



## **Projektbericht Adelheid – aus dem Labor heraus in die Lüfte**

Ralf Peters, Joachim Pasel, Remzi Can Samsun, Andreas Tschauder,  
Christiane Wiethäge, Florian Scharf, Detlef Stolten

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 449

ISBN 978-3-95806-378-5

Forschungszentrum Jülich GmbH  
Institut für Energie- und Klimaforschung  
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

## **Projektbericht Adelheid – aus dem Labor heraus in die Lüfte**

Ralf Peters, Joachim Pasel, Remzi Can Samsun,  
Andreas Tschauder, Christiane Wiethage, Florian Scharf,  
Detlef Stolten

Schriften des Forschungszentrums Jülich  
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 449

---

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-378-5

# Inhaltsverzeichnis

<b>ADELHEID</b> .....	<b>i</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>iv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xviii</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>xx</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Definition von technischen Anforderungen</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Spezifikation und Betriebsbedingungen für Brennstoffzellen APUs</b> .....	<b>7</b>
2.1.1 Zusätzliche Bedingungen für luftfahrttechnische Anwendungen, insbesondere für ein modulares multifunktionales System .....	7
2.1.2 Zusätzliche Bedingungen für schiffahrttechnische Anwendungen (AP A/1/4) 18	
<b>3 Entwicklung innovativer Reformer</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1 Chemie der Brenngaserzeugung und der Brennstoffzelle</b> .....	<b>25</b>
3.1.1 Reformierung .....	25
3.1.2 Gasnachbehandlung.....	26
3.1.3 Brennstoffzelle .....	27
3.1.4 Katalytbrenner.....	27
<b>3.2 Dieseleinspritzung</b> .....	<b>27</b>
3.2.1 Charakterisierung von Tropfensprays.....	28
3.2.2 Theorie der Zerstäubungsmechanismen .....	28
3.2.3 Gängige Düsenbauarten.....	30
3.2.4 Zweistoffdüse innerer Mischung (ZSDiM).....	36
3.2.5 Kriterienkatalog zur Düsenauswahl .....	37
3.2.6 Kriterienübersicht.....	39
3.2.7 Einspritz- und Mischsysteme für Brennstoffzellen APUs .....	40
<b>3.3 Charakterisierung von Verdampfungsvorgängen</b> .....	<b>41</b>
<b>3.4 CFD-Simulationen</b> .....	<b>44</b>
3.4.1 Modellanpassung des Wärmeaustauschers für Nassdampf.....	45
3.4.2 Adaption des Ausgangssystems des ATR AH1 auf den Typ AH2.....	52
3.4.3 CFD-Modellierung ATR Mischkammer AH2 .....	53
3.4.4 Design und CFD- Modellierung des Wärmetauschers im ATR AH2.....	64

3.4.5	Design und CFD- Modellierung im ATR AH3.....	71
3.4.6	CFD-Modellierung Mischkammer ATR AH3 .....	77
3.4.7	3D-Gesamtmodell des autothermen Reformers ATR AH3 .....	80
<b>3.5</b>	<b>Strömungsexperimente .....</b>	<b>82</b>
3.5.1	Einbindung in die CFD-unterstützte Reaktorkonstruktion .....	82
3.5.2	Charakterisierung von Sprühbildern .....	86
3.5.3	Düsen zur experimentellen Erprobung von ATR AH1 .....	88
3.5.4	Sprühbilduntersuchungen an einer Düse mit vorgeschaltetem GSR- Ventil und Pumpe .....	96
3.5.5	Experimentelle Untersuchung der Wärmeübergangsphänomene .....	100
<b>3.6</b>	<b>Methoden der experimentelle Erprobung .....</b>	<b>105</b>
3.6.2	Messmethodik bei hohen Kraftstoffumsätzen nahe 100 %.....	107
<b>3.7</b>	<b>Konstruktion und Test ATR AH1 .....</b>	<b>110</b>
3.7.1	Konstruktion .....	110
3.7.2	Experimentelle Untersuchungen mit GTL-Kerosin.....	111
<b>3.8</b>	<b>Konstruktion und Test ATR AH2 .....</b>	<b>123</b>
3.8.1	Erstellung Entwurfszeichnung.....	123
3.8.2	Belastungsanalyse ATR AH2.....	123
3.8.3	Experimentelle Erprobung ATR AH2 .....	128
<b>3.9</b>	<b>Konstruktion und Test ATR AH3 .....</b>	<b>138</b>
3.9.1	Konstruktion .....	138
3.9.2	Experimentelle Erprobung ATR AH3 .....	139
<b>3.10</b>	<b>Katalysatoralterung.....</b>	<b>145</b>
3.10.1	Alterungsmechanismen .....	145
3.10.2	Literaturübersicht .....	147
3.10.3	Katalysatorherstellung .....	155
3.10.4	Experimenteller Versuchsaufbau .....	156
3.10.5	Katalysatorcharakterisierung .....	157
3.10.6	Schlußfolgerungen.....	170
<b>3.11</b>	<b>Post-Mortem Analyse.....</b>	<b>170</b>
3.11.1	Düsencharakterisierung.....	170
3.11.2	Post-Mortem Analyse AH1.....	172
<b>3.12</b>	<b>Analyse der Reformierentwicklung im Projekt ADELHEID.....</b>	<b>174</b>
<b>4</b>	<b>Innovative Systeme .....</b>	<b>177</b>

---

<b>4.1 Systemstudien</b> .....	<b>181</b>
4.1.1 Theoretische Vorstudien zum Systemkonzept.....	181
4.1.2 Simulation von Brennstoffzellenbasierten APU's in Flugzeugen .....	185
4.1.3 Stand der Technik.....	189
4.1.4 Patentrecherche.....	193
<b>4.2 Systemmodellierung und Optimierung</b> .....	<b>196</b>
4.2.1 Methodik der Simulation .....	197
4.2.2 Systemmodellierung AH1.....	205
4.2.3 Systemmodellierung AH2.....	207
4.2.4 Systemmodellierung AH3.....	216
<b>4.3 Bewertung peripherer Komponenten</b> .....	<b>217</b>
4.3.1 Anfahrvorrichtung.....	217
4.3.2 Luftverdichter .....	223
<b>4.4 Systemtest</b> .....	<b>225</b>
4.4.1 Spezifikation des Testsystems und Versuchsaufbau.....	225
4.4.2 Methodik der Systemuntersuchungen .....	236
4.4.3 Wärmetechnischen Charakterisierung von autothermen Reformern ...	240
4.4.4 Kopplung Reformierung -Shiftreaktion.....	242
4.4.5 Stacktest .....	243
4.4.6 Systembetrieb mit HT-PEFC Stacks des IEK-3 .....	247
4.4.7 Systemtest ATR AH 1-AH3.....	256
4.4.8 Test integriertes System 5 kW mit GTL-Kerosin.....	284
<b>4.5 Packaging-Studie</b> .....	<b>286</b>
4.5.1 Designstudie Package S2.....	286
4.5.2 Designstudie Package „PX“ in „S2+“ .....	288
4.5.3 Designstudie Package „PX+“ .....	296
<b>4.6 Gesamtsystembetrachtung</b> .....	<b>299</b>
4.6.1 Wirkungsgrad.....	301
4.6.2 Volumenspezifische Leistungsdichte .....	301
4.6.3 Startzeit.....	303
<b>4.7 Ausblick</b> .....	<b>304</b>
<b>5 Zusammenfassung</b> .....	<b>305</b>
<b>6 Literatur</b> .....	<b>307</b>

Energie & Umwelt / Energy & Environment  
Band / Volume 449  
ISBN 978-3-95806-378-5