

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xvii</b>
Formelzeichen . . . . .	xvii
Indizes . . . . .	xx
Abkürzungen . . . . .	xxiv
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung . . . . .	3
1.2 Struktur . . . . .	4
<b>2 Entwicklungen und Trends in der Brennstoffzellentechnologie</b>	<b>7</b>
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
<b>3 Entwurfsprozess für Brennstoffzellensysteme</b>	<b>25</b>
3.1 Allgemeiner Flugzeug-Entwurfsprozess . . . . .	26
3.2 Einfluss der Flugzeugsysteme auf den Flugzeugvorentwurf . . .	29
3.3 Anforderungen an einen Entwurfsprozess für Brennstoffzellen- systeme . . . . .	31
3.4 Entwickelter Entwurfsprozess . . . . .	32
	vii

<b>4</b>	<b>Strategien zur Systemintegration</b>	<b>35</b>
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
<b>5</b>	<b>Systementwurfs-Methodik</b>	<b>59</b>
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
<b>6</b>	<b>Bewertung auf Flugzeugebene</b>	<b>121</b>
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 <sup>+</sup> ) . . . . .	126
6.2	Entwicklung der benötigten Teilmodule für SYSFUEL <sup>+</sup> . . . . .	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 <sup>+</sup> . . . . .	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 Brennstoffzellensystems171**
  - 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**