

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xv
Nomenklatur	xvii
Formelzeichen	xvii
Indizes	xx
Abkürzungen	xxiv
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung	3
1.2 Struktur	4
2 Entwicklungen und Trends in der Brennstoffzellentechnologie	7
2.1 Klassifizierung von Brennstoffzellen	7
2.2 Funktionsweise einer Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle	10
2.3 Konzepte zur Wasserstoffspeicherung	13
2.3.1 Metallhydrid-Speicher	13
2.3.2 Gas-Speicher	14
2.3.3 Kryogene Speicher	14
2.4 Systemtechnisches Potential für die PEMFC-Technologie	16
2.5 Luftfahrttechnische Anwendungen	19
3 Entwurfsprozess für Brennstoffzellensysteme	25
3.1 Allgemeiner Flugzeug-Entwurfsprozess	26
3.2 Einfluss der Flugzeugsysteme auf den Flugzeugvorentwurf	29
3.3 Anforderungen an einen Entwurfsprozess für Brennstoffzellensysteme	31
3.4 Entwickelter Entwurfsprozess	32

4 Strategien zur Systemintegration	35
4.1 Funktionale Systemintegration	35
4.1.1 Autonome Energieversorgung am Boden	36
4.1.2 Notenergie-Versorgung	37
4.1.3 Unterstützung des elektrischen Netzwerkes im Fehlerfall	39
4.1.4 Bereitstellung von Inertgas zur Treibstofftank-Inertisierung	40
4.1.5 Bereitstellung von Inertgas zur Frachtraum-Brandbekämpfung	44
4.1.6 Generierung von Frischwasser	47
4.2 Flugzeugseitige Integration	49
4.2.1 Bereitstellung von Kühlleistung	49
4.2.2 Luftversorgung des Brennstoffzellensystems	51
4.2.3 Leistungseinspeisung in das Bordnetz	52
4.3 Zusammenfassung	56
5 Systementwurfs-Methodik	59
5.1 Aufbau der Systementwurfs-Methodik	59
5.2 Komponenten-Auslegung und Optimierung	63
5.2.1 Herausforderungen bei der Auslegung von Brennstoffzellensystemen	64
5.2.2 Bekannte Verfahren zur Auslegung und Optimierung von Systemen im Flugzeugvorentwurf	66
5.2.3 Bedarf und Ziele für die Entwicklung einer neuartigen modellbasierten Optimierungsmethode	68
5.3 Modellbasierte Auslegungs- und Optimierungsmethode	70
5.3.1 Auslegungs- und Optimierungsverfahren	71
5.3.2 Vorteile des entwickelten Auslegungs- und Optimierungsverfahrens	73
5.3.3 Vergleich zwischen einer Verhaltensparameter-basierten und einer Geometrieparameter-basierten Optimierung	75
5.3.4 Erweiterung zur Berücksichtigung mehrerer Auslegungspunkte	81
5.3.5 Implementierung der Software SOFIS	85

5.4	Optimierungsalgorithmus	86
5.4.1	Beschreibung des Optimierungsproblems	87
5.4.2	Klassifizierung des Optimierungsproblems	88
5.4.3	Der NSGA-II Algorithmus	90
5.4.4	Erweiterung und Modifikation	91
5.4.5	Analyse der Leistungsfähigkeit	94
5.5	Modellbibliotheken	96
5.5.1	Anforderungen und Modellierungsansätze	96
5.5.2	Beispielkomponente: Rohrleitung	100
5.5.3	Beispielkomponente: Ventilator	104
5.5.4	Beispielkomponente: Brennstoffzellenstack	108
5.5.5	Beispielkomponente: Wärmeübertrager	113
5.6	Zusammenfassung	119
6	Bewertung auf Flugzeugebene	121
6.1	Konzepte zur Bewertung von Systemen auf Flugzeugebene	121
6.1.1	Heutige Verfahren	121
6.1.2	Motivation zur Entwicklung eines erweiterten Verfahrens (SYSFUEL ⁺)	126
6.2	Entwicklung der benötigten Teilmodule für SYSFUEL ⁺	128
6.2.1	Triebwerk-Modul	128
6.2.2	Flugmechanik-Modul	137
6.2.3	Flugzeug-Resize-Modul	145
6.3	Aufbau von SYSFUEL ⁺	156
6.3.1	Programmblöcke	157
6.3.2	Validierung	162
6.4	Illustratives Bewertungsbeispiel	163
6.4.1	Vorstellung des Integrationskonzeptes	164
6.4.2	Bewertung des Integrationskonzeptes	166
6.4.3	Erweiterung um ein elektrisches Taxi-System	167
6.5	Zusammenfassung	169

7 Beispielentwicklung eines multifunktionalen Brennstoffzellensystems	171
7.1 Teil 1: Funktionale Integrationsstrategie auf Flugzeug-Systemebene	172
7.2 Teil 2: Entwurf des Brennstoffzellensystems	173
7.2.1 Identifikation der Unterfunktionen und der Auslegungspunkte auf Systemebene (Phase 1)	173
7.2.2 Systemarchitektur-Entwurf (Phase 2)	176
7.2.3 Komponenten-Auslegung und Optimierung (Phase 3) . .	179
7.2.4 Validierung und Analyse (Phase 4)	184
7.3 Teil 3: Bewertung auf Flugzeugebene	189
8 Zusammenfassung und Ausblick	193
A Auszug aus der Norm MIL-STD-704F	197
B Weiterführende Ergebnisse zu den Anwendungsbeispielen (Kapitel 6)	199
C Beispiel: Anforderungen für das multifunktionale Brennstoffzellensystem	203
Literaturverzeichnis	207