

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	10
1.2	Zielsetzung und Abgrenzung	11
1.3	Vorgehensweise	13
2	Stand der Technik	15
2.1	Asymmetrische Drehstromsysteme	15
2.2	Elektrische Flugzeugbordnetze	17
2.2.1	Konventioneller Bordnetzaufbau	17
2.2.2	Elektrische Lastanalysen	19
2.2.3	Kabeldimensionierung	21
2.2.4	Überstromschutzeinrichtungen	22
2.2.5	Lastmanagement	24
2.3	Bekannte Optimierungsansätze	25
2.3.1	More Electric Aircraft	25
2.3.2	More Composite Aircraft	27
2.4	Mathematische Optimierungsprobleme	28
2.4.1	Nichtlineare Optimierungsprobleme	29
2.4.2	Approximationsalgorithmen	31
2.4.3	Last-Wiederverteilungsproblem	31
2.5	Einsatz von Lastverteilungsverfahren	32
2.5.1	Aufgaben und Ziele der Leitersymmetrierung	32
2.5.2	Leitersymmetrierung in der klassischen Energieversorgung	33
2.5.3	Netzwerk-Rekonfiguration in der elektrischen Energieversorgung	35
3	Modellbildung	38
3.1	Referenzflugzeug	38
3.1.1	Lastabbildung anhand von gemessenen Lastströmen	40
3.1.2	Erweiterte Architekturen für die Netzwerk-Rekonfiguration	41
3.2	Modellierung des Rückleiternetzwerkes	42
3.2.1	Rückstromanschlusspunkte	43
3.2.2	Ersatzschaltbild des Rückleiternetzwerkes	44
3.2.3	Rückstrompfade	46
3.3	Weitere Optionen zur Lastumschaltung	50
3.4	Gewichtsberechnungen	51
3.4.1	Gewicht der Mehrfachschalter	52
3.4.2	Gewicht der Verkabelung	54
3.4.3	Gewicht bei einer Einzelversorgung der SPDB	55
3.5	Zusammenfassung zum Kapitel 3	57
4	Bordnetzintegration und Implementierung	58
4.1	Integrationskonzept	58
4.1.1	Integrationsebene der Schaltknoten	58

4.1.2	Einschränkungen bei der Integration	60
4.1.3	Notwendige Modifikationen der Bordnetzarchitektur	61
4.2	Implementierung der Lastumverteilungsverfahren	62
4.3	Datenbasis der Implementierung	63
4.3.1	Auslegungsbasiertes Umschalten.....	64
4.3.2	Parameter des Optimierungsalgorithmus	66
4.3.3	Echtzeitfähiges Umschalten.....	67
4.4	Betrachtung der Gesamtsystemebene	68
4.4.1	Lastumverteilungsverfahren mit einem Lastmanagement	68
4.4.2	Fehlerwahrscheinlichkeit eines zweipoligen Kurzschlusses.....	69
4.4.3	Versorgungssicherheit bei Nutzung von Schaltknoten	70
4.4.4	Versorgung von flugrelevanten Lasten durch Sekundärverteilerboxen.....	73
4.5	Zusammenfassung zum Kapitel 4	74
5	Lastumverteilungsverfahren	75
5.1	Leitersymmetrierung	75
5.1.1	Leitersymmetrierung mit Lastumschaltungen	75
5.1.2	Zielfunktion und Anwendungsebene	77
5.1.3	Vorgehen bei der Leitersymmetrierung	81
5.1.4	Simulatorische Betrachtung	83
5.1.5	Heuristik für das echtzeitfähige Umschalten	87
5.1.6	Validierung der echtzeitfähigen Heuristik	92
5.1.7	Simulation des echtzeitfähigen Umschaltens.....	94
5.2	Netzwerk-Rekonfiguration.....	96
5.2.1	Einsatz der Netzwerk-Rekonfiguration im Flugzeug.....	96
5.2.2	Ergebnisse des auslegungsbasierten Umschaltens.....	98
5.3	Multi-symmetrierendes Leistungsmanagement (MSLM).....	101
5.3.1	Simulationsergebnis des auslegungsbasierten Umschaltens.....	101
5.3.2	Heuristik für das echtzeitfähige MSLM.....	102
5.4	Gewichtsbestimmung.....	106
5.5	Zusammenfassung zum Kapitel 5	109
6	Experimentelle Umsetzung der Lastumverteilungsverfahren	110
6.1	Mehrfachscharter mit Sicherungsfunktion	110
6.1.1	Aufbau und Anforderungen an den Mehrfachscharter.....	110
6.1.2	Realisierung des Mehrfachscharters.....	111
6.1.3	Mess- und Schutztechnik	113
6.1.4	Vermeidung von mehrpoligen Kurzschlüssen	114
6.2	Praktische Umsetzung der Umschaltstrategien.....	115
6.2.1	Schalten sinusförmiger Wechselspannungen.....	115
6.2.2	Experimente zu Umschaltstrategien.....	117
6.3	Teststand und Versuchsdurchführung.....	120
6.3.1	Aufbau des Schaltknotens	120
6.3.2	Aufbau des Teststandes.....	121
6.3.3	Versuchsdurchführung der Lastumverteilungen.....	123

6.4	Zusammenfassung zum Kapitel 6	128
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
7.1	Zusammenfassung.....	129
7.2	Ausblick	131
8	Anhang	132
8.1	Anhang zum Kapitel 2	132
8.1.1	Zerlegung nach symmetrischen Komponenten.....	132
8.1.2	Flugzeugspezifische Kabel in AWG.....	133
8.1.3	Steinmetzschaltung und Scott-Transformator.....	133
8.2	Anhang zum Kapitel 3	134
8.2.1	Einteilung der Boden- und Flugphasen.....	134
8.2.2	Maximal erlaubte Leistungsfaktoren in Flugzeugen.....	134
8.2.3	Aufbereitung der Messwerte	135
8.2.4	Sternpunktbehandlung	135
8.2.5	Zusätzliches Gewicht der Mehrfachschalter	135
8.3	Anhang zum Kapitel 4	136
8.3.1	Design Assurance Level.....	136
8.4	Anhang zum Kapitel 5	137
8.4.1	Simulationsergebnisse.....	137
8.4.2	Lastströme für Leitersymmetrierung	138
8.4.3	Anzahl der Lasten für die Simulation mit ELA-Daten	139
8.4.4	Numerisches Experiment bei ausschließlich positiver Phasenverschiebung.....	139
8.4.5	Ergebnisse der Netzwerk-Rekonfiguration für alle Varianten.....	140
8.4.6	Ergebnisse des multi-symmetrierenden Leistungsmanagement	140
8.4.7	Ergebnisse der Lastumverteilungsverfahren der linken Kabinenseite.....	141
8.5	Anhang zum Kapitel 6	142
8.5.1	Verwendete Geräte und Messtechnik	142
8.5.2	Bidirektionale Halbleiterschalter und Transistortypen	143
8.5.3	Zeichnungen und Fotos zum Schaltknoten	144
8.5.4	Weitere experimentelle Ergebnisse.....	145
8.5.5	Experimentelles Ergebnis beim Umschalten einer elektronischer Last.....	146
8.5.6	Experimentelles Ergebnis mit dynamischer Last im Automatik-Modus	147
9	Nomenklatur	149
9.1	Abkürzungen	149
9.2	Formelzeichen	151
9.3	Indizes	152
10	Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	153
11	Literaturverzeichnis	157
12	Lebenslauf	163