

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xvii</b>
Formelzeichen . . . . .	xvii
Indizes . . . . .	xx
Abkürzungen . . . . .	xxii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	4
1.1.1 Hydraulische Energieversorgungssysteme im Flugzeug .	4
1.1.2 Richtlinien zur Auslegung . . . . .	6
1.1.3 Rechnerunterstützung im Flugzeug-Systementwurf . . .	7
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit . . . . .	9
<b>2 Hydraulische Energieversorgung in Flugzeugen</b>	<b>11</b>
2.1 Aufbau von Flugzeug-Hydrauliksystemen . . . . .	11
2.2 Konventionelle elektro-hydraulische Leistungserzeugung . . . .	13
2.3 Anforderungen und Auslegungskriterien . . . . .	16
2.3.1 Systemarchitektur . . . . .	17
2.3.2 Leistungserzeugung . . . . .	18
2.3.3 Energieverteilung und Zubehör . . . . .	20
<b>3 Konzeption elektro-hydraulischer Leistungserzeugungsmodule</b>	<b>23</b>
3.1 Architekturen zur elektro-hydraulischen Leistungserzeugung . .	23
3.2 Analyse und Auswahl von Komponententechnologien . . . . .	26
3.2.1 Analyse der Motortypen . . . . .	26
3.2.2 Analyse der Pumpentypen . . . . .	28
3.2.3 Analyse der Motorelektronik . . . . .	30
3.2.4 Getriebe zur Drehzahlentkopplung . . . . .	31

3.2.5	Komponentenkühlung . . . . .	32
3.3	Konzeptsynthese . . . . .	33
3.4	Hydraulic Power Packages (HPP) . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Regelungsstrategien für die Leistungserzeugung</b>	<b>39</b>
4.1	Potentialanalyse für neue Systemregelungsstrategien . . . . .	39
4.1.1	Load-Sensing Regelung . . . . .	42
4.1.2	Elektro-hydraulisches Flow-Matching . . . . .	44
4.1.3	Vergleich anhand eines dezentralen HPPs . . . . .	45
4.2	Experimentelle Untersuchung einer EMP mit Konstantpumpe .	52
4.2.1	Allgemeiner Aufbau und Regelungskonzept . . . . .	53
4.2.2	Motor- und Pumpenauslegung . . . . .	54
4.2.3	Experimentalsystem . . . . .	55
4.2.4	Analyse der Druckregeldynamik . . . . .	56
4.2.5	Eigenschaften im Vergleich zur konventionellen EMP . .	57
4.2.6	Fazit . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Rechnergestützter Systementwurf</b>	<b>61</b>
5.1	Entwurf einer Prozess- und Werkzeugkette . . . . .	61
5.1.1	Herausforderungen und Ziele im Systementwurf . . . . .	61
5.1.2	Konzeption einer Prozess- und Werkzeugkette . . . . .	64
5.2	Methodik zur Architekturoptimierung . . . . .	67
5.2.1	Grundlagen der <i>OPAL</i> Methodik . . . . .	68
5.2.2	Erweiterung von <i>OPAL</i> . . . . .	71
5.2.3	Evaluierung der Architekturen . . . . .	75
5.3	Entwicklung eines Werkzeuges zum rechnergestützten Vorentwurf	77
5.3.1	Ausgangsbasis zur Werkzeugentwicklung . . . . .	78
5.3.2	Aufbau des Werkzeuges <i>ArOLab</i> . . . . .	78
5.3.3	Stationäre Berechnung des hydraulischen Netzwerkes . .	80
5.3.4	Modellbildung für den Vorentwurf . . . . .	84
5.3.5	Abschätzung und Bilanzierung der Bauteilmassen . . . .	87
5.3.6	Automatisierte Rohrnetzauslegung . . . . .	88
5.3.7	Visualisierung und Post-Processing . . . . .	95
5.3.8	Automatisierte Modellsynthese für den Detailentwurf . .	96

5.4	Detailentwurf und -analyse . . . . .	99
5.4.1	Thermisch-dynamisches Rohrmodell . . . . .	100
5.4.2	Fluidmodell . . . . .	103
5.4.3	Thermisch-dynamisches Pumpenmodell . . . . .	103
5.4.4	Thermisch-dynamisches Flugsteuerungsaktuatormodell .	104
5.4.5	Motor- und Motorelektronikmodell . . . . .	106
5.4.6	Modelle weiterer Komponenten . . . . .	108
5.5	Angrenzende Prozesselemente in der Entwicklung . . . . .	109
5.5.1	Entwicklung von Control-, Monitoring- und Diagnose- funktionen . . . . .	109
5.5.2	Pulsationsminderung im Hydrauliksystem . . . . .	111
5.5.3	Systemtest . . . . .	111

## **6 Entwurf einer elektro-hydraulischen Energieversorgung 113**

6.1	Referenzflugzeug und Referenzarchitektur . . . . .	113
6.2	Architekturentwurf . . . . .	114
6.2.1	Variation der Architektur der Energieversorgung . . . .	117
6.2.2	Optimierung der Leistungsallokation für 3eH Systeme .	119
6.2.3	Optimierung der Leistungsallokation 2eH1deH . . . . .	124
6.2.4	Vergleichende Analyse und Bewertung der Architekturen	129
6.3	Vorentwurf und Vorauslegung . . . . .	131
6.3.1	Auslegungstemperatur und Systemnenndruck . . . . .	132
6.3.2	Minimaler Verbraucherdruckdifferenzdruck . . . . .	134
6.3.3	Maximale Fluidgeschwindigkeit . . . . .	137
6.3.4	Rohrstaffelung . . . . .	139
6.3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	141
6.4	Detailanalyse . . . . .	143
6.4.1	Beschreibung des Systemmodells . . . . .	145
6.4.2	Detailanalyse und -auslegung des Systems mit konven- tioneller Konstantdruckregelung . . . . .	148
6.4.3	Detailanalyse und -auslegung des Systems mit elek- tro-hydraulischer Load-Sensing Regelung . . . . .	159
6.4.4	Zusammenfassende Betrachtung der Detailanalyse . . .	169

<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>173</b>
<b>A Anhang</b>	<b>177</b>
A.1 Parameter und Beziehungen zur Massenabschätzung . . . . .	177
A.1.1 Rohrdaten . . . . .	177
A.1.2 Komponentendaten . . . . .	179
A.2 Parameter zur Rohrnetzoptimierung . . . . .	183
A.3 Daten der drehzahlveränderbaren Elektromotor-Pumpe . . . .	183
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>185</b>