



Reformierung von BtL-Kraftstoffen für die HT-PEFC in luftfahrttechnischen Systemen

Christiane Wilbrand

Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 454

ISBN 978-3-95806-387-7

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

Reformierung von BtL-Kraftstoffen für die HT-PEFC in luftfahrttechnischen Systemen

Christiane Wilbrand

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

Band / Volume 454

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-95806-387-7

Inhaltverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlegendes zum Einsatz alternativer Technologien in der Luftfahrt	3
2.1	Zahlen und Fakten zu Treibstoffverbrauch und Emissionen	3
2.2	Motivation der Luftfahrt für mehr Effizienz und Umweltverträglichkeit	5
2.2.1	Auswirkungen des Luftverkehrs auf Klima und Umwelt	5
2.2.2	Ökonomische Notwendigkeit und Ressourcenendlichkeit	6
2.3	Klima- und umweltrelevante Ziele der Luftfahrt	7
3	Grundlagen und Stand der Technik	9
3.1	Treibstoffe in der zivilen Luftfahrt	9
3.1.1	Der Flugturbinentreibstoff Kerosin	9
3.1.1.1	Definition	9
3.1.1.2	Zündverhalten	11
3.1.1.3	Spezifikationen für Jet A-1	15
3.1.2	Biogenes Kerosin	16
3.1.2.1	Fischer-Tropsch-Kerosin (XtL)	16
3.1.2.2	HEFA-Kerosin	18
3.1.3	Energiedichte von Kraftstoffen im Vergleich	19
3.1.4	Kumulierter Energieaufwand und Treibhausgasemissionen	20
3.2	Bordenergieversorgung bei Verkehrsflugzeugen	23
3.2.1	Bordautonome Sekundärenergieversorgung heute	23
3.2.2	Der Trend zum „All Electric Aircraft“	25
3.2.3	Effizienz der konventionellen Stromerzeugung	27
3.2.3.1	Stromerzeugung über die Haupttriebwerke	27
3.2.3.2	Auxiliary Power Unit (APU)	29
3.2.4	Die alternative Option Brennstoffzellen-APU	30
3.2.4.1	Vorteile durch Einsatz einer Brennstoffzellen-APU	30
3.2.4.2	Anforderungen und technologische Ziele	31
3.3	Stromerzeugung mit Brennstoffzellen	32
3.3.1	Funktionsprinzip und Aufbau	32
3.3.2	Thermodynamik	33
3.3.3	Strom-Spannungs-Kennlinie	35
3.3.4	Betriebsparameter und Auslegungspunkt	37
3.3.5	Relevante Kennwerte	38
3.3.6	Merkmale der Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle (HT-PEFC)	39
3.3.7	Balance of Plant	40
3.3.7.1	Spannungswandler	40
3.3.7.2	Lüfter / Kompressor	41
3.3.7.3	Katalytischer Brenner	41

3.3.7.4 Brenngaserzeugungssystem.....	42
3.4 Wasserstoffbereitstellung für ein mobiles HT-PEFC-System.....	43
3.4.1 Hintergrund.....	43
3.4.2 Wasserstoffspeicherung	43
3.4.2.1 Technologien	43
3.4.2.2 Tanksysteme: Stand der Technik.....	45
3.4.3 Wasserstoffherzeugung aus Kohlenwasserstoffen	46
3.4.3.1 Reformierung von Kohlenwasserstoffen.....	46
3.4.3.2 Reformataufbereitung	50
3.4.3.3 Reformierung: Stand der Technik	51
3.5 Dynamische Flugzeugsimulation	52
3.5.1 Aerodynamische Grundlagen	52
3.5.2 Reiseflugplanung	54
3.5.3 Triebwerksverbrauch	55
3.5.4 Das Flugleistungsmodell BADA	56
3.6 Versuchs- und Auswertemethodiken	58
3.6.1 Statistische Versuchsplanung und -auswertung	58
3.6.2 Messunsicherheitsbestimmung.....	58
4 Experimente zur autothermen Reformierung	59
4.1 Hintergrund	59
4.2 Ziele.....	59
4.3 Beschreibung der Versuchsanlage	60
4.4 Versuchsplanung und -durchführung.....	62
4.5 Analytik und Auswertemethodik.....	63
4.6 Abschätzung der Messunsicherheit.....	64
4.7 Versuchsergebnisse und Diskussion.....	66
4.7.1 Charakterisierung des ATR-9.1	66
4.7.1.1 Versuchsreihe mit Hydrocracker-Kerosin	66
4.7.1.2 Versuchsreihe mit GtL-Kerosin	72
4.7.1.3 Zusammenfassung	77
4.7.2 Charakterisierung des ATR-9.2	79
4.7.2.1 Versuchsreihe mit GtL-Kerosin	79
4.7.2.2 Zusammenfassung	84
4.7.3 Betriebstests mit dem ATR-9.2.....	86
4.7.3.1 Lastzyklusversuch.....	86
4.7.3.2 Langzeitversuch.....	90
4.7.3.3 Zusammenfassung	93
4.8 Fazit.....	95

5	Dynamische Simulation eines Flugzeugs mit HT-PEFC-APU	99
5.1	Hintergrund	99
5.2	Ziele und Zielerreichung.....	99
5.3	Simulationsgegenstand.....	101
5.4	Aufbau des Simulationsmodells.....	101
5.5	Charakterisierung des Simulationsflugzeugs.....	105
5.5.1	Allgemeines.....	105
5.5.2	Technische Eckdaten	106
5.5.3	Besondere technische Merkmale.....	107
5.5.3.1	Brennstoffzellen-APU.....	107
5.5.3.2	Kabinenluftbefeuchtung	107
5.5.3.3	Tankinertisierung	108
5.5.3.4	Wassereinspritzung zur NO _x -Reduktion	109
5.5.4	Aufbau des Bordstromnetzes.....	110
5.5.5	Struktur des Wasserversorgungssystems.....	112
5.5.6	Ausgewählte Flugmissionen	113
5.6	Erstellung der dynamischen Profile	115
5.6.1	Flugprofil.....	115
5.6.2	Strombedarfsprofil	117
5.6.3	Wasserbedarfsprofil.....	120
5.7	Modellierung und Dimensionierung eines HT-PEFC-Systems für die APU- Anwendung	123
5.7.1	Untersuchte Systemkonfigurationen	123
5.7.2	Grundlegender Aufbau der HT-PEFC-Systeme	123
5.7.2.1	Wasserstoffbetrieb	125
5.7.2.2	Reformatbetrieb	129
5.7.3	HT-PEFC-Stacks	133
5.7.3.1	Wahl der Betriebsbedingungen	133
5.7.3.2	Beschreibung und Analyse der verwendeten Strom-Spannungs-Kennlinien.....	134
5.7.3.3	Wahl des Auslegungspunkts	140
5.7.3.4	Berechnung der Brennstoffzellenleistung.....	141
5.7.3.5	Stackdimensionierung und -design	144
5.7.4	Turbokompressor/Expander-Einheit	149
5.7.5	Katalytbrenner	151
5.7.6	Kondensatoren	153
5.7.7	Brenngaserzeugungssystem	158
5.8	Modellierung von Energie-/Stoffströmen an Bord.....	162
5.8.1	Flugzeugsystemebene.....	163
5.8.1.1	Sekundärenergieversorgung	163
5.8.1.2	Umgebungskontrollsystem (Klimaanlage)	166
5.8.1.3	Wassersystem	171

5.8.2	Triebwerksebene	174
5.8.2.1	Beschreibung des flugmechanischen Modells.....	174
5.8.2.2	Treibstoffbedarf und -versorgung	177
5.8.2.3	Tankinertisierung	181
5.9	Modellierung der Umgebungsluft	184
5.10	Simulationen auf der Flugzeugsystemebene.....	186
5.10.1	Zieldefinition	186
5.10.2	Simulationsplanung und -durchführung	186
5.10.3	Simulationsergebnisse und Auswertung	188
5.10.3.1	HT-PEFC-System I (Wasserstoffbetrieb)	188
5.10.3.2	HT-PEFC-Systeme II (Reformatbetrieb).....	191
5.10.4	Zusammenfassung und Fazit.....	193
5.11	Massenbilanzierung.....	195
5.11.1	Brennstoffzellen-APU	195
5.11.2	Wasserstofftank.....	198
5.11.3	Gesamtgewicht des Flugzeugs.....	200
5.12	Simulationen auf der Triebwerksebene.....	202
5.12.1	Zieldefinition	202
5.12.2	Simulationsplanung und -durchführung	203
5.12.3	Simulationsergebnisse.....	204
5.12.3.1	Flugzeugvariante BZ-I (Wasserstoffbetriebene APU).....	204
5.12.3.2	Flugzeugvariante BZ-II (Reformatbetriebene APU).....	211
5.12.3.3	Flugzeugvarianten im Vergleich	218
5.12.4	Zusammenfassung und Fazit.....	225
6	Zusammenfassung und Ausblick	231
Literatur	.....	242
Liste der Formelzeichen und Abkürzungen	.....	259
Abbildungsverzeichnis	.....	263
Tabellenverzeichnis	.....	269
Anhang	.....	272

Energie & Umwelt / Energy & Environment
Band / Volume 454
ISBN 978-3-95806-387-7