

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ausblick auf zukünftige Anwendungen in der Luftfahrttechnik .....</b>	<b>1</b>
	Andreas Westenberger	
1.1	Zukünftige Kraftstoffe für die Luftfahrt .....	1
1.1.1	Drop-in Kraftstoffe für den Antrieb .....	2
1.1.2	Alternative flüssige Kraftstoffe für den Antrieb .....	3
1.1.3	Alternative gasförmige Kraftstoffe für den Antrieb .....	3
1.2	Neue Energiewandler für Bordsysteme in Entwicklung .....	4
1.3	Aktivitäten im Bereich der Luftfahrt .....	6
	Literatur .....	6
<b>2</b>	<b>Heutige und zukünftige Kraftstoffe für Brennstoffzellen in der Luftfahrt ...</b>	<b>7</b>
	Ralf Peters	
	Nomenklatur .....	7
2.1	Chemische Zusammensetzung und Spezifikation von Flugturbinen-Kraftstoffen .....	8
2.1.1	Herstellung von Kerosin im Raffinerieprozess .....	8
2.1.2	Qualität von Flugturbinen-Kraftstoffen .....	10
2.1.3	Physiko-chemische Prozesseigenschaften von Kerosin .....	13
2.1.4	Eigenschaften und Einsatz von Flugbenzin .....	18
2.2	Einsatz von Biokraftstoffen im Luftverkehr .....	19
2.2.1	Definition und Einteilung von Biokraftstoffen .....	20
2.2.2	Pflanzenöle .....	24
2.2.3	Kraftstoffherstellung aus Pflanzenölen .....	27
2.2.4	Bio-to-liquid Kraftstoffe .....	33
2.2.5	Halophyten .....	38
2.2.6	Verwendung im Luftverkehr .....	40
2.3	Wasserstoff als Energieträger .....	43
2.3.1	Reformierung von Erdgas .....	44
2.3.2	Wasser-Elektrolyse .....	45
2.3.3	Biobasierte Wasserstofferzeugung .....	47

<b>2.4</b>	<b>Anpassung und Veredlung von Kraftstoffen für den Luftverkehr .....</b>	<b>48</b>
2.4.1	Biokraftstoffe für Flugturbinen .....	48
2.4.2	Wege zur industriellen Produktion von schwefelarmen Kerosinqualitäten .....	49
2.4.3	Kerosinentschweifung für Brennstoffzellensysteme .....	54
<b>2.5</b>	<b>Verfahrensanalytische Bewertung .....</b>	<b>75</b>
2.5.1	Flächenpezifische Produktionsraten .....	75
2.5.2	Energie- und CO <sub>2</sub> -Bilanzen der Kraftstoffherstellung .....	79
2.5.3	Flächenpotentiale für die Biokraftstoffproduktion .....	82
2.5.4	Speicherung .....	85
2.5.5	Mögliche Kraftstoffstrategien für die Luftfahrt .....	87
<b>2.6</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>90</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>94</b>
<b>3</b>	<b>Hochtemperatur-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen .....</b>	<b>101</b>
	<b>Werner Lehnert, Uwe Reimer und Holger Janßen</b>	
	<b>Nomenklatur .....</b>	<b>101</b>
3.1	Einleitung .....	101
3.2	Funktionsprinzip von Brennstoffzellen .....	104
3.3	Hochtemperatur-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle .....	115
3.3.1	Eigenschaften der Phosphorsäure .....	115
3.3.2	Das Polymer- Phosphorsäure-System .....	118
3.3.3	Einfluss der Phosphorsäure auf das Zellverhalten einer HT-PEFC .....	120
3.3.4	Einfluss des Brenngases auf das Betriebsverhalten einer HT-PEFC .....	126
3.3.5	Betriebsverhalten von HT-PEFC Stacks .....	131
3.4	Zusammenfassung .....	137
	<b>Literatur .....</b>	<b>139</b>
<b>4</b>	<b>Stackentwicklung Hochtemperatur-Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzellen .....</b>	<b>145</b>
	<b>Holger Janßen, Anne Bendzulla und Werner Lehnert</b>	
	<b>Nomenklatur .....</b>	<b>145</b>
4.1	Einleitung .....	146
4.2	Grundlegender Betrieb und Aufbau .....	148
4.3	Stackauslegung .....	152
4.4	Stackkomponenten .....	155
4.4.1	Membran-Elektroden-Einheit .....	155
4.4.2	Bipolarplatte .....	160
4.5	Stackkonzepte .....	164
4.5.1	Spannkonzepte .....	164
4.5.2	Dichtkonzepte .....	166

4.5.3 Konzepte zum Stack-Wärmemanagement .....	170
4.5.4 Konzepte zur Medienverteilung auf Stack- und Zellebene .....	171
4.6 Fazit und Ausblick .....	175
Literatur .....	177
<b>5 Technische Entwicklung, Bau und Test von Brenngaserzeugungskomponenten .....</b>	<b>181</b>
<b>Joachim Pasel</b>	
5.1 Einleitung .....	181
5.2 Autothermer Reformer .....	183
5.2.1 Auswahl der Dralldruckdüse für die Kraftstoffeinspritzung .....	186
5.2.2 Strömungsdynamische Modellierungen zur Verbesserung der Verdampfungskammer .....	189
5.2.3 Katalysatoren .....	192
5.2.4 Experimentelle Validierung .....	195
5.3 Wasser-Gas-Shift Reaktor .....	213
5.3.1 Strömungsdynamische Modellierungen des Bereiches zwischen den beiden Reaktorstufen .....	215
5.3.2 Experimentelle Validierung .....	217
5.4 Katalytischer Brenner .....	221
5.4.1 Strömungsdynamische Modellierungen zur Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Wasserfilm und heißem Abgas .....	224
5.4.2 Experimentelle Validierung .....	226
5.5 Wesentliche Entwicklungen von anderen Forschergruppen .....	229
5.6 Danksagung .....	231
Literatur .....	232
<b>6 Reaktorentwicklung und Konstruktion .....</b>	<b>235</b>
<b>Jan Meißner und Andreas Tschauder</b>	
Nomenklatur .....	235
6.1 Einleitung .....	235
6.2 Grundlagen .....	236
6.3 Randbedingungen .....	238
6.3.1 Verfahrenstechnische Randbedingungen .....	238
6.3.2 Äußere Randbedingungen .....	241
6.4 Konstruktion & Festigkeitsberechnungen .....	242
6.4.1 Wahl des Werkstoffes .....	242
6.4.2 Erster Entwurf .....	243
6.4.3 Berechnungen nach AD 2000 .....	244
6.4.4 FEM-Berechnungen im Vergleich zum Regelwerk .....	262
6.4.5 Beispiel einer konstruktiven Detaillösungen .....	276
Literatur .....	278

<b>7 Entwicklung und Charakterisierung eines Gesamtsystems</b> . . . . .	<b>281</b>
Remzi Can Samsun	
7.1 Einleitung . . . . .	281
7.2 Technologieauswahl und Ziele . . . . .	281
7.3 Systemkonzept . . . . .	283
7.3.1 Basisystem . . . . .	283
7.3.2 Integriertes System . . . . .	285
7.4 Systemmodellierung . . . . .	287
7.4.1 Pinch-Point-Analyse . . . . .	287
7.4.2 Statistische Parametervariation . . . . .	289
7.4.3 Detaillierte Systemauslegung mit Hilfe einer Prozesssimulation . . . . .	292
7.4.4 Start-up-Strategie . . . . .	295
7.4.5 Scale-up und multifunktionaler Systemeinsatz . . . . .	296
7.5 Systemaufbau . . . . .	298
7.5.1 Brenngaserzeugungssystem . . . . .	298
7.5.2 Integriertes HT-PEFC-System mit Reformierung von GTL-Kerosin . . . . .	301
7.6 Systemcharakterisierung . . . . .	302
7.6.1 Systemtest Brenngaserzeugung in der 28 kW <sub>th</sub> -Klasse . . . . .	302
7.6.2 Test des integrierten HT-PEFC-Systems mit Reformierung in der 5-kW <sub>e</sub> -Klasse . . . . .	308
7.6.3 Analyse der Wärmerückgewinnung im System . . . . .	322
7.6.4 Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse . . . . .	323
7.7 Weitere Aktivitäten . . . . .	325
7.8 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	328
Literatur . . . . .	331
<b>8 Brennstoffzellensysteme als Bestandteil eines multifunktionalen Systems</b> . . . . .	<b>333</b>
Ralf Peters und Andreas Westenberger	
Nomenklatur . . . . .	333
8.1 Einsatzbedingungen . . . . .	334
8.1.1 Stromproduktion . . . . .	334
8.1.2 Wasserbedarf . . . . .	339
8.1.3 Tankinertisierung und Brandbekämpfung . . . . .	342
8.1.4 Tragflächenenteisung . . . . .	344
8.2 Thermodynamische Aspekte . . . . .	344
8.2.1 Stromerzeugung . . . . .	344
8.2.2 Wasserproduktion . . . . .	346
8.2.3 Tankinertisierung . . . . .	358
8.3 Bewertung konkurrierender Systeme basierend auf flüssigen Turbinenkraftstoffen . . . . .	362
8.3.1 Systemoptimierung . . . . .	362
8.3.2 Wichtungskriterien . . . . .	363

<b>8.4 Analyse der potentiellen Wasserproduktion in Brennstoffzellensystemen</b> .....	364
<b>8.4.1 Standortanalyse für die Produktion an Flughäfen</b> .....	364
<b>8.4.2 Missionsanalyse für die Produktion im Flugbetrieb</b> .....	375
<b>8.4.3 Dynamische Simulation eines multifunktionalen Brennstoffzellensystems im Flugbetrieb</b> .....	379
<b>8.5 Wasserstoff oder Biokerosin – Optionen für zukünftige Brennstoffzellensysteme?</b> .....	384
<b>8.5.1 Entwicklungspotentiale für zukünftige Brennstoffzellensysteme</b> .....	385
<b>8.5.2 Massen- und Volumenbilanzen</b> .....	388
<b>8.5.3 Multifunktionalität</b> .....	393
<b>8.5.4 Ausblick</b> .....	395
<b>Literatur</b> .....	400
<b>Sachverzeichnis</b> .....	405