

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xvii
1. Einleitung	1
1.1. Problematik der schwankenden Ölpreise	1
1.2. Problematik der Abhängigkeit von der Primärenergie	3
1.3. Motivation	3
1.4. Ziel der Arbeit und methodische Vorgehensweise	5
1.4.1. Ziel der Arbeit	5
1.4.2. Methodische Vorgehensweise	6
1.4.3. Gliederung der Arbeit	8
2. Technische Entwicklungen von Flugzeugbordnetzen	11
2.1. Vom konventionellen zum modernen Flugzeug	11
2.2. Vergleich der Energieformen im Flugzeug	16
2.2.1. Hydraulik im Vergleich zur Elektrik	18
2.2.2. Pneumatik im Vergleich zur Elektrik	18
2.3. Funktion des elektrischen Flugzeugbordnetzes	18
2.4. Topologien des Flugzeugbordnetzes	21
2.4.1. Topologie eines konventionellen Flugzeugbordnetzes	21
2.4.2. Topologie eines modernen Flugzeugbordnetzes	22
2.5. Flugzeugbordnetzarchitekturen	23
2.5.1. Architektur eines konventionellen Flugzeugs	23
2.5.2. Architektur eines modernen Flugzeugs	24
2.6. Elektrische Energieerzeugung im Flugzeugbordnetz	27
2.6.1. Triebwerke	28
2.6.2. Hilfsenergieversorgungs-generator	29
2.6.3. Staudruckturbine	30
2.6.4. Batterien	32
2.6.5. Externer Energieversorgungsanschluss	32
2.6.6. Alternative Erzeugungsoptionen	33
2.6.7. Zusammenfassung der gegenwärtig bestehenden Spannungsebenen	34
2.6.8. Bereitstellung des Hochspannungs-Gleichstroms	35
2.7. Entwicklung im elektrischen Bordnetz	36
2.7.1. Führung der elektrischen Kabel	37
2.7.2. Konfiguration des Flugzeugbordnetzes	38
2.8. Weg zu rein elektrischen Flugzeugen	38

2.9.	Bordstromoptimierung durch die Entwicklung von rein elektrischen Flugzeugen . . .	39
2.9.1.	Umweltaspekte	40
2.9.2.	Technische Aspekte	40
2.9.3.	Technische Herausforderungen	48
2.9.4.	Zuverlässigkeit und Sicherheit des elektrischen Bordnetzes	48
2.10.	Kapitelzusammenfassung	49
3.	Optimierungspotenziale des elektrischen Bordnetzsystems	51
3.1.	Konzeptionelle Optimierungsparameter	51
3.1.1.	Elektrische Verkabelung	52
3.1.2.	Ersetzen von Kupferkabeln durch Aluminiumkabel	53
3.1.3.	Dimensionierung der elektrischen Kabel	54
3.1.4.	Strombelastbarkeit eines einadrigen Kabels	54
3.1.5.	Strombelastbarkeit von Kabelbündeln	55
3.1.6.	Auslegung eines Generatorversorgungskabels	55
3.1.7.	Erhöhung des CFK-Anteils im Flugzeugrumpf	56
3.1.8.	Spannungsabfall	57
3.1.9.	Erdung und Potenzialausgleich	60
3.2.	Bilanz der elektrischen Energie	61
3.2.1.	Beschreibung der Bilanz der elektrischen Energie	61
3.2.2.	Einsatzprofile des elektrischen Bordnetzes	63
3.2.3.	Dimensionierungsmethode für elektrische Flugzeugbordnetze	65
3.3.	Architektonische Optimierung	66
3.3.1.	Referenzarchitektur	66
3.3.2.	Dezentrale Architektur	66
3.3.3.	Sternarchitektur	67
3.3.4.	Verschiebung des Hauptverteilers	68
3.3.5.	Dezentrale Architektur mit lokaler Gleichstromerzeugung	69
3.3.6.	Erhöhung der Versorgungsspannung	70
3.4.	Technische Rahmenbedingungen	70
3.4.1.	Referenzarchitektur	71
3.4.2.	Systemvoraussetzungen	71
3.4.3.	Berechnungsannahmen	71
3.4.4.	Anforderungen an zukünftige Verteilungsstruktur	73
3.4.5.	Trends im Bereich der Elektrik-/Elektronik-Architekturen	74
3.5.	Kapitelzusammenfassung	74
4.	Gewichtsoptimierungsstrategien für elektrische Flugzeugbordnetze	75
4.1.	Vom mechanistischen zum systemischen Ansatz	76
4.1.1.	Mechanistischer Optimierungsansatz	77
4.1.2.	Globaler Systemansatz	77
4.2.	Optimierungsansatz durch Systemaufteilung	78
4.2.1.	Kollaborativer Optimierungsansatz	78
4.2.2.	Multi-objektiver Optimierungsansatz	80
4.2.3.	Problemzerlegung in der multi-objektiven Optimierung	81

4.3.	Optimierung des Bordsystems mit kollaborativ-multikriteriellem Ansatz	82
4.4.	Mathematische Formulierung	83
4.4.1.	Definition eines Optimierungsproblems	84
4.4.2.	Klassifizierung von Optimierungsproblemen	86
4.4.3.	Multikriterielle Optimierung	88
4.4.4.	Multi-objektive Optimierung nach Pareto	89
4.5.	Kapitelzusammenfassung	92
5.	Gewichtsmodellierung der elektrischen Verteilungsstruktur im Flugzeug	93
5.1.	Hauptkomponenten von Flugzeugen	94
5.2.	Gewicht der anderen Ausrüstung und Teilsysteme	95
5.3.	Zusammenstellung der Flugzeuggewichtskomponenten	95
5.3.1.	Diagramm des Nutzlastbereichs	97
5.4.	Zusammenstellung des Gewichts eines elektrischen Bordnetzsystems	98
5.5.	Elektrische Verkabelung im Flugzeug	98
5.5.1.	Technische Anforderungen an Drähte und Kabel	99
5.5.2.	Segregieren der Drähte und Kabel in der Verteilungsstruktur	100
5.6.	Gewichtsberechnung des elektrischen Bordnetzsystems	101
5.6.1.	Bestimmung der Kabellänge	101
5.6.2.	Berechnung der Architekturgewichte	102
5.7.	Mathematische Modellierung des Gewichts des Verteilungssystems	104
5.7.1.	Polynom-Interpolation	105
5.7.2.	Spline-Interpolation	105
5.7.3.	Kriging-Verfahren	107
5.8.	Auswertung der Architekturmodelle	107
5.8.1.	Gewichtsverhalten in Abhängigkeit von der Anzahl der SPDBs	108
5.8.2.	Gewichtsverhalten in Abhängigkeit von Flugzeugprogrammen	112
5.8.3.	Zusammenfassung der Architekturen	116
5.8.4.	Dreidimensionale Darstellung der Gewichtsersparnis in Abhängigkeit von der Anzahl der SPDBs und der Flugzeugprogramme	118
5.8.5.	Interpolation und Extrapolation der Architekturen	122
5.8.6.	Ergebnisse der Extrapolation der Architekturen außerhalb des untersuchten Datenbereichs	122
5.9.	Zusammenfassung der Gewichtsmodellierung	124
5.10.	Umwandlung der Verteilungsstruktur	125
5.10.1.	Steigende Komplexität der Verteilungsstruktur	125
5.10.2.	Kabellängen in Abhängigkeit der Verteilungsstruktur	125
5.10.3.	Grafische Darstellung der Kabellängen	127
5.10.4.	Bewertungskriterien der untersuchten Verteilungsstruktur	127
5.11.	Kapitelzusammenfassung	128
6.	Weitere Optimierungsansätze für das elektrische Bordnetz im Flugzeug	129
6.1.	Optimierung des Energieverbrauchs	129
6.1.1.	Last- und Powermanagement	130
6.1.2.	Funktion des Energiemanagements	134

6.1.3.	Regelstruktur des Energie- und Lastmanagements	135
6.1.4.	Bordnetzschutz	136
6.1.5.	Schutzmechanismus im Flugzeugbordnetz	137
6.2.	Topologie eines Powermanagements	138
6.2.1.	Zentrales Powermanagement	138
6.2.2.	Dezentrales Powermanagement	139
6.3.	Problematik der Leistungsdimensionierung im Flugzeugbordnetz	140
6.3.1.	Elektrisches Lastprofil	140
6.4.	Einsatz eines Energiemanagements mit Lastpriorisierung	142
6.4.1.	Wahl einer geeigneten Lastmanagementstrategie	142
6.4.2.	Lastpriorisierung	143
6.4.3.	Lastgruppierungen	145
6.4.4.	Rahmenbedingungen der Lastpriorisierungen	145
6.4.5.	Lastabschaltung und -zuschaltung	146
6.4.6.	Simulationsstudie	148
6.5.	Kapitelzusammenfassung	150
7.	Zusammenfassung und Ausblick	151
7.1.	Zusammenfassung	151
7.2.	Ausblick	154
A.	Anhang	157
A.1.	Vergleich zwischen Aluminium- und Kupfer-Kabel	157
A.2.	Kabelauslegung im Flugzeugbordnetz	159
A.3.	Spannungsabfall auf Leitungen	164
B.	Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	165
	Stichwortverzeichnis	169
	Literaturverzeichnis	173
	Lebenslauf	187
	Curriculum Vitae	188