

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>xi</b>
Formelzeichen . . . . .	xi
Indizes . . . . .	xv
Abkürzungen . . . . .	xvi
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	4
1.1.1 Entwicklung von thermischen Flugzeugsystemen . . . . .	4
1.1.2 Kühlung und Modellierung von Brennstoffzellensystemen	6
1.1.3 Modellierung von Thermofluid-Systemen . . . . .	8
1.2 Zielsetzung und Herausforderung der Arbeit . . . . .	9
1.3 Struktur der Arbeit . . . . .	10
<b>2 Beschreibung von thermischen Flugzeugsystemen</b>	<b>13</b>
2.1 Kühlsysteme für multifunktionale Brennstoffzellen . . . . .	13
2.1.1 Brennstoffzellen und deren thermische Lasten . . . . .	13
2.1.2 Kühltechnologien für Brennstoffzellen . . . . .	17
2.1.3 Betrieb und Wärmelasten des multifunktionalen Systems	22
2.2 Systeme zur Kabinenklimatisierung und Bordkühlung . . . . .	25
<b>3 Grundlagen der modellbasierten Entwicklung mit Modelica</b>	<b>29</b>
3.1 Struktur der Modellbibliothek . . . . .	30
3.1.1 Grundlegender Aufbau und ergänzende Modellbibliotheken	32
3.1.2 Einsatz von objektorientierten Elementen . . . . .	34
3.2 Physikalische Grundlagen . . . . .	36
3.2.1 Dynamische Erhaltungsgleichungen . . . . .	36
3.2.2 Beschreibung von Druckverlusten . . . . .	38
3.2.3 Beschreibung von Wärmeübergängen . . . . .	40

<b>4 Modellbildung von Komponenten und Fluiden thermischer Flugzeug-</b>	<b>43</b>
<b>systeme</b>	
4.1 Modellbildung der PEM-Brennstoffzellen . . . . .	44
4.1.1 Quasi-statisches Systemmodell der Brennstoffzelle . . . . .	44
4.1.2 Dynamisches Systemmodell der Brennstoffzelle . . . . .	49
4.1.3 Zellenmodell eines ausgewählten Brennstoffzellenstacks .	54
4.2 Konzepte zur Modellbildung von Wärmeübertragern verschiede- ner Bauart . . . . .	56
4.3 Modellbildung der eingesetzten Strömungsmaschinen . . . . .	61
4.4 Beschreibung von Kühlkreislaufkomponenten . . . . .	65
4.5 Modellbildung von Gasen, Flüssigkeiten und mehrphasigen Fluiden	66
<b>5 Parameteridentifikation und Modellvalidierung</b>	<b>69</b>
5.1 Prüfstandsystem zur Messwertaufnahme . . . . .	70
5.2 Vorgehen bei der Modellvalidierung . . . . .	72
5.3 Validierung der Brennstoffzellenmodelle . . . . .	74
5.3.1 Stöchiometrie . . . . .	75
5.3.2 Druckverluste . . . . .	76
5.3.3 Thermisches Verhalten . . . . .	79
5.3.4 Temperaturverläufe . . . . .	88
5.4 Validierung des Kühlsystems . . . . .	97
5.5 Bewertung der Validierungsergebnisse . . . . .	102
<b>6 Entwurf und Bewertung von neuen Kühlarchitekturen</b>	<b>103</b>
6.1 Randbedingungen und Anforderungen in Verkehrsflugzeugen .	103
6.1.1 Thermische Randbedingungen durch die FlugEnvelope .	104
6.1.2 Sicherheits- und Zuverlässigkeitanforderungen . . . . .	105
6.2 Entwurf der Flüssigkühlsysteme . . . . .	108
6.2.1 Aufbau von Architekturen . . . . .	108
6.2.2 Parametrisierung der Systemmodelle . . . . .	111
6.2.3 Regelungsstrategien für eine Flüssigkühlung . . . . .	114
6.3 Entwurf der Verdampfungskühlsysteme . . . . .	116
6.3.1 Aufbau von Architekturen . . . . .	116
6.3.2 Auswahl eines Kälteträgers . . . . .	118

6.3.3	Parametrisierung der Systemmodelle . . . . .	120
6.3.4	Regelungsstrategien für eine Verdampfungskühlung . . . . .	122
6.4	Simulationsbasierte Bewertung des Kühlsystemverhaltens . . . . .	123
6.4.1	Beschreibung der Simulationsmodelle . . . . .	124
6.4.2	Analyse und Vergleich der Kühlarchitekturen . . . . .	126
<b>7</b>	<b>Thermische Flugzeugintegration</b>	<b>133</b>
7.1	Analyse der thermischen Flugzeugsysteme . . . . .	133
7.2	Wärmesenken in Flugzeugen . . . . .	136
7.3	Globale Sensitivitätsanalysen und statistische Versuchsplanung	139
7.4	Durchführung einer thermischen Systemanalyse . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
<b>A</b>	<b>Ergebnisse der Sicherheits- und Zuverlässigkeitssanalyse</b>	<b>157</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>161</b>