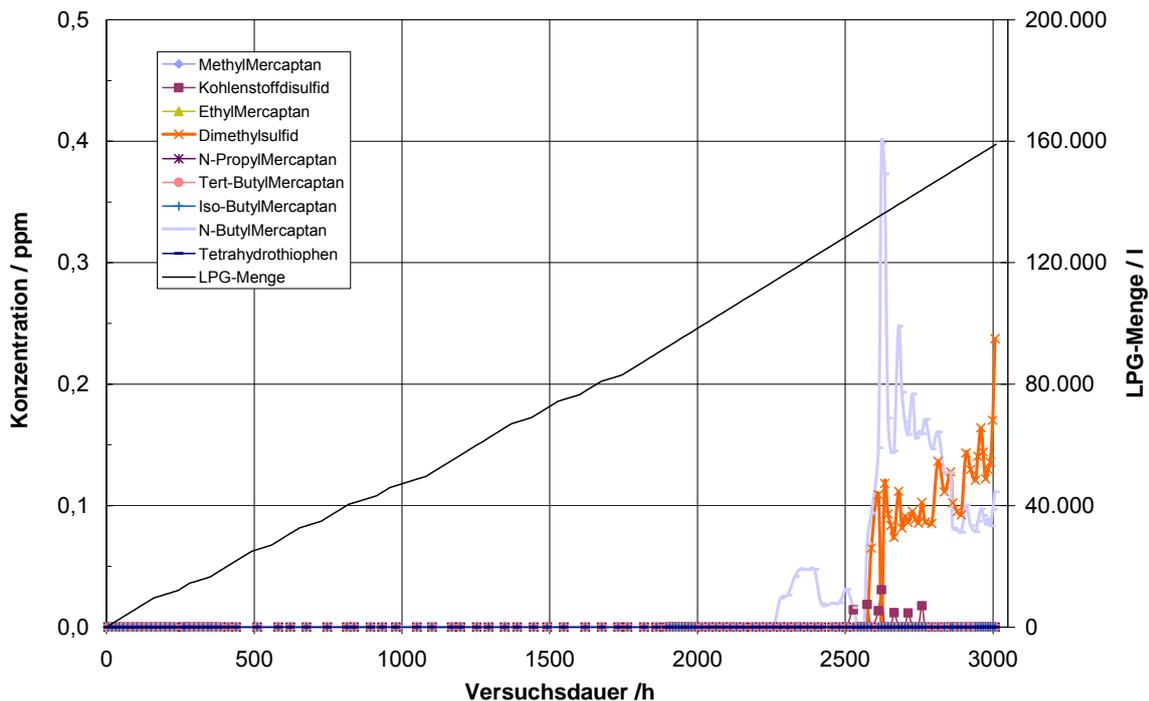


Bild 13: T-Zyklus Gesamtschwefelkonzentration Austritt der Materialkombination 2



### 2.1.2.2 Patronenvermessung

Basierend auf den Erkenntnissen der Materialauswahl erfolgte durch enymotion die Entwicklung einer Entschwefelungspatrone für den realen Einsatz im Gesamtsystem. ZBT führte im Anschluss die Qualifizierung dieser Patrone durch. Die Vorgehensweise war dabei identisch zu der Qualifizierung der Materialien bei Raumtemperatur. Es wurde ein kontinuierlicher Volumenstrom Flüssiggas auf die Patrone geleitet. In regelmäßigen Abständen wurden die Schwefelkomponenten am Eintritt und am Austritt der Patrone bestimmt. In Bild 14 ist der resultierende Zeitverlauf der einzelnen Schwefel-Komponenten am Patronenaustritt sowie der der gesamten Flüssiggasmenge dargestellt. Eine signifikante Schwefelmenge ( $x_s > 0,05$  ppm) wurde nach ca. 2.300 h detektiert, was einer Flüssiggasmenge von ca. 11.600 l entspricht. Diese Laufzeit erfüllt unter Berücksichtigung eines Wartungsintervalls und der möglichen Reduktion der Beladungskapazität durch wechselnde Betriebstemperaturen die angestrebte Lebensdauer für das Brennstoffzellensystem (2.000 – 3.000 h), so dass die Auslegung der Patrone in diesem Entwicklungsstadium akzeptabel ist.



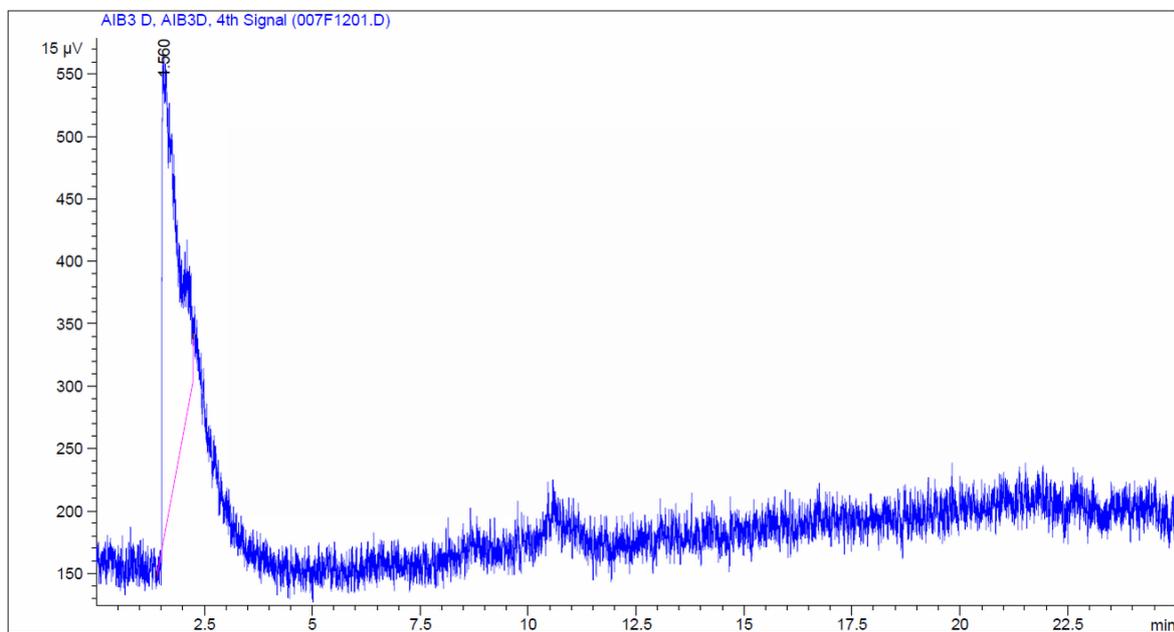
**Bild 14: Schwefelkonzentrationen (Einzelkomponenten) am Patronenaustritt in Abhängigkeit der Zeit**

ZBT untersuchte des Weiteren Entschwefelungspatronen, die in Feldtestsystemen betrieben wurden. Hierzu wurden die Patronen in der bekannten Weise mit handelsüblichem



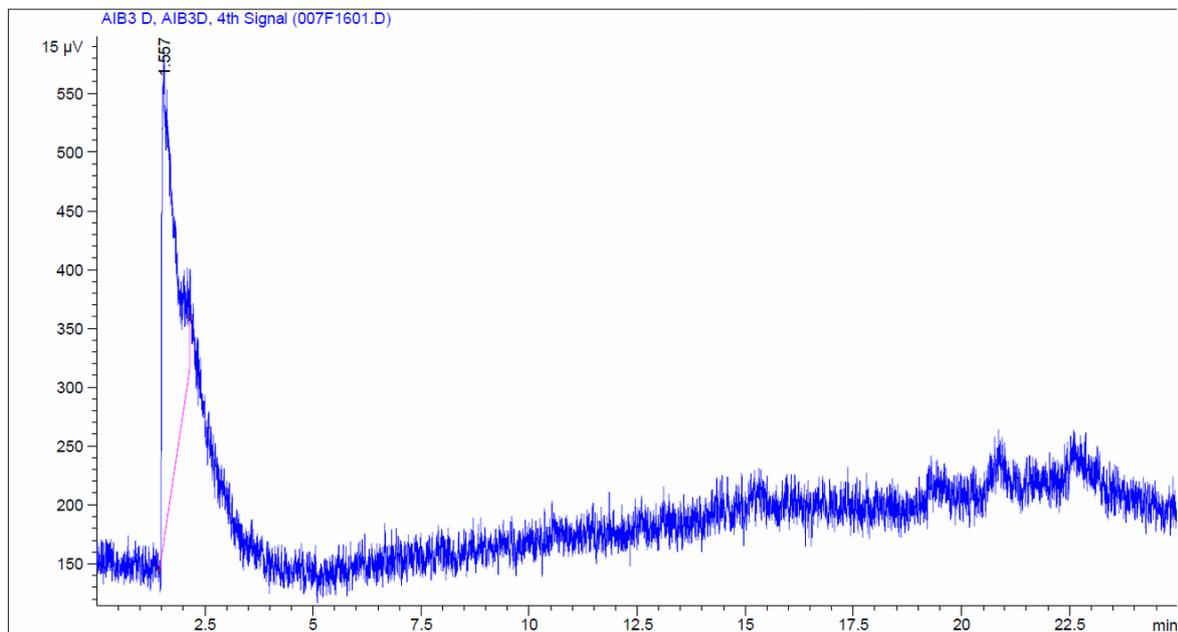
Flüssiggas beaufschlagt und die Schwefelspezieskonzentrationen am Patroneneingang und -ausgang bestimmt. Die Messungen erfolgten dabei sowohl im senkrechten als auch im waagerechten Einbauzustand der Patrone, wobei der waagerechte Zustand der realen Einbauposition entspricht.

Bild 15 und Bild 16 stellen die am Ausgang einer für ca. 80 – 100 Zyklen betriebenen Patrone gemessenen Chromatogramme dar. Sowohl für die waagerechte als auch für die senkrechte Einbauposition sind keine Peaks in der relevanten Retentionszeit sichtbar, was zeigt, dass keine Schwefelspezies mit Konzentrationen, die größer als die Detektionsgrenze ( $\sim 10$  ppb) sind, auftreten. Die im Rahmen des Feldtestes aufgeprägten Belastungen hatten demnach bisher keine Auswirkungen auf die Patronenfunktionalität.



**Bild 15: Chromatogramm der Schwefelkomponenten am Patronenausgang, senkrechte Position**





**Bild 16: Chromatogramm der Schwefelkomponenten am Patronenausgang, waagerechte Position**

### 2.1.3 Untersuchungen im Klimaschrank

In AP16 *Entwicklungsunterstützung Systemanpassung* wurden Untersuchungen von Peripheriekomponenten unter klimatisch veränderbaren Bedingungen durchgeführt, um die Zuverlässigkeit für den realen Einsatzfall bewerten zu können und die Komponentenauswahl weiter zu verfeinern. Hierzu steht am ZBT ein Klimaschrank zur Verfügung (siehe Bild 17), der entsprechende Variationen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit zulässt und so die durch den mobilen Einsatz geforderten Grenzbedingungen wie z.B. Frost simulieren kann. Die wesentlichen Leistungsdaten des Klimaschranks sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.





**Bild 17: Klimaschrank**

**Tabelle 2: Leistungsdaten Klimaschrank**

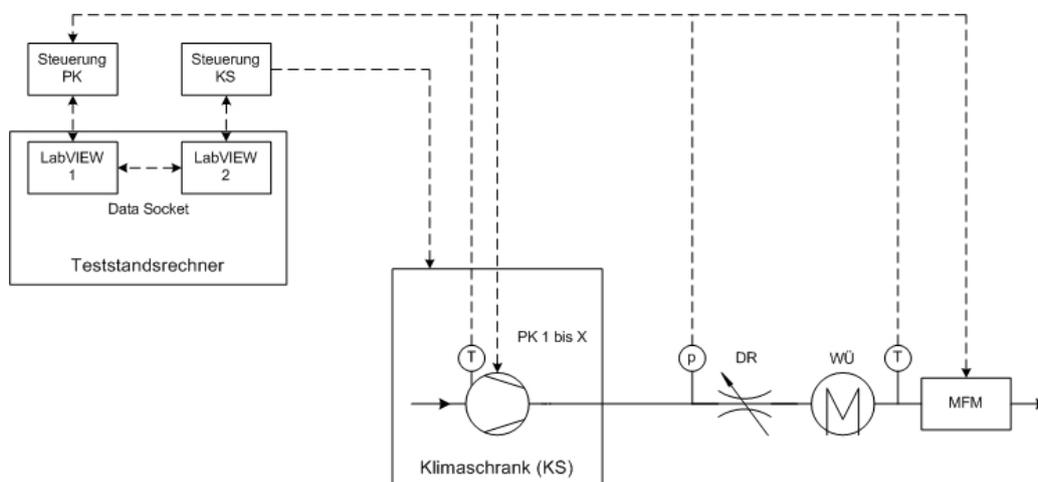
	Temperaturprüfung	Klimaprüfung
Maße Prüfraum / mm	950 x 800 x 800 (H x B x T)	
Temperaturbereich / °C	-40 bis +180	+10 bis +95
Feuchtebereich / % r. F.	-	10 bis 98
Taupunktbereich / °C	-	-3 bis +94
Heizen / K/min	5,0	ca. 4,0
Kühlen / K/min	5,0	ca. 4,0
Wärmekompensation / W	1500	5000 (bei + 20 °C) 2000 (bei - 20 °C)

### 2.1.3.1 Peripheriekomponenten

Die zu untersuchenden Peripheriekomponenten sind Membranpumpen und Axialgebläse, die im Brennstoffzellensystem zur Medienförderung bzw. zum Kühlen von Wärmeübertragern eingesetzt werden. Für alle Komponenten soll zunächst die generelle Funktionsfähigkeit unter definierten Grenzbedingungen getestet werden. Für die Pumpen werden zudem Volumenstrom-Kennlinien für unterschiedliche Temperaturen ermittelt.



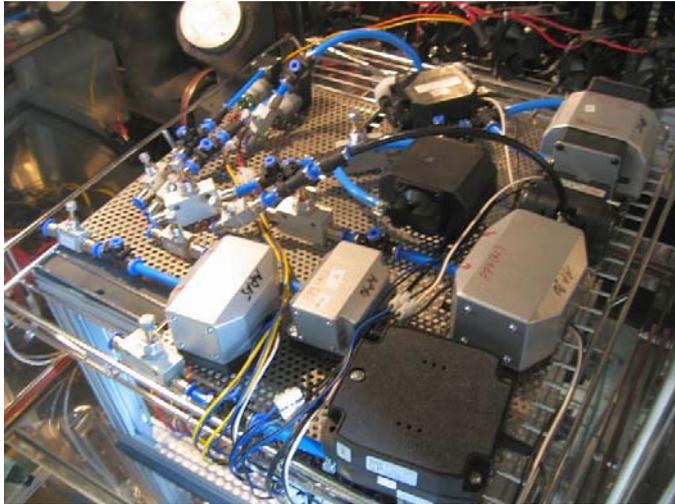
Zunächst erfolgten die Planung und der Aufbau der Teststandsumgebung sowie der Aufbau einer Steuerung für die Komponenten und den Klimaschrank. Mittels Datenaustausch über „LabVIEW Data Socket“ können alle relevanten Betriebsgrößen, wie z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank, Druck und geförderter Volumenstrom der jeweiligen Pumpe über einen zentralen Teststandsrechner eingestellt bzw. aufgezeichnet werden. Der schematische Testaufbau und die Wege des Datenaustausches sind in Bild 18 dargestellt. Die Komponenten PK 1 bis PK X sind zeitgleich im Klimaschrank positioniert und werden für die Qualifizierung zeitlich der Reihe nach mit der Messstrecke gekoppelt, die außerhalb des Klimaschranks positioniert ist. Die Messstrecke besteht aus einer Drossel (DR), einem Wärmeübertrager (WÜ) und einem Massendurchflussmessgerät (MFM). Die Druck- und Temperatursensoren (p, T) dienen zur Bestimmung der Betriebszustände.



**Bild 18: Schematischer Aufbau des Peripheriekomponententests in Klimaschrank**

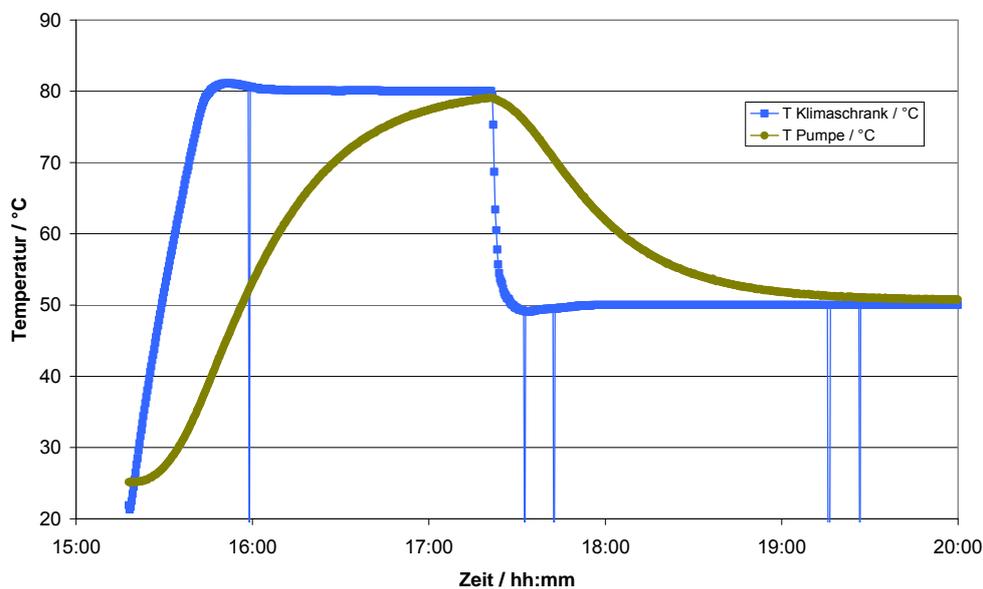
Die Auswahl der Komponenten und der Aufbau der Komponentensteuerung erfolgten durch enymotion. In Zusammenarbeit mit enymotion wurden die Komponenten in den Klimaschrank integriert (siehe Bild 19) und in Betrieb genommen.





**Bild 19: Peripheriekomponenten im Klimaschrank**

Zur Ermittlung der Akklimatisierungsdauer während der Messungen wurde zunächst der zeitliche Temperaturverlauf des Klimaschranks und einer Pumpe vergleichend gegenübergestellt (Bild 20). Der Temperaturmessung für die Pumpe war hierbei innerhalb des Pumpengehäuses angebracht. Es wird ersichtlich, dass die Akklimatisierung der Pumpe sowohl beim Aufheizen als auch beim Abkühlen mit einem deutlichen Zeitversatz (ca. 120 Min bzw. 150 Min) erfolgt, was bei der weiteren Messplanung zu berücksichtigen wurde.

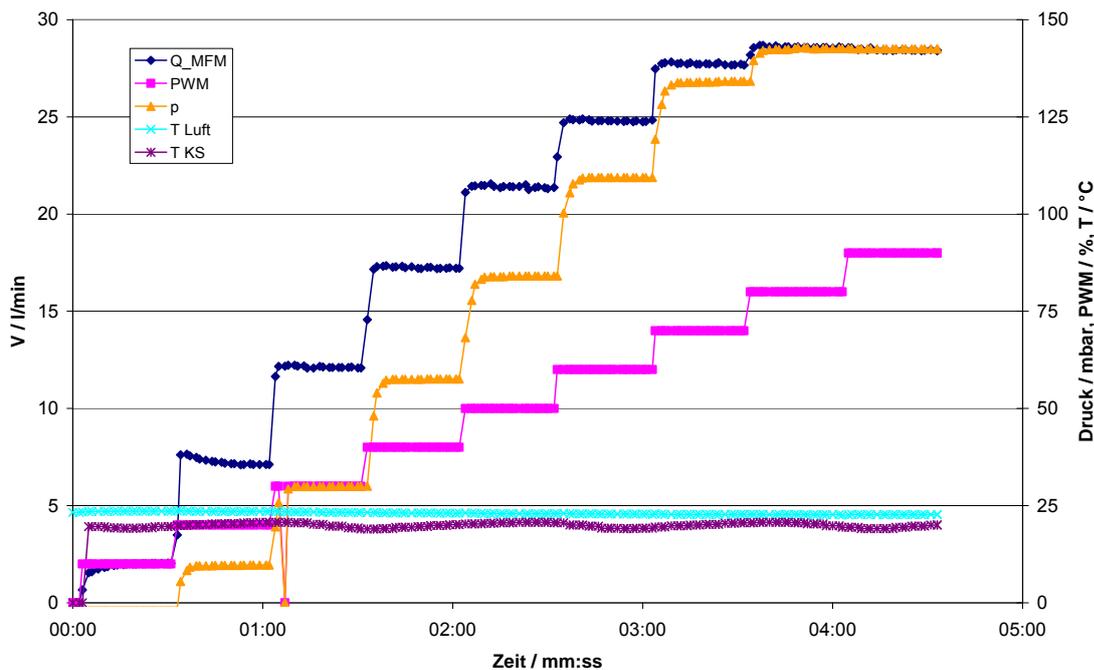


**Bild 20: Zeitlicher Temperaturverlauf von Klimaschrank im Vergleich zur Pumpe**



Für alle Komponenten wurde zunächst die generelle Funktionsfähigkeit unter definierten Grenzbedingungen getestet. Für insgesamt zehn Pumpen wurden zudem Volumenstrom-Kennlinien für unterschiedliche Temperaturen sowie der Einfluss einer dauerhaften Temperaturbelastung ermittelt. Die Untersuchungen gliederten sich in drei Phasen:

In Phase 1 wurden bei definierten Temperaturen (- 20 °C, + 20 °C und + 80 °C) durch eine zuvor festgelegte Betriebsweise Pumpenkennlinien erstellt, die Aufschluss über die Leistungsfähigkeit der Pumpen in der Startphase (Minute 0–5) geben. Nach Akklimatisierung der Pumpen und der zu fördernden Luft im Klimaschrank erfolgte eine automatisierte Erhöhung der Laststufen (10–90 %) mit der Schrittweite 10 %. Jede Laststufe wurde für 30 Sekunden konstant gehalten. Ein beispielhafter zeitlicher Verlauf ist für eine Pumpe in Bild 21 dargestellt. Hierin sind neben der Betriebstemperatur im Klimaschrank ( $T_{KS}$ ) und der Temperatur des gefördert Mediums ( $T_{Luft}$ ) die Pumpenleistungsstufe ( $PWM$ ) der resultierende Durchfluss ( $Q_{MFM}$ ) und der sich einstellende Betriebsdruck ( $p$ ) aufgetragen.

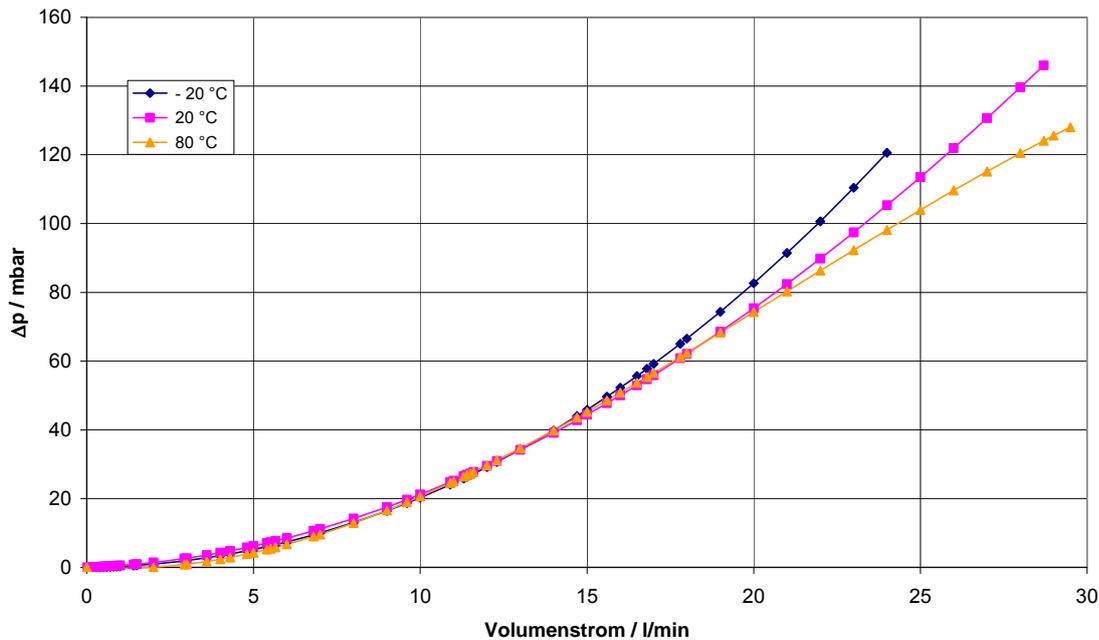


**Bild 21: Zeitlicher Verlauf der Kennlinienermittlung (20 °C, Phase 1)**

Durch Mittelwertbildung wurden Kennlinien der Pumpen, die die Druckerhöhung in Abhängigkeit vom Volumenstrom in dem speziellen Aufbau (Verbraucherkenlinie) wiedergeben, erstellt. Bild 22 zeigt eine Kennlinienschar einer Pumpe für die drei Temperaturstufen. Das Ende der Kennlinie wird durch die gemessenen Maximalwerte für



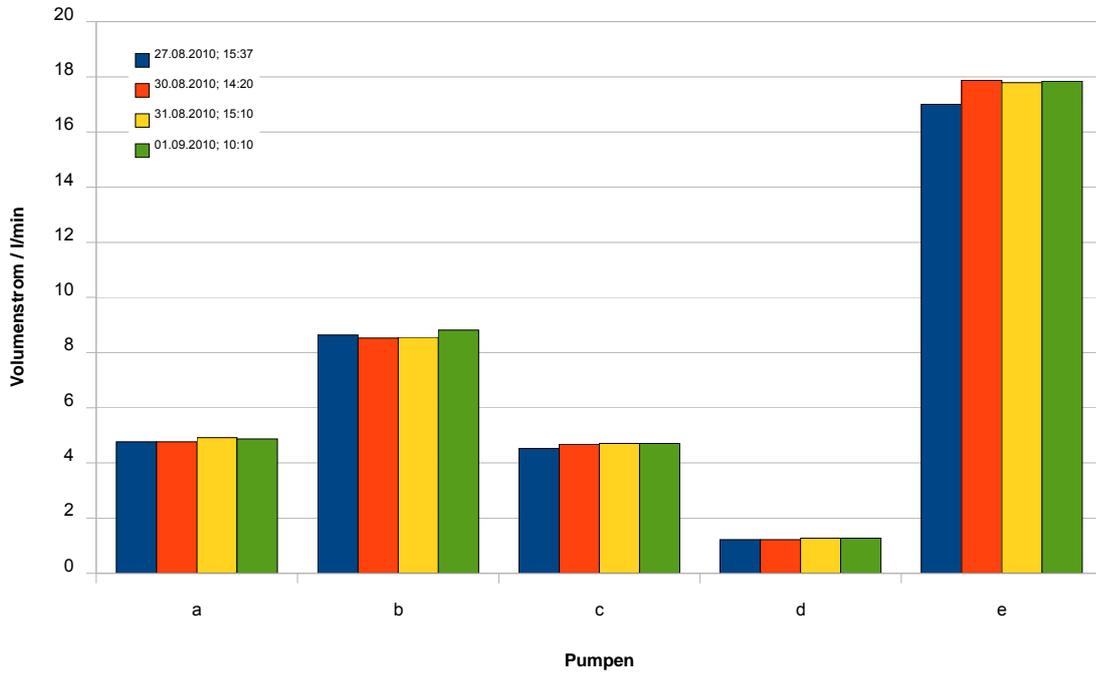
Druck und Volumenstrom bei dem Lastpunkt  $PWM = 90\%$  vorgegeben. Es ist zu erkennen, dass die Betriebstemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Förderleistung hat. Insbesondere der Betrieb unterhalb des Gefrierpunktes ( $-20\text{ °C}$ ) resultiert in einer deutlich verminderten Förderleistung in der Startphase. Dieser Trend ist für alle Pumpen zu erkennen.



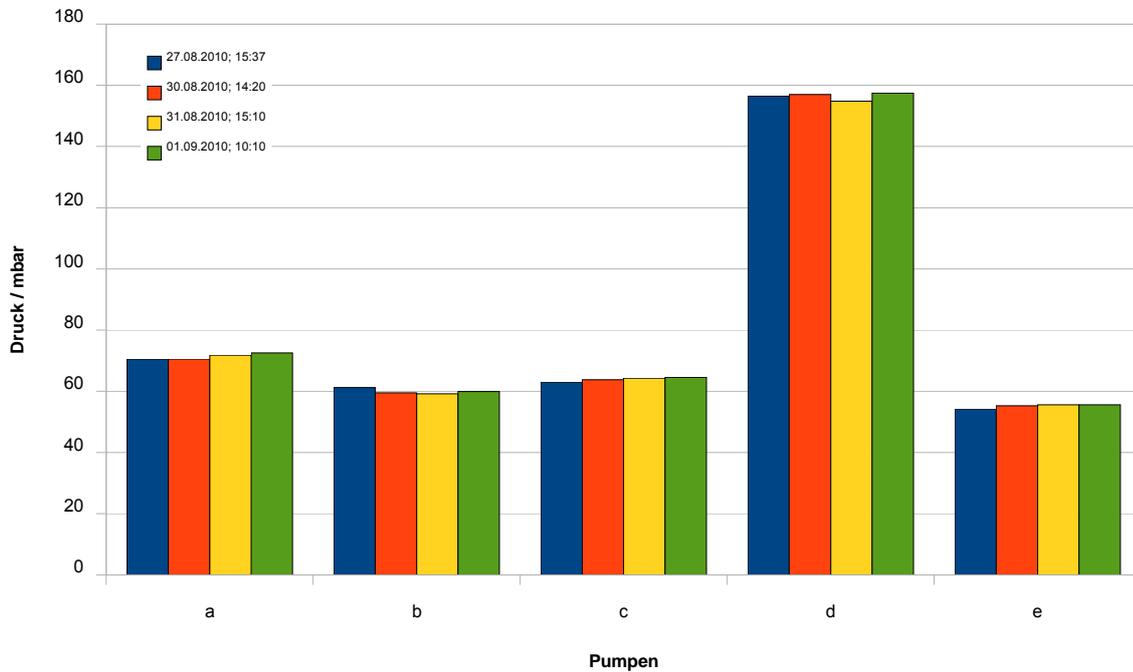
**Bild 22: Kennlinien basierend auf Trendlinie (Temperaturvariation, Phase 1)**

In Phase 2 erfolgte zur Beurteilung des Pumpenverhaltens bei Dauerbetrieb und zur Ermittlung der Änderung der Leistungsfähigkeit unter Grenzbedingungen für 120 Stunden eine Temperaturbeaufschlagung aller Komponenten bei  $T_{KS} = +80\text{ °C}$ . Die Komponenten wurden in diesem Zeitraum für  $5 \times 8 = 40$  Stunden bei der Laststufe  $PWM = 75\%$  betrieben. Innerhalb dieser Phase wurden stichpunktartig der Druck und der Volumenstrom aller Pumpen aufgezeichnet. In Bild 23 und Bild 24 sind die Messwerte für einige Pumpen und unterschiedliche Messtage dargestellt. Es ist zu erkennen, dass während des Dauerbetriebs nur kleine Leistungsschwankungen der Pumpen auftreten und somit im stationären Betrieb mit einer konstanten Fördermenge zu rechnen ist.





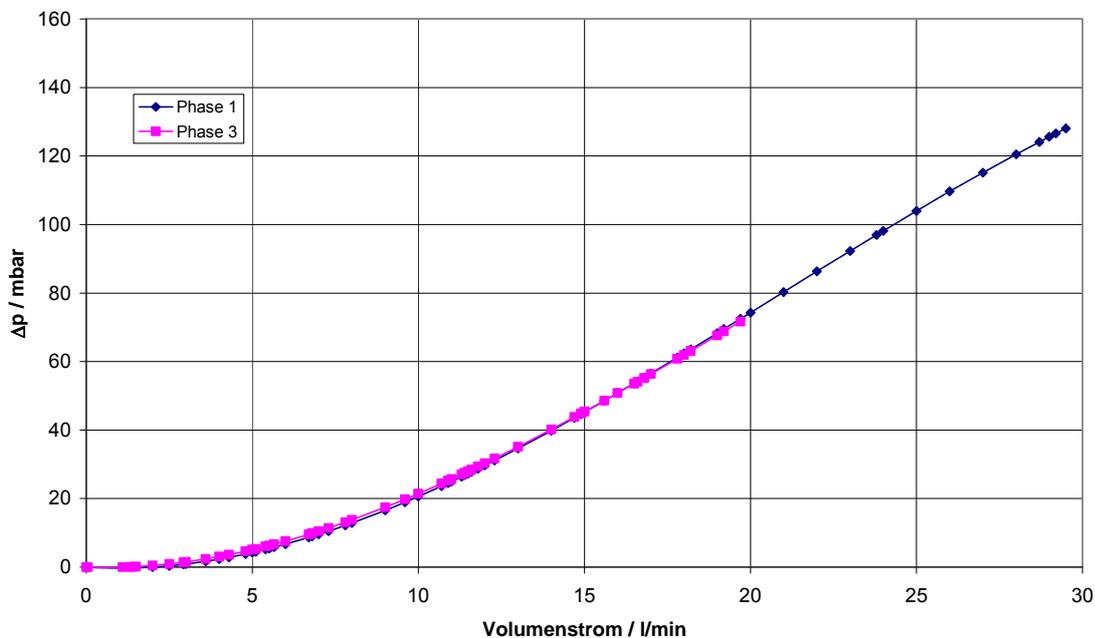
**Bild 23: Dauerlauf der Pumpen, T = 80 °C, PWM = 75 %, Volumenstrom an unterschiedlichen Messtagen**



**Bild 24: Dauerlauf der Pumpen, T = 80 °C, PWM = 75 %, Druck an unterschiedlichen Messtagen**



In Phase 3 wurden abschließend Pumpenkennlinien für die Startphase mit der identischen Betriebsweise wie in Phase 1 aufgenommen, so dass der Einfluss der Dauerbelastung auf die Leistungsfähigkeit der Pumpen ermittelt werden konnte. Bild 25 zeigt die Pumpenkennlinie für eine Pumpe bei  $T_{KS} = +80\text{ °C}$  vor und nach der Dauerbelastung im Vergleich. Bei identischem Lastpunkt ( $PWM = 90\%$ ) konnte lediglich eine Druckerhöhung von ca. 70 mbar bei einem Volumenstrom von ca. 20 l/min erzielt werden. Die entsprechenden Daten aus Phase 1 waren ca. 130 mbar und ca. 28 l/min. Es wird deutlich, dass durch den Dauerbetrieb bei erhöhter Temperatur eine Reduktion der Leistungsfähigkeit in der Startphase der Pumpen auftritt. Diese Abweichungen können zum Teil durch eine geeignete Regelungsstrategie kompensiert werden. In weiteren Untersuchungen im Klimaschrank kann die Ausweitung der Dauerbelastungseinflüsse z.B. auch auf den stationären Betrieb ermittelt werden.



**Bild 25: Kennlinien basierend auf Trendlinie (80 °C, Phase 1 und 3)**

### 2.1.3.2 Gesamtsystem

In AP18 *Entwicklungsanpassung an Feldtestobjekte* wurde ein Feldtestsystem im Klimaschrank betrieben, um Erkenntnisse zum Systemverhalten bei wechselnden klimatischen Bedingungen zu gewinnen. Im Fokus standen dabei die Ermittlung von tatsächlichen Grenztemperaturen und die Ermittlung von kritischen Komponenten unter thermischer Belastung sowie bei wechselnder Luftfeuchtigkeit. In Zusammenarbeit mit enymotion wurden zunächst Klimaprofile definiert, die einen Temperaturbereich von  $-20\text{ °C}$



bis + 50 °C sowie einen Luftfeuchtigkeitsbereich bis 95 % rel. Feuchte beinhalten und somit typische Grenzanforderungen für das System darstellen. ZBT führte des Weiteren vorbereitende Arbeiten zur Integration des Systems in den Klimaschrank durch. In Kooperation mit enymotion wurde das Feldtestsystem installiert, in Betrieb genommen und schließlich unter den definierten Bedingungen autark betrieben. Es konnten sowohl Einflüsse der Temperatur als auch der Luftfeuchtigkeit auf den Systembetrieb festgestellt werden. Detaillierte Ergebnisse aus den Messungen werden im entsprechenden Bericht des Konsortialpartners enymotion dargestellt. Der Testaufbau ist in Bild 26 bis Bild 29 dargestellt.

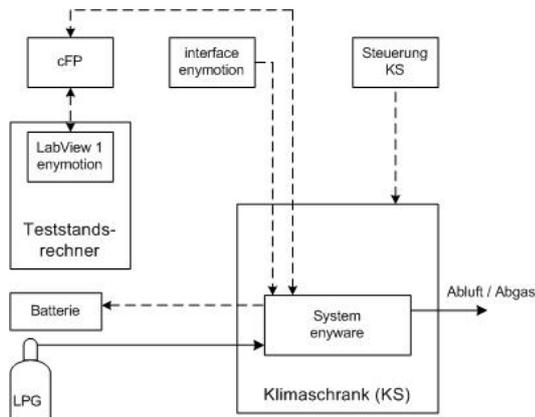
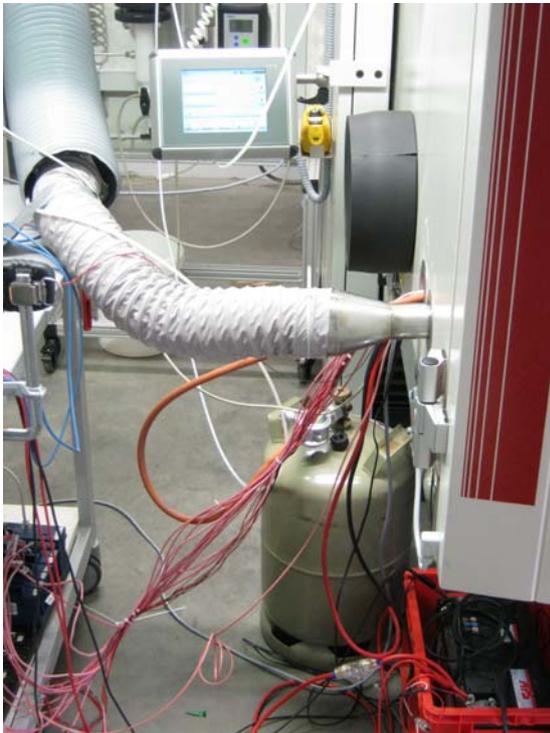


Bild 26: Schema Testaufbau

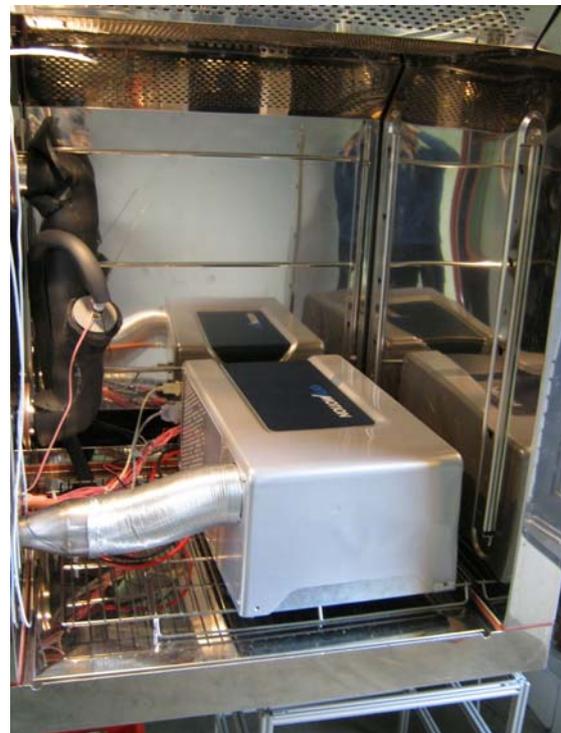


Bild 27: Bedienteil Klimaschrank, Graph T u.  $\varphi$





**Bild 28: Schnittstellen außerhalb Klimaschrank**



**Bild 29: System im Klimaschrank**

#### 2.1.4 Brennstoffzellenverspannung (Kraft-Weg-Messung)

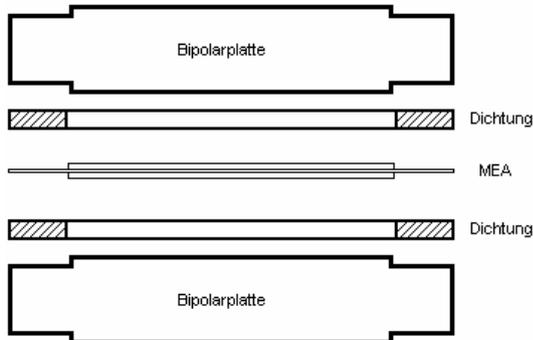
In AP 16 *Entwicklungsunterstützung Systemanpassung* wurden Kraft-Weg-Messungen an Brennstoffzelleneinzelkomponenten (Bipolarplatten, Dichtungen und Membranelektrolyt-Einheiten MEA) mit Hilfe einer am ZBT vorhandenen Versuchsapparatur durchgeführt.

Ziel der Messungen war es z.B., die erforderlichen Anzugsdrehmomente für die Schrauben zur Verspannung des Stacks zu ermitteln und die Endplattengeometrie entsprechend zu optimieren. Eine optimale Anpresskraft liegt laut Angaben eines MEA-Herstellers z.B. bei einer Kompression von minimal 10 % bis maximal 20 % vor. Innerhalb dieser Grenzen kann einerseits eine optimale elektrische Kontaktierung sichergestellt und andererseits eine Überkompression und damit eine bleibende Schädigung der MEA vermieden werden. Eine Variationsgröße zur Anpassung der Anpresskraft zwischen Dichtung und MEA ist neben dem Anzugsdrehmoment z.B. auch die Tiefe der Senkung für die Dichtungen in der Bipolarplatte.

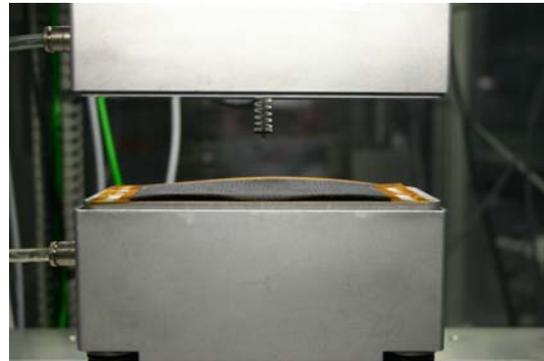
In Bild 30 ist das Schema des Zellaufbaus bestehend aus zwei Bipolarplatten mit MEA und Dichtungen dargestellt. Das Sandwich, bestehend aus Dichtung/MEA/Dichtung, wird



zwischen zwei Bipolarplatten gelegt und mittels der Versuchsanordnung (Bild 31) definiert komprimiert.



**Bild 30: Schematischer Aufbau Einzeller**



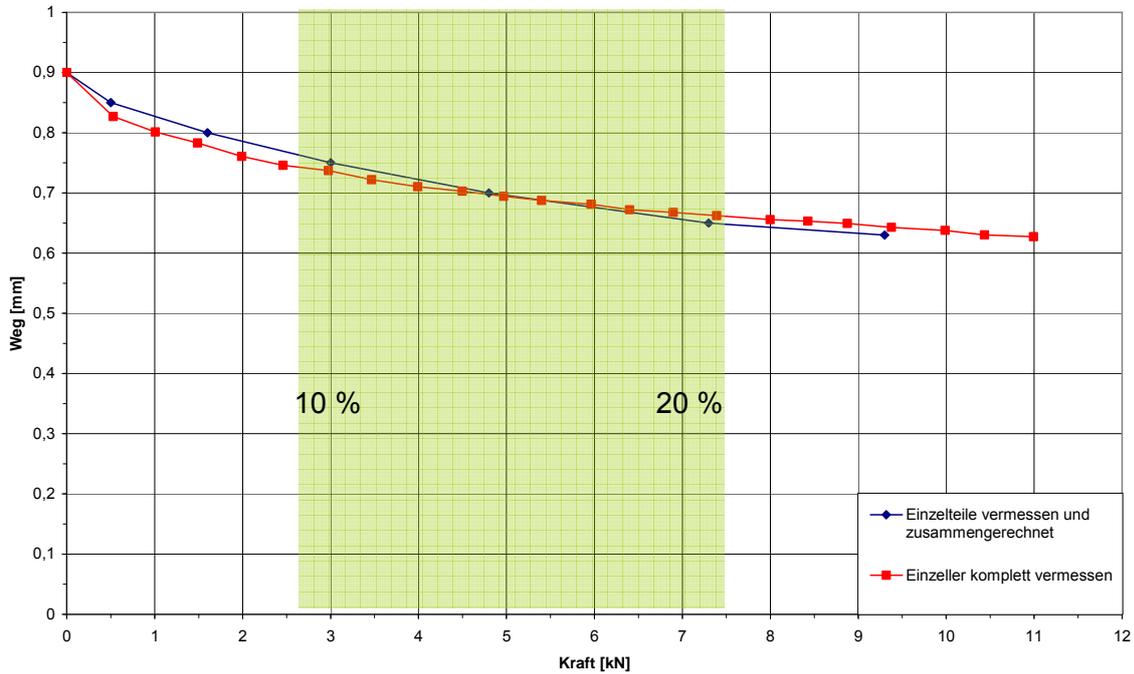
**Bild 31: Versuchsanordnung**

#### 2.1.4.1 Kraft-Weg-Messung bei Raumtemperatur

Die Dichtung und die MEA wurden zunächst bei Raumtemperatur getrennt voneinander vermessen und anschließend zu einem Einzelzellen kombiniert und als Sandwich erneut vermessen. In Bild 32 ist das resultierende Kraft-Weg-Diagramm für einen Einzelzellen dargestellt. Der Weg  $x$  ist das Maß für den Abstand der zwei Bipolarplatten und beträgt in dem dargestellten Fall ohne Aufprägung einer Kraft ( $F = 0 \text{ kN}$ )  $0,9 \text{ mm}$ . Mit steigender Kraft werden die flexiblen Komponenten (Dichtung und MEA) verformt, was eine Reduktion des Abstandes zur Folge hat. Der gekennzeichneten Bereich ( $2 - 7 \text{ kN}$ ) zeigt die Grenzen zwischen  $10$  und  $20 \%$  Reduktion der Membrandicke und somit die erforderliche Gesamtanpresskraft, woraus die Anzugsmomente für die Schrauben abgeleitet werden können.

Die in Bild 32 dargestellten Kurvenverläufe zeigen ebenfalls, dass durch separate Vermessung der Einzelkomponenten und anschließender Addition der Kräfte vergleichbare Ergebnisse, wie bei der Vermessung des gesamten Einzelzellen erzielt werden können und dass somit die Einzelbetrachtung theoretisch ausreicht. Die Vermessung der Einzelkomponenten können insgesamt wichtige Hinweise zum Design des Stacks liefern.

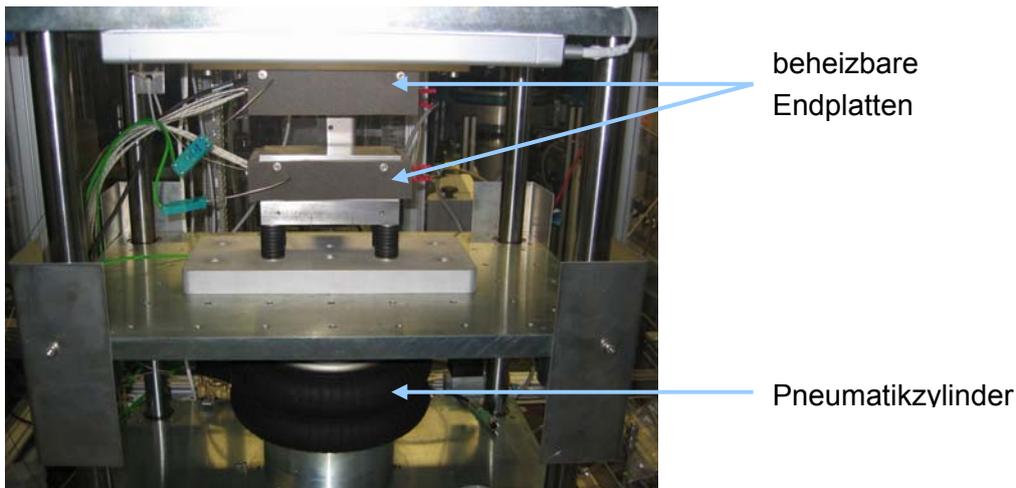




**Bild 32: Kraft-Weg-Diagramm Einzelner**

**2.1.4.2 Kraft-Weg-Messung bei Betriebstemperatur von 160 °C**

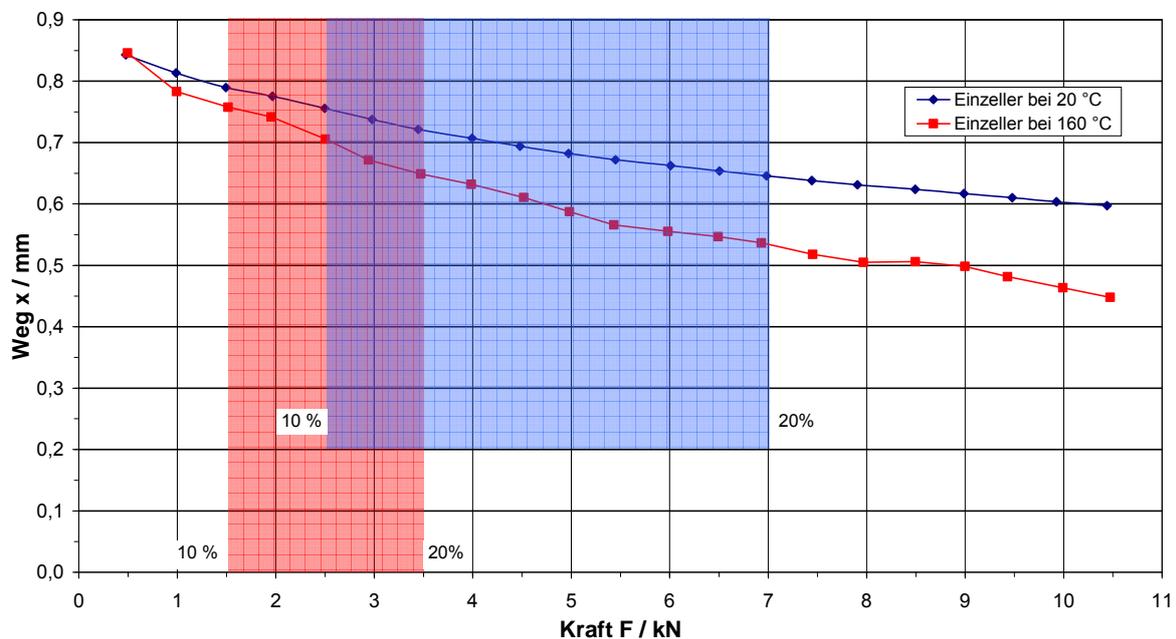
Die am ZBT vorhandene Versuchsapparatur (siehe Bild 33) wurde durch Ergänzung von beheizbaren Endplatten so umgerüstet, dass alle Komponenten bei Temperaturen von bis zu 180 °C untersucht werden können. Dadurch ist es möglich, das Kraft-Weg-Verhalten bei der tatsächlichen Betriebstemperatur einer HT-PEM-Brennstoffzelle zu ermitteln.



**Bild 33: Messapparatur zur Kraft-Weg-Messung bei 160 °C bis 180 °C**



Es wurden vergleichende Messungen bei Raumtemperatur und bei einer typischen Betriebstemperatur von 160 °C durchgeführt. Die separate Vermessung der Dichtung hat ergeben, dass keine nennenswerte Temperaturabhängigkeit der Wegänderung besteht. Messungen eines Einzellern, der aus der Kombination Bipolarplatten, Dichtungen und MEA besteht, zeigen hingegen eine deutliche Temperaturabhängigkeit, wie aus Bild 34 hervorgeht. Der Weg  $x$  beträgt in dem dargestellten Fall ohne Aufprägung einer Kraft ( $F = 0$  kN) ca. 0,85 mm. Der rot gekennzeichneten Bereich zeigt die Grenzen der empfohlenen Anpresskraft ( $F = 1,5 - 3,5$  kN) für 160 °C. Im Vergleich zu der Kraft-Weg-Abhängigkeit bei Raumtemperatur (blauer Bereich) ist hier eine deutlich geringere Anpresskraft erforderlich. Ebenso ist der Kraftbereich geringer, so dass eine optimale Auslegung der Bipolarplatten-Geometrie für die erhöhte Temperatur durchzuführen ist.



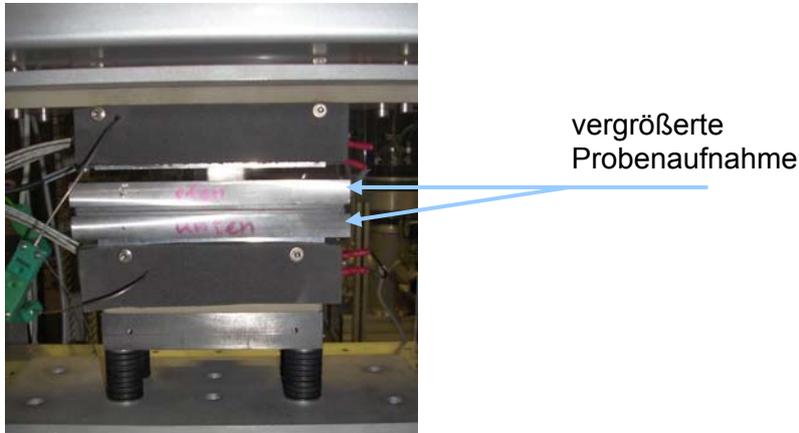
**Bild 34: Kraft-Weg-Diagramm Einzellern, Vergleich von Raumtemperatur und Betriebstemperatur (160 °C)**

### 2.1.4.3 von enymotion optimierte Komponenten

Im Laufe der Entwicklung wurden seitens enymotion Brennstoffzellenkomponenten, wie z.B. Bipolarplatten und Stack-Dichtungen weiter optimiert und unterschiedliche Membranelektrolyteinheiten (MEA) bewertet. Daher wurden zusätzliche Kraft-Weg-Messungen an den neuen Komponenten durchgeführt. Aufgrund der geänderten Geometrie war eine erneute Anpassung der am ZBT vorhandenen Messapparatur erforderlich. Im Speziellen erfolgten eine Vergrößerung der Probenaufnahmenfläche (siehe Bild 35) sowie eine Anpassung und



Justage der Kraft-Weg-Sensorik an die geänderte Geometrie. Weiterhin ist eine Temperierung der Komponenten bis zu 180 °C möglich.



**Bild 35: Messapparatur zur Kraft-Weg-Messung bei Temperaturen bis 160 °C**

Es wurden wiederum vergleichende Messungen bei Raumtemperatur und bei einer typischen Brennstoffzellen-Betriebstemperatur von 160 °C für zwei unterschiedliche MEA's (a und b) durchgeführt. Messungen von zwei Einzellern zeigen nur eine geringe Temperaturabhängigkeit. Wie aus Bild 36 hervorgeht, verläuft die Wegänderung über einen weiten Kraftbereich für beide Temperaturen nahezu parallel. Aufgrund dessen ist für beide Temperaturen zum einen ein ähnlicher Bereich und darüber hinaus ein weiterer Bereich des Anzugsmomentes gültig. Zudem verhalten sich beide MEA's ähnlich. Die absoluten Unterschiede sind in der unterschiedlichen Anfangsdicken begründet.



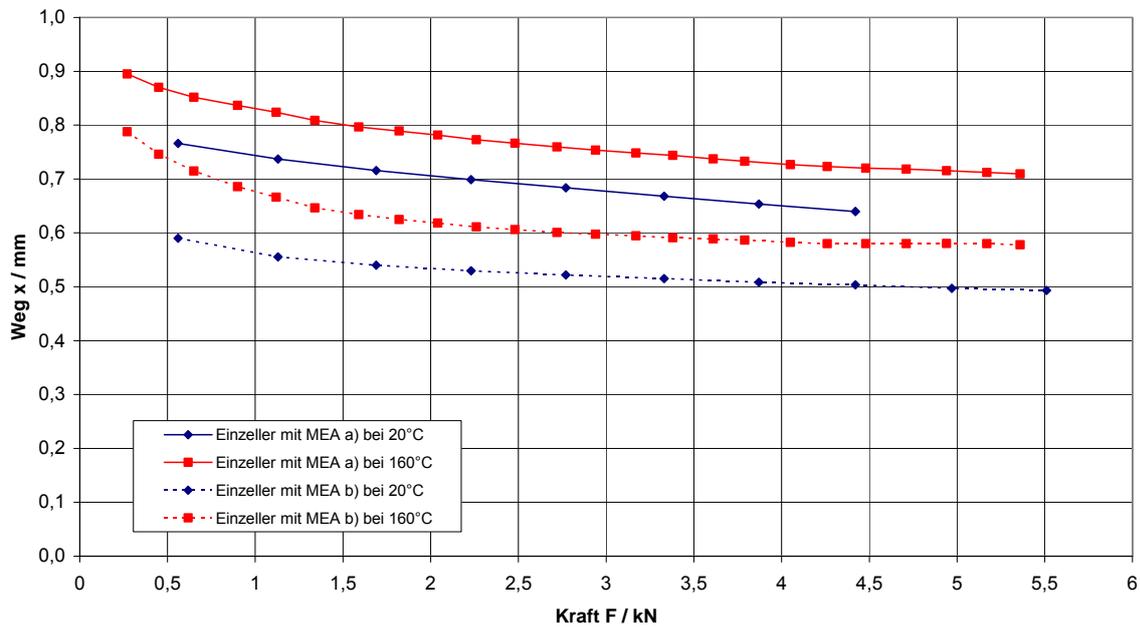
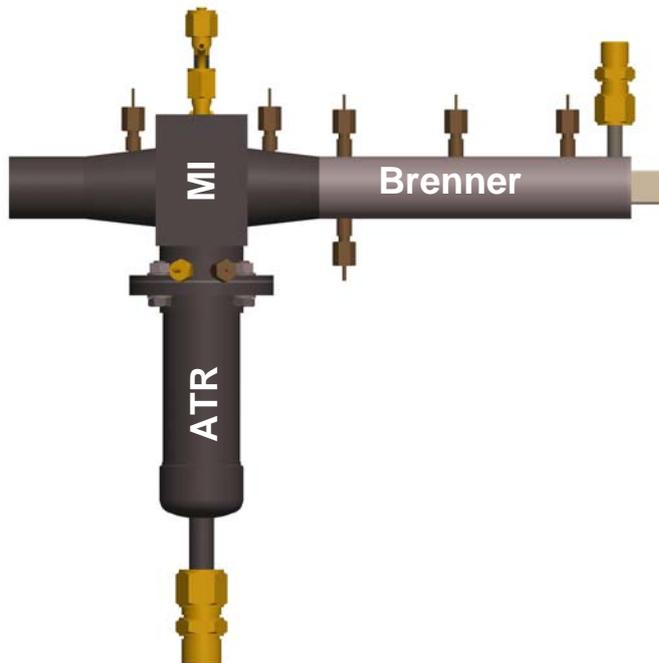


Bild 36: Kraft-Weg-Diagramm Einzeller, Vergleich der Temperaturen unterschiedliche MEA's

### 2.1.5 Untersuchung der Gemischbildung

In AP19 *Qualifikation verbesserter Komponenten* wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Vergleich von zwei unterschiedlichen Mischungsoptionen von Flüssiggas (Propan) mit den übrigen Eduktmedien (Luft, Wasser, Stickstoff) vor dem ATR-Reaktor durchgeführt. Hierzu wurde in Absprache mit enymotion ein Testreaktor entworfen, konstruiert und aufgebaut, der den für diese Fragestellung relevanten Teil des verbesserten Gasprozessors abbildet. Der Testreaktor (siehe Bild 37) beinhaltet neben den dargestellten Hauptkomponenten Brenner, Mischer (MI) und autothermer Reformier (ATR) zudem eine Mischstelle für Propan innerhalb des Mischers und eine weitere Mischstelle außerhalb des Testreaktors in einem Abstand von ca. 30 cm vor dem Mischer.



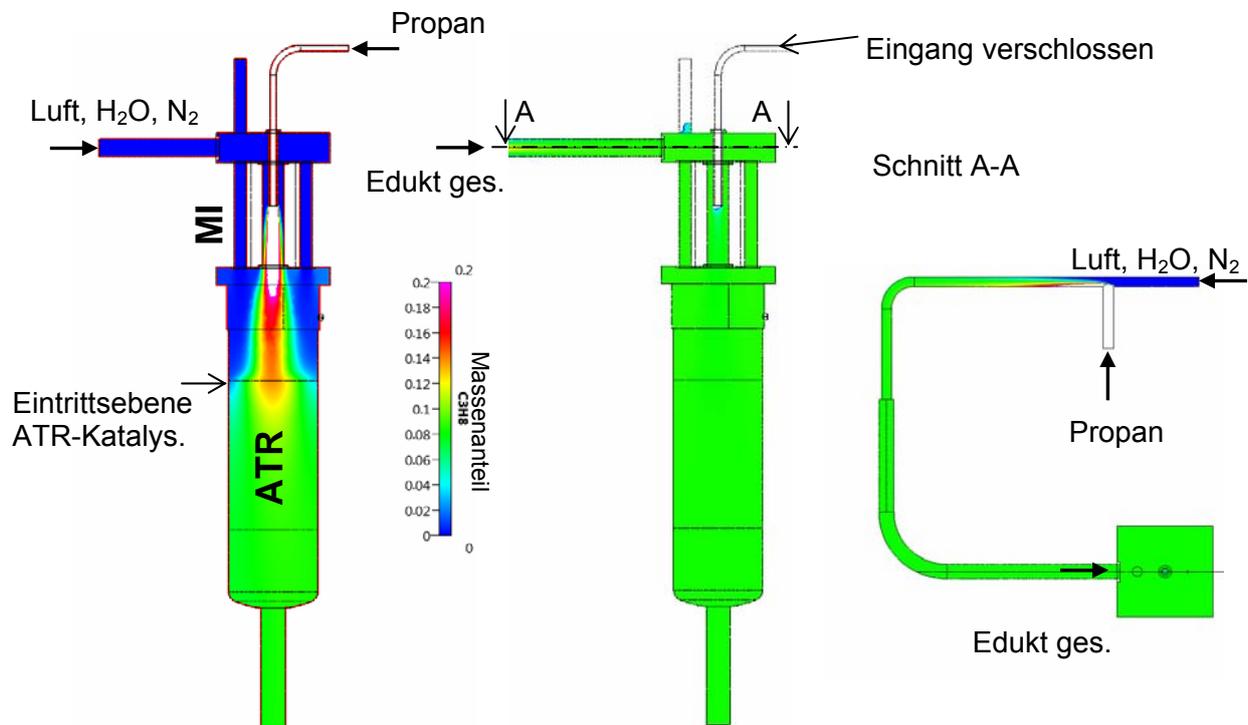


**Bild 37: Testreaktor zur Untersuchung der Mischung**

### 2.1.5.1 CFD-Simulation der Strömung

Die Modellierung der Strömungsverhältnisse für beide Mischungsoptionen erfolgte mit der CFD-Simulationssoftware CFD-ACE + von ESI. Es erfolgten zunächst die Überführung des Konstruktionsmodells in die CFD-Software sowie die entsprechende Vernetzung der relevanten Bereiche des Testreaktors. Anhand des Strömungsmodells konnten u.a. Strömungsgeschwindigkeiten, Druckverluste und Mischungsverhältnisse innerhalb des Reaktors ermittelt werden. Bild 38 zeigt als wesentliches Ergebnis der Betrachtungen den Propanmassenanteil für beide Mischungsoptionen unter den im realen System vorherrschenden Betriebsbedingungen. Es ist zu erkennen, dass bei einer internen Mischung (links) eine deutliche Inhomogenität des Eduktgemisches vor Eintritt in den ATR-Reaktor vorliegt. Die Zudosierung des Propan außerhalb des Testreaktors führt hingegen zu einer sehr homogenen Mischung. Der gewünschte Massenanteil von Propan am Eintritt des Reaktors beträgt ca. 8,2 %, was der grünen Färbung in der Darstellung entspricht.





**Bild 38: CFD-Simulationsergebnis zum Propanmassenanteil im Eduktgemisch: links interne Mischung, Mitte externe Mischung, rechts externe Mischung Zuführungsleitung**

### 2.1.5.2 Messung

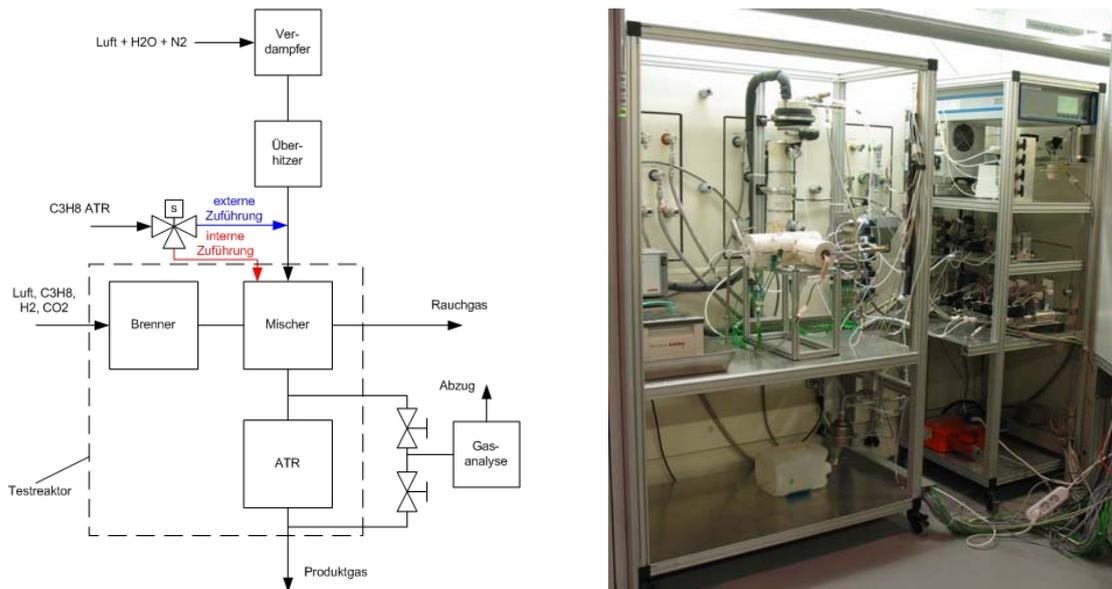
Im experimentellen Teil der Untersuchungen wurde ermittelt, welchen Einfluss die geänderte Zudosierung auf die Produktgaszusammensetzung des ATR-Reaktors hat. Die Untersuchungen wurden für eine Eduktgaszusammensetzung entsprechend des Nennlastpunktes durchgeführt.

Der oben beschriebene Testreaktor wurde in einen Teststand integriert. Bild 39 zeigt den schematischen Versuchsaufbau sowie ein Foto des Teststandes. Die Propanzuführung kann im laufenden Betrieb wechselseitig intern und extern realisiert werden. Die Dosierung der Edukte erfolgt über Mass-Flow-Controller. Die Medienkonditionierung für den ATR wird über einen Verdampfer mit anschließender Überhitzung realisiert, so dass die im realen System vorherrschenden Betriebsbedingungen synthetisch eingestellt werden können. Die Steuerung der Medienzufuhr sowie der erforderlichen Temperaturen erfolgt über die Software LabView. Die Produktgaszusammensetzung wird im getrockneten Produktgas mittels Gasanalyse mit integriertem Wärmeleitfähigkeitsdetektor für  $H_2$  und nicht-dispersiven



Infrarotsensoren zur Detektion von  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{CO}_2$  bestimmt. Der Messaufbau erlaubt eine Analyse sowohl vor als auch hinter dem Reformer.

Das Anodenabgas der Brennstoffzelle, welches das Eduktgas für den Brenner darstellt, wird durch ein Gemisch aus  $\text{H}_2$  und  $\text{CO}_2$ , das in Volumenstrom und Leistung in etwa dem zu erwartenden realen Anodenabgas entspricht, substituiert.

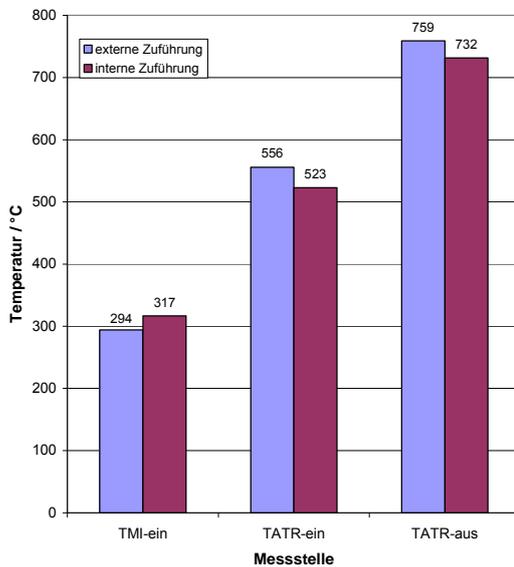


**Bild 39: Versuchsaufbau schematisch und Foto des Teststandes**

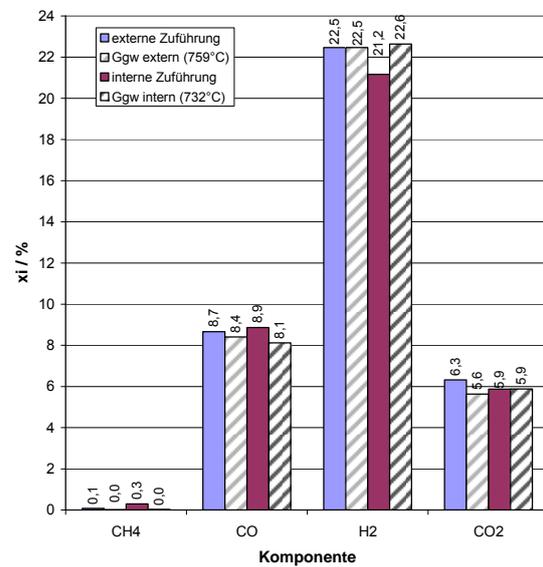
In Bild 40 sind für den Nennbetriebspunkt die aus der Umschaltung der Propanzufuhr resultierenden Temperaturen dargestellt. Während die Temperatur vor dem Mischer (TMI-ein) bei einem Wechsel von externer zu interner Zuführung von  $294\text{ °C}$  um  $23\text{ K}$  steigt, fallen die Temperaturen am Austritt des Mixers (TATR-ein) von  $556\text{ °C}$  um  $33\text{ K}$  und am Austritt des ATR (TATR-aus) von  $759\text{ °C}$  um  $27\text{ K}$ . Bild 41 verdeutlicht die Auswirkungen auf die Produktgaszusammensetzung des ATR. Nach Umschalten von externer auf interne Propanzuführung sinkt der  $\text{H}_2$ -Anteil im Produktgas z.B. von  $22,5\%$  auf  $21,2\%$ , während die  $\text{CH}_4$ -Konzentration von  $0,1\%$  auf  $0,3\%$  ansteigt. Im Vergleich zu dem möglichen thermodynamischen Gleichgewicht für die jeweils zugehörige Temperatur (TATR-aus) zeigt sich für die externe Zufuhr eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten von  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  und  $\text{H}_2$ . Der  $\text{CO}_2$ -Anteil weist einen Unterschied von ca.  $0,7\%$  auf. Bei der internen Zufuhr ist zu erkennen, dass der theoretische  $\text{H}_2$ -Anteil um ca.  $1,4\%$  höher liegt als der gemessene, hingegen der  $\text{CH}_4$ - sowie der  $\text{CO}$ -Anteil niedriger liegen. Der theoretische  $\text{CO}_2$ -Anteil entspricht genau dem gemessenen. Insgesamt weisen die Messergebnisse und der



Vergleich mit dem theoretischen Gleichgewicht auf einen unvollständigen Umsatz bei der internen Zufuhr von Propan hin.



**Bild 40: Temperaturen bei Umschaltung der Propanzuführung**



**Bild 41: Produktgaszusammensetzung hinter dem ATR bei Umschaltung der Propanzuführung**

Die vorliegenden Untersuchungen haben somit gezeigt, dass die Art der Zuführung von Propan in den ATR (extern gegenüber intern) einen Einfluss auf die Produktgaszusammensetzung hat.

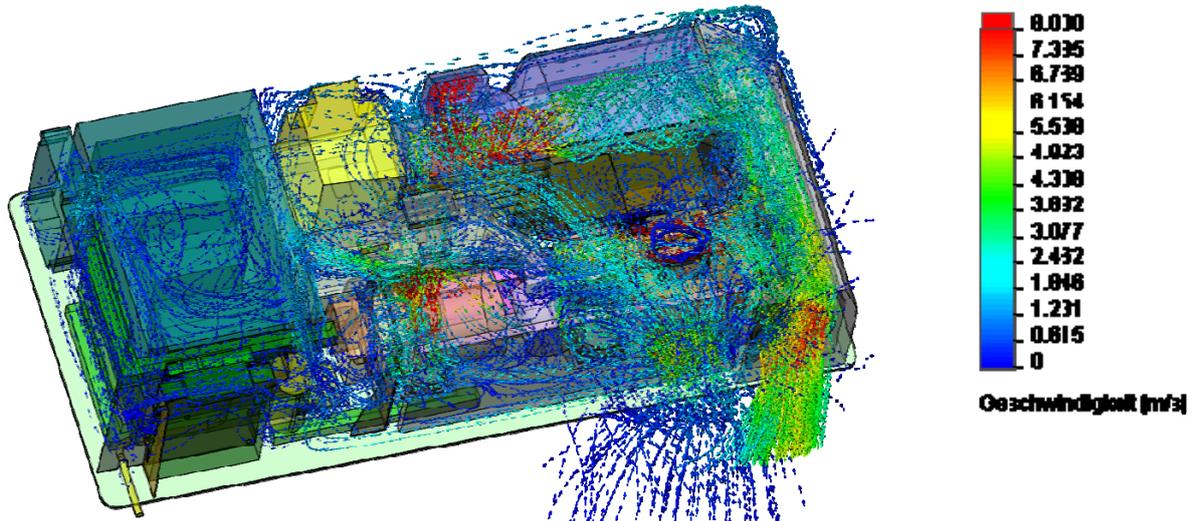
## 2.1.6 Untersuchung der Strömung im Gehäuse

In AP19 *Qualifikation verbesserter Komponenten* wurden weitere theoretische Untersuchungen zur Bewertung der Strömung durchgeführt. Unterschiedliche Komponenten des Gesamtsystems werden durch Luft gekühlt, zudem ist aus sicherheitstechnischen Aspekten eine ausreichende Belüftung des Gehäuses erforderlich. Im Laufe der Entwicklung wurden Schwachstellen aufgedeckt, an denen aufgrund unzureichender Strömung z.B. eine Überhitzung von Ventilen stattgefunden hat. Die genaue Lokalisierung und die anschließende Optimierung dieser Bereiche wurden mit Hilfe einer entsprechenden Strömungssimulation für das Gehäuse seitens ZBT begleitet.

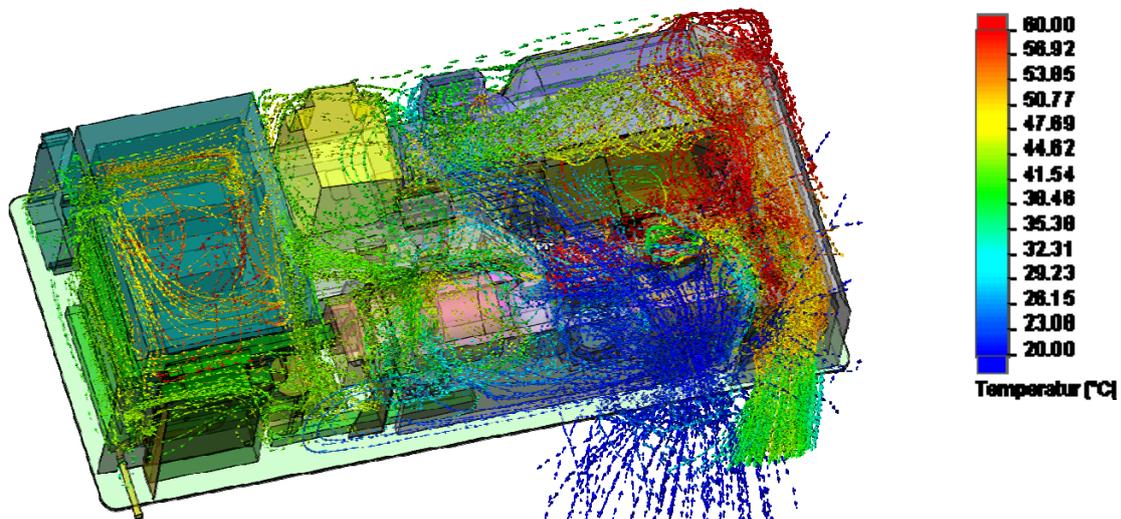
Hierzu erfolgte wiederum die Anpassung, die Vereinfachung sowie die Überführung der von enymotion vorgegebenen Geometrie in die Simulationssoftware (CFD-ACE + von ESI) und schließlich die Vernetzung des Modells. Die Vereinfachungen wurden in enger Absprache mit enymotion vorgenommen.



Eine Simulation der Durchflussbahnen wurde unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung durchgeführt. Anhand der Ergebnisse konnten die Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen im Gesamtsystem abgeleitet werden (siehe Bild 42 und Bild 43).



**Bild 42: Durchflussbahnen mit Geschwindigkeit**



**Bild 43: Durchflussbahnen mit Temperatur**

Die Auswertung der Simulationsergebnisse hat die erwarteten Auswirkungen der im Zuge des Redesigns getroffenen Optimierungen bestätigt. Die zuvor problematischen, hohen Temperaturspitzen an den Ventilen scheinen behoben zu sein. Die Strömung und



Wärmeübertragung am Reformer ist in ausreichendem Maße vorhanden, auch scheint die Temperaturverteilung beim Start und Stopp des Systems unproblematisch zu sein.

### **2.1.7 Untersuchung der Strömung im Gasprozessor**

Der Gasprozessor des Brennstoffzellensystems enthält Einbauten, die im Laufe der Entwicklung optimiert wurden, um die Funktion zu verbessern und den Strömungswiderstand zu minimieren. Zur theoretischen Begleitung von AP 19 *Qualifikation verbesserter Komponenten* wurden Strömungssimulationen mit Hilfe der Software ANSYS FLUENT® durchgeführt, die z.B. Auskunft über die Homogenität der Anströmung der Reaktoren geben.

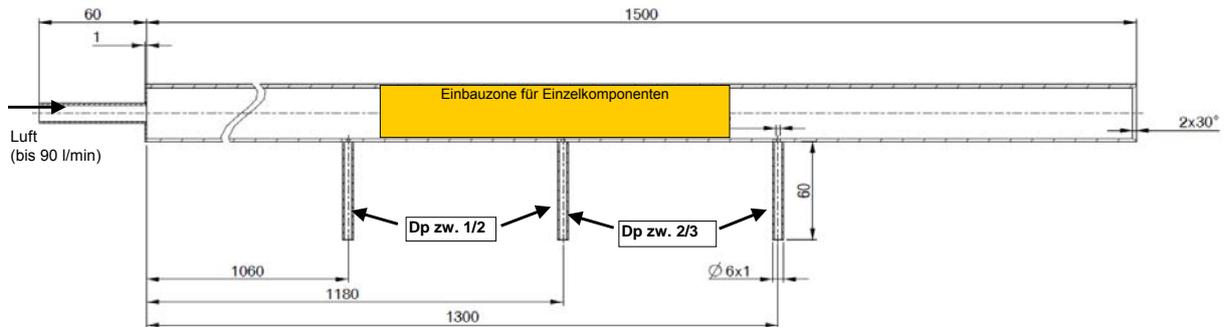
Mit Hilfe einer Prozess-Simulationssoftware wurde ein thermodynamisches Prozessmodell aufgebaut, aus dem die Stoffeigenschaften der Gemische ermittelt und die Messergebnisse aus Experimenten bewertet werden können. Durch Minimierung der Gibbs Energie werden hierin die Gleichgewichtszusammensetzungen für jede Reaktionsstufe errechnet und somit jeweils der theoretische Bestfall aufgezeigt. Die ermittelten Stoffdaten fließen direkt in die Strömungssimulation ein.

Des Weiteren wurden als Grundlage für die Strömungssimulation Druckverlustmessungen von Einzelkomponenten wie z.B. Katalysatoren durchgeführt.

#### **2.1.7.1 Druckverlustmessung Einzelkomponenten**

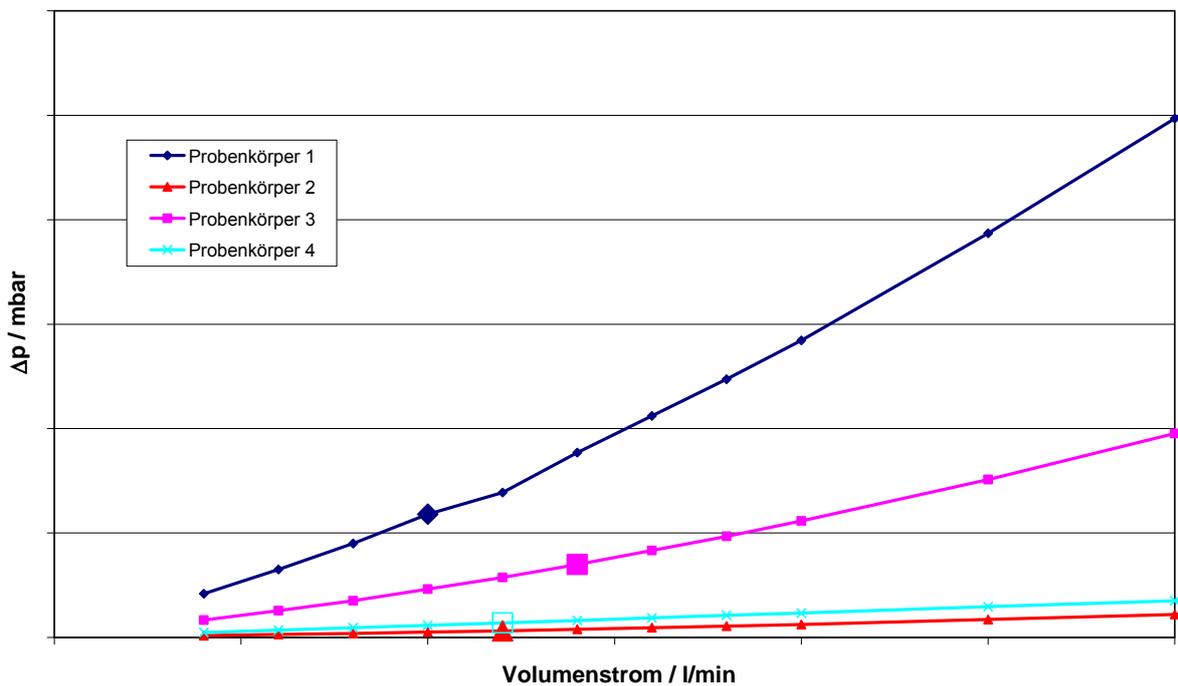
Anhand des durch die thermodynamische Simulation gegebenen Volumenstroms und der Stoffeigenschaften erfolgte die Auslegung eines idealen Messrohres zur Druckverlustmessung. Hierzu wurde eine Näherungsgleichung für die Mindest-Einlauflänge für ein ideal ausgebildetes Strömungsprofil aus [4] angewendet, die die vorherrschende Reynolds-Zahl sowie den Rohrdurchmesser berücksichtigt. In Bild 44 ist der Aufbau des Messrohres zur Druckverlustbestimmung dargestellt. Die Mindest-Einlauflänge beträgt 1060 mm. An dieser Stelle ist die erste Druckmessöffnung angebracht. In einem Bereich von 240 mm besteht die Möglichkeit, Probenkörper in das Messrohr einzubringen und die Druckdifferenz zu messen.





**Bild 44: Aufbau Messrohr zur Druckverlustbestimmung**

Es liegen insgesamt die 4 Probenkörper vor, die separat in das Rohr eingebracht und mit Luft als Ersatzmedium durchströmt wurden. Der volumenstromabhängige Druckverlust für die im aktuellen Aufbau enthaltenen Einbauten ist in Bild 45 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der größte Druckverlust z.B. durch Probenkörper 1 hervorgerufen wird. Der Gesamtdruckverlust des Systems ergibt sich rechnerisch, in dem die Druckverluste der Einzelkomponenten entsprechend ihrer Anzahl im System summiert werden.



**Bild 45: Volumenstromabhängiger Druckverlust der Einzelkomponenten**



Die Berechnung der den realen Prozessgasvolumenströmen äquivalenten Luftvolumenströme erfolgt mit Hilfe eines Reynolds-Zahl-Vergleiches, der besagt, dass bei identischer Reynolds-Zahl ähnliche Strömungseigenschaften vorliegen. Die Reynolds-Zahl der Gasströmung des Prozessgases wird jeweils mit den aus der Aspen-Simulation gegebenen Daten und unter Berücksichtigung der vorliegenden Geometrie abschnittsweise berechnet. In Bild 45 sind die Ergebniswerte als Mittelwerte von Eintritt und Austritt der jeweiligen Komponente hervorgehoben dargestellt. Der mit Hilfe dieser abschnittswisen Betrachtung berechnete Gesamtdruckverlust stimmt in befriedigender Weise mit den gemessenen Werten im realen Gasprozessor überein.

### 2.1.7.2 CFD-Simulation der Strömung

Die von enymotion vorgegebene Geometrie des Reformers wurde in das Simulationsmodell für die Strömungsberechnung übertragen. Die folgenden Randbedingungen und Vereinfachungen wurden definiert:

- die modellierte Geometrie ist auf  $\frac{1}{2}$ -Kreis beschränkt, wobei entlang des X- und Z-Schnittes offene Konturen vorherrschen (keine Wände)
- der Eintritt die Reaktoren wird radial in 5 Flächensegmente unterteilt. Die Bewertung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt hierbei jeweils flächengemittelt
- Stoffeigenschaften und Massenstrom werden aus der thermodynamischen-Prozesssimulation übernommen
- überwiegend laminares Strömungsmodell
- Einbauten besitzen isotrope und homogene Eigenschaften
- der Widerstandskoeffizient  $1/\alpha$  der Einbauten wurde mit den oben ermittelten Druckverlusten bestimmt
- für die Simulation werden insgesamt vier Fälle unterschieden

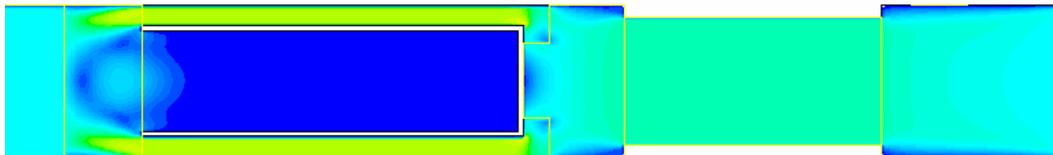
Jedes Bauteil besitzt einen viskosen Widerstandskoeffizienten  $1/\alpha$  und einen Trägheitswiderstandskoeffizienten  $C_2$ , die in der Strömungssimulation ein Maß für die Beschreibung des Druckabbaus eines porösen Körpers sind. Mit den Beziehungen aus [12] für poröse Körper wurden unter zu Hilfenahme der geometrischen Daten und der ermittelten Druckverlustkurven mit den Koeffizienten  $a$  und  $b$  die in Tabelle 3 aufgelisteten Parameter bestimmt.



**Tabelle 3: Widerstandskoeffizienten der Probenkörper**

Medium Luft	Probenkörper			
	1	2	3	4
a / -	1,96E-02	9,41E-04	7,69E-03	8,98E-05
b / -	1,0764	4,57E-02	4,25E-01	1,16E-01
$1/\alpha$ / m <sup>2</sup>	1,76E+09	1,01E+09	2,11E+09	6,02E+08
$C_2$ / m <sup>-1</sup>	1,91E+04	2,50E+04	2,28E+04	5,63E+02

Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit für den Fall 1 ist in Bild 46 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch Einbauten hervorgerufene Querschnittsverengungen maximale Strömungsgeschwindigkeiten (gelber Bereich) zur Folge haben. Im weiteren Verlauf findet wieder eine Vergleichmäßigung der Strömungsgeschwindigkeit statt, so dass am Eintritt in den Reaktor ein nahezu homogenes Geschwindigkeitsprofil (gleichmäßige Färbung über dem Querschnitt) erreicht werden kann.


**Bild 46: Geschwindigkeitsverteilung in X-Richtung**

Zur weiteren Betrachtung dieses Effektes sind in Bild 47 die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{mittel,i}$  am Eintritt in einen Reaktor für die vier unterschiedlichen Fälle dargestellt. Für den Fall 1, Fall 2 und Fall 4 (Teillast) ist über alle Segmente eine nahezu konstante Geschwindigkeit zu erkennen, was in einer gleichmäßigen Ausnutzung der Katalysatoren resultiert. Betrachtet man den Fall 3, dann zeigt sich eine deutliche Änderung des Profils. Im Segment 4 ist ein Maximum zu erkennen, Minima liegen in Segment 1 und 5 also in der Mitte und am Rand des Reaktors. Dieser Aufbau ist demnach nicht zu empfehlen.



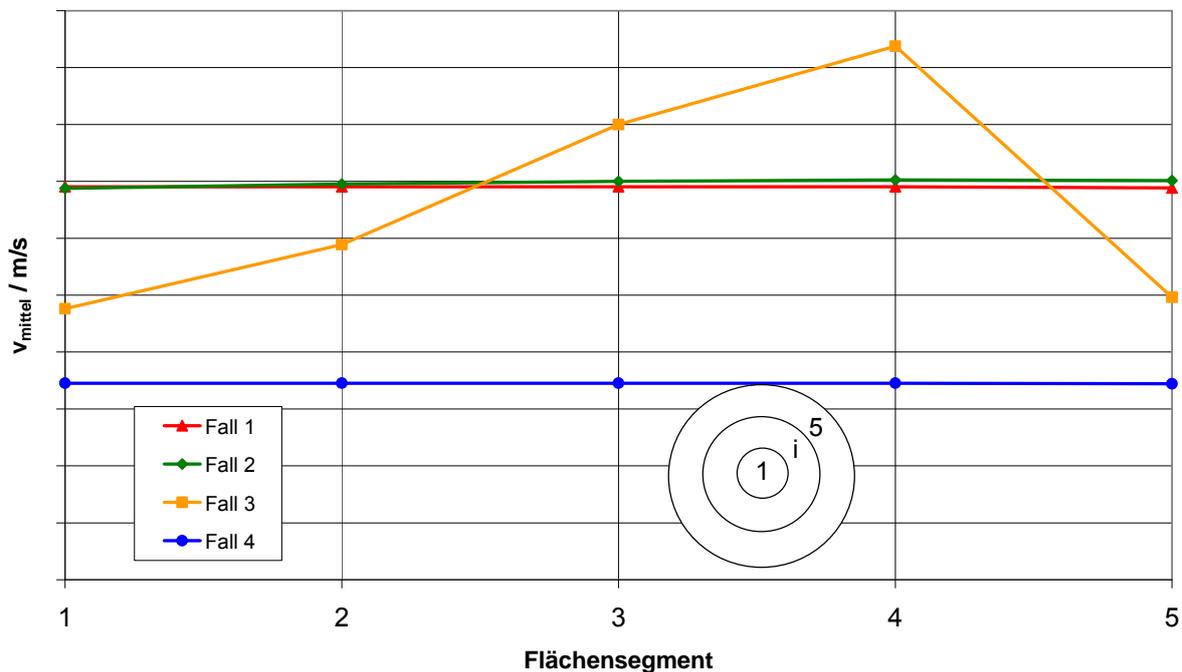


Bild 47: Mittlere Strömungsgeschwindigkeit je Flächensegment für Fall 1 - 4, Eintritt Reaktor

## 2.2 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dieses Vorhabens weisen mit CFD-Simulationen, gaschromatographischen Analysen, experimentellen Arbeiten zur Entschwefelung, Gasprozessor, Brennstoffzelle und deren Komponenten sowie Klimaprüfungen von Bauteilen und Gesamtsystem ein breites Spektrum auf. Die Arbeiten sind im Projektverlauf kontinuierlich an die wissenschaftlich-technischen Fragestellungen des Projektpartners enymotion angepasst worden. Die generierten Ergebnisse konnten unmittelbar in die parallel durchgeführten Entwicklungsarbeiten des Partners einfließen, wodurch eine direkte Nutzung und Verwertung der Ergebnisse erfolgte. Somit dienen die Ergebnisse einerseits als innovativer Schritt der technischen Weiterentwicklung und andererseits zur Schaffung von Entscheidungsgrundlagen für die Weiterentwicklungen des Projektpartners enymotion.

ZBT betätigt sich als unabhängige und anwendungsorientierte Forschungseinrichtung im Wesentlichen als Entwicklungsdienstleister für Unternehmen sowohl als direkter Auftragnehmer als auch als Projektpartner in öffentlich geförderten Projekten. Die in diesem Vorhaben durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten mit den erlangten



Ergebnissen stärken und erweitern signifikant das FuE-Portfolio von ZBT in einem breiten Themenspektrum. Die weitere Verwertung der spezifischen Ergebnisse erfolgt bereits in neuen FuE-Projekten, z.B.:

- Qualifizierung eines ATR-Gasprozessors zur Wasserstofferzeugung
- CFD-Modellierung zur Strömungssimulation für eine Entschwefelungseinheit
- Entwicklung einer Entschwefelungseinheit für mobile Anwendungen
- Gaschromatographische Analyse von Erdgas und Flüssiggas mit sehr geringen Nachweisgrenzen für Schwefelspezies
- Betrieb und Qualifizierung von Brennstoffzellengeräten
- Klimaprüfungen von Komponenten und Systemen

Weitere Projektanträge werden derzeit ausgearbeitet und Gespräche mit potentiellen Partnern werden fortlaufend geführt.

In Kooperation mit enymotion wurde ein weiterer Projektantrag erarbeitet und zur Förderung eingereicht, der auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens basiert.

Insgesamt erhöht ZBT die Wettbewerbsfähigkeit für die Durchführung neuer Forschungsvorhaben sowie für den Wissen- und Technologietransfer zu Unternehmen, wodurch der Wirtschaftsstandort Deutschland im Bereich der innovativen Energietechnik gestärkt wird.

### **2.3 Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Die Truma Gerätetechnik GmbH und Co. KG konnte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH das Brennstoffzellensystem VeGA mit integrierten Reformersystem demonstrieren, das Flüssiggas als Kraftstoff verwendet [14]. Die Markteinführung ist für das Jahr 2012 geplant. Arbeiten in diesem Zusammenhang wurden ebenfalls innerhalb des NIP gefördert.

Im Rahmen der Informationsrecherche sind darüber hinaus keine weiteren FuE-Ergebnisse mit entsprechender Relevanz bekannt geworden.



## 2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Projektergebnisse wurden im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit des ZBT in enger Absprache mit dem Projektpartner enymotion publiziert:

- Boot Düsseldorf 2010  
Posterpräsentation auf Stand der Universität Duisburg-Essen mit ZBT-Beteiligung
- Bordstromversorgung Fuel Cell 4 Leisure - Stromversorgung von Booten und Caravans im Freizeitbereich mit 250 Watt-Brennstoffzellensystemen im Bodenseeraum  
ZBT-Statusbericht 2010, August 2010  
M. Steffen, U. Gardemann
- Hannover Messe 2011  
Posterpräsentation auf dem Messestand von enymotion
- Systemtests im Klimaschrank  
Internetpräsentation des ZBT, Juni 2011  
(<http://www.zbt-duisburg.de/aktuell/fe-highlights>)  
U. Gardemann, M. Steffen
- Fuel Cell 4 Leisure - Stromversorgung von Booten und Caravans im Freizeitbereich mit 250 Watt Brennstoffzellensystemen  
NIP-Vollversammlung, November 2011  
R. Wörner, U. Gardemann

