

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xi
Formelzeichen	xi
Indizes	xv
Abkürzungen	xvi
 1 Einleitung	 1
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
 2 Beschreibung von thermischen Flugzeugsystemen	 13
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 Kabinenklimateisierung und Bordkühlung	25
 3 Grundlagen der modellbasierten Entwicklung mit Modelica	 29
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

4	Modellbildung von Komponenten und Fluiden thermischer Flugzeugsysteme	43
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 verschiedener 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
5	Parameteridentifikation und Modellvalidierung	69
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
6	Entwurf und Bewertung von neuen Kühlarchitekturen	103
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
7	Thermische Flugzeugintegration	133
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
8	Zusammenfassung und Ausblick	151
A	Ergebnisse der Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalyse	157
	Literaturverzeichnis	161