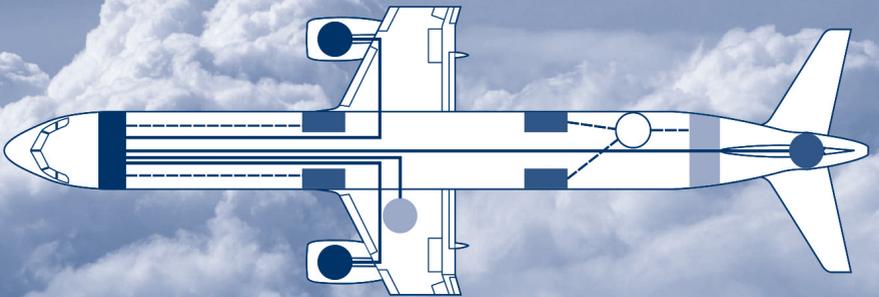


Robert Doering  
Hamburg

Rechnergestützter Entwurf lokaler  
elektrischer Energiesysteme zur  
Individualisierung der Kabinen-  
Energieversorgung von  
Verkehrsflugzeugen



03-2021

**Rechnergestützter Entwurf  
lokaler elektrischer Energiesysteme  
zur Individualisierung der  
Kabinen-Energieversorgung von  
Verkehrsflugzeugen**

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

**Robert Doering**

Master of Science

aus Hamburg

2021

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke  
Institut für Flugzeug-Systemtechnik  
Technische Universität Hamburg
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Christian Becker  
Institut für Elektrische Energietechnik  
Technische Universität Hamburg

Tag der mündlichen Prüfung: 30. April 2021

Schriftenreihe Flugzeug-Systemtechnik

Band 3/2021

**Robert Doering**

**Rechnergestützter Entwurf lokaler elektrischer  
Energiesysteme zur Individualisierung der Kabinen-  
Energieversorgung von Verkehrsflugzeugen**

Shaker Verlag  
Düren 2021

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8209-8

ISSN 1861-5279

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Flugzeug-Systemtechnik an der Technischen Universität Hamburg.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Frank Thielecke, der als Leiter des Instituts sein Vertrauen in mich gesetzt und mir so erst die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Dissertation gegeben hat. Die Zeit am Institut war für mich auf vielen Ebenen extrem lehrreich. Die mir gewährten Freiräume haben in erheblichem Maße zu meiner fachlichen und persönlichen Weiterentwicklung beigetragen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Becker möchte ich an dieser Stelle für die Übernahme des Zweitgutachtens danken.

Die inhaltlichen Grundlagen dieser Arbeit entstanden im Kontext der Industrieprojekte STEVE und GETPOWER in Zusammenarbeit mit der AIRBUS OPERATIONS GMBH bzw. der DIEHL AEROSPACE GMBH. Meinen Projektpartnern möchte ich für den wissenschaftlichen Austausch und die angenehme Zusammenarbeit danken. Stellvertretend seien hier Barnaby Law, Hauke Lüdders, Jörg Tappermann, Jan Bartelmann, Sebastian Altmann sowie Lars Fucke und Sascha Schäffer genannt. Aus den zahlreichen gemeinsamen Diskussionen sind viele wichtige Anregungen für die vorliegende Arbeit entstanden.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen ehemaligen Institutskollegen, mit denen ich so einige Schlachten geschlagen habe. Ich habe die tägliche Arbeitsatmosphäre als fachlich enorm anregend und persönlich sehr herzlich empfunden. Stellvertretend möchte ich an dieser Stelle Hendrik Strummel, Jan Grymlas, Tobias Kreitz und Sergej Jäger aus der Forschungsgruppe „Elektrische Energieversorgung und Brennstoffzelle“ für ihre fachlichen Beiträge danken. Ihnen gilt genauso wie Marcus Lerch, Felix Mardt, Lennard Nordmann, Marc Jünemann, Riko Bornholdt und Julian Theiß mein Dank für die freundschaftliche Verbundenheit. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Studenten, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Bei meiner Familie und meinen Freunden möchte ich mich für den Rückhalt und die Unterstützung bedanken. Sie alle hatten in der einen oder anderen Art und Weise ihren Anteil an dem erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit.

München im Juli 2021

Robert Doering



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>xvii</b>
Formelzeichen . . . . .	xvii
Indizes . . . . .	xxi
Abkürzungen . . . . .	xxiv
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziele der Arbeit . . . . .	3
1.2 Struktur der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Heutiger Flugzeugentwurfsprozess . . . . .	7
2.2 Rechnerunterstützung im Flugzeugvorentwurf . . . . .	10
2.3 Elektrische Energieversorgung an Bord von Verkehrsflugzeugen	12
2.4 Energiequellen an Bord von Verkehrsflugzeugen . . . . .	15
2.4.1 Batteriesysteme . . . . .	17
2.4.2 Brennstoffzellensysteme . . . . .	18
2.4.3 Hybride Brennstoffzellensysteme . . . . .	24
<b>3 Ganzheitlicher Entwurfsprozess</b>	<b>25</b>
3.1 Anforderungen an den Entwurfsprozess . . . . .	26
3.2 Entwickelter Entwurfsprozess . . . . .	27
<b>4 Integrationsstrategien und Anforderungen</b>	<b>31</b>
4.1 Identifikation von Entkopplungsstrategien . . . . .	32
4.1.1 Gewichtseinsparungen auf Generatorebene . . . . .	34
4.1.2 Gewichtseinsparungen auf Verteilungsebene . . . . .	35
4.1.3 Qualitative Kriterien . . . . .	37

4.2	Definition von Individualisierungsstrategien . . . . .	38
4.3	Werkzeug zur Erzeugung von Auslegungsvektoren . . . . .	39
4.3.1	Atmosphären-Modul . . . . .	41
4.3.2	Flugprofil-Modul . . . . .	41
4.3.3	Lastprofil-Modul . . . . .	44
4.3.4	Benutzeroberfläche . . . . .	48
4.4	Anforderungsanalyse auf Systemebene . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Rechnergestützter Systementwurf</b>	<b>55</b>
5.1	Identifikation von Hybridisierungsstrategien . . . . .	57
5.2	Architekturentwurf . . . . .	66
5.2.1	Elektrisches System . . . . .	67
5.2.2	Kühlsystem . . . . .	69
5.2.3	Sauerstoffversorgungssystem . . . . .	73
5.2.4	Wasserstoffversorgungssystem . . . . .	75
5.3	Anforderungsanalyse auf Subsystemebene und Identifikation von Auslegungspunkten . . . . .	77
5.4	Stationäre Systemauslegung . . . . .	78
5.4.1	Bekanntes Verfahren zur Auslegung impliziter Systeme .	79
5.4.2	Methodik zur stationären Systemauslegung . . . . .	81
5.4.3	Auslegung der Energiequellen . . . . .	86
5.4.4	Auslegung des elektrischen Systems . . . . .	87
5.4.5	Auslegung des Kühlsystems . . . . .	88
5.4.6	Auslegung des Sauerstoffversorgungssystems . . . . .	92
5.4.7	Auslegung des Wasserstoffversorgungssystems . . . . .	93
5.5	Systemevaluierung . . . . .	93
5.5.1	Aufbau von Simulationsmodellen . . . . .	94
5.5.2	Durchführung der Systemevaluierung . . . . .	97
5.6	Systemoptimierung . . . . .	99
5.6.1	Systemseitige Optimierung . . . . .	99
5.6.2	Verbraucherseitige Optimierung . . . . .	100

<b>6</b>	<b>Bewertung auf Flottenebene</b>	<b>107</b>
6.1	Bewertung auf Flugzeugebene . . . . .	108
6.1.1	Methodische Ansätze . . . . .	108
6.1.2	SYSFUEL <sup>+</sup> . . . . .	109
6.2	Bewertung auf Flottenebene . . . . .	113
6.2.1	Netzwerk-, Flotten- und Betriebsanalyse . . . . .	114
6.2.2	Identifikation von Bewertungsfunktionen . . . . .	116
6.2.3	Abschließende Bewertung . . . . .	119
<b>7</b>	<b>Beispielentwicklungen von lokalen elektrischen Energiesystemen</b>	<b>121</b>
7.1	Fallbeispiel: Zukünftige Kurz- und Mittelstrecken-Flugzeugfamilie . . . . .	121
7.2	Teil I: Identifikation einer Integrationsstrategie . . . . .	124
7.2.1	Identifikation einer Entkopplungsstrategie . . . . .	124
7.2.2	Definition einer Individualisierungsstrategie . . . . .	127
7.2.3	Anforderungsanalyse auf Systemebene . . . . .	128
7.3	Teil II: Systementwurf . . . . .	130
7.3.1	Phase 1: Identifikation geeigneter Hybridisierungsstrategien . . . . .	131
7.3.2	Phase 2: Architekturentwurf . . . . .	132
7.3.3	Phase 3: Anforderungsanalyse auf Subsystemebene und Identifizierung von Auslegungspunkten . . . . .	134
7.3.4	Phase 4: Stationäre Systemauslegung . . . . .	138
7.3.5	Phase 5: Systemevaluierung . . . . .	140
7.3.6	Phase 6: Systemoptimierung . . . . .	143
7.4	Teil III: Bewertung auf Flottenebene . . . . .	146
7.4.1	Netzwerk-, Flotten- und Betriebsanalyse . . . . .	146
7.4.2	Identifikation von Bewertungsfunktionen . . . . .	149
7.4.3	Abschließende Bewertung . . . . .	150
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
<b>A</b>	<b>Komponentendatenbank</b>	<b>157</b>

<b>B Fallbeispiel: Randbedingungen und Anforderungen</b>	<b>159</b>
B.1 Berücksichtigte Fluggesellschaften . . . . .	159
B.2 Anforderungen . . . . .	160
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>165</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Flugzeugentwurfsprozess nach TORENBEEK [146] . . . . .	8
2.2	Installierte elektrische Leistung in Verkehrsflugzeugen nach [97] . .	12
2.3	Generisches elektrisches Energieversorgungssystem eines Verkehrsflugzeugs vereinfacht nach [102] . . . . .	13
2.4	Topologie des elektrischen Netzes moderner Verkehrsflugzeuge . . .	14
2.5	Spezifische Energie und spezifische Leistung unterschiedlicher Energiequellen nach [31], [11] und [58] . . . . .	16
2.6	Prinzipieller Aufbau einer Brennstoffzelle nach [93] . . . . .	20
2.7	Schematische Darstellung einer Spannungs-Stromdichten-Kennlinie einer PEM-Brennstoffzelle nach [112] . . . . .	22
2.8	Leistungsdichten unterschiedlicher Brennstoffzellenstapel nach Herstellerdaten ([15], [14], [74], [117], [118]) . . . . .	23
3.1	Ganzheitlicher Entwurfsprozess für lokale elektrische Energiesysteme	28
4.1	Methodisches Vorgehen zur Identifikation von Integrationsstrategien und Anforderungen . . . . .	31
4.2	Entkopplung zweier SPDBs sowie der hinteren Bordküche . . . . .	33
4.3	Struktureller Aufbau des Missions- und Lastprofilgenerators . . . .	40
4.4	Geschwindigkeitsprofil eines A320 im Steigflug nach [2] . . . . .	43
4.5	Beispiele für unterschiedliche Typen von Verbraucherlastprofilen .	45
4.6	Benutzeroberfläche des MiLAN-Werkzeuges . . . . .	50
4.7	Typische Verbrauchertypen im Kabinennetz eines modernen Kurz- und Mittelstreckenflugzeugs nach [24] . . . . .	52
5.1	Methodik für den rechnergestützten Systementwurf lokaler elektrischer Energiesysteme . . . . .	55
5.2	Methodischer Ablauf zur Identifikation einer Hybridisierungsstrategie für lokale elektrische Energiesysteme . . . . .	59
5.3	Potentielle Subsysteme von lokalen elektrischen Energiesystemen .	66

5.4	Netztopologievarianten für hybride Brennstoffzellensysteme . . . . .	68
5.5	Architekturvariante für die Luftkühlung eines Brennstoffzellensystems mit der Kabine als Wärmesenke . . . . .	70
5.6	Architekturvarianten für die Flüssigkühlung eines Brennstoffzellensystems . . . . .	71
5.7	Architekturvarianten für die Versorgung eines Brennstoffzellenstapels mit Sauerstoff . . . . .	74
5.8	Wechselwirkungen in der Systemauslegung eines lokalen elektrischen Energiesystems . . . . .	82
5.9	Ablaufschema für die stationäre Systemauslegung . . . . .	84
5.10	Kombination der Auslegungsmodule für die Auslegung unterschiedlicher Kühlsystemarchitekturen . . . . .	89
5.11	Vereinfachtes Ablaufschema für die Auslegung des sekundären Kühlkreislaufes . . . . .	91
5.12	Mögliche Systemautomation für ein hybrides Brennstoffzellensystem (vereinfachte Darstellung) . . . . .	96
5.13	Methodisches Vorgehen zur systemseitigen Optimierung der Auslegung von lokalen elektrischen Energiesystemen . . . . .	99
5.14	Prinzipielle Funktionsweise eines Last-Managements . . . . .	100
5.15	Schnittstellen und Zustände des unidirektionalen Last-Managements	102
5.16	Implementierung des unidirektionalen Last-Managements in Form eines Zustandsautomaten . . . . .	103
5.17	Schwingungseffekt beim Einsatz unidirektionaler LM-Algorithmen in Kombination mit einem hybriden Brennstoffzellensystem . . . . .	105
6.1	Prinzipieller Aufbau von SYSFUEL <sup>+</sup> nach [93] . . . . .	110
6.2	Methodisches Vorgehen zur Bewertung lokaler elektrischer Energiesysteme auf Flottenebene . . . . .	114
6.3	Methodisches Vorgehen zur Identifikation von Bewertungsfunktionen	117
7.1	Referenzarchitektur für das elektrische Kabinen-Energieversorgungssystem eines zukünftigen Kurz- und Mittelstreckenflugzeugs .	123
7.2	Realisierbare Gewichtseinsparungen durch die Entkopplung einzelner Netzwerkkomponenten . . . . .	126

7.3	Auslegungslastprofile für die lokalen elektrischen Energiesysteme des Fallbeispiels für 1000 km und 5000 km Missionen . . . . .	129
7.4	Untersuchung von Hybridisierungsstrategien für die Luxus-Variante (Ausschnitt) . . . . .	132
7.5	Systemarchitekturen für die betrachteten lokalen elektrischen Energiesysteme . . . . .	134
7.6	Auftretende Verlustwärme im Verlauf einer 1000 km-Mission der Luxus-Variante . . . . .	136
7.7	Gewichtsanteile der einzelnen Subsysteme des lokalen elektrischen Systems der Luxus-Variante ( $m_{\text{Sys}} = 105 \text{ kg}$ ) . . . . .	139
7.8	Simulationsergebnisse zur Überprüfung einiger Anforderungen bzgl. der Energiequellen und dem elektrischem Subsystem . . . . .	141
7.9	Numerische Verteilung der Missionslängen innerhalb der Referenzflotte . . . . .	148
7.10	SYSFUEL <sup>+</sup> -Analysen . . . . .	150
7.11	Veränderungen des Missionstreibstoffbedarfs nach Gruppen ähnlicher Flugmissionen und Fluggesellschaftstypen . . . . .	151



# Tabellenverzeichnis

5.1	Numerische Annahmen zur Berechnung des maximal via <i>Cabin-Air-Extraction</i> -Luftstrom abführbaren Wärmestroms . . . . .	72
5.2	Spezifische Leistungen unterschiedlicher Stromrichtertypen nach [24] und [86] . . . . .	87
6.1	Aufbau der Missionsdatenbank . . . . .	115
7.1	Numerische Werte in Metern zur Beschreibung der Positionen der Netzwerkkomponenten gemäß der in Bild 7.1 dargestellten Systemarchitektur . . . . .	123
7.2	Bereitzustellende Leistung pro Netzwerkkomponente . . . . .	124
7.3	Gewichtseinsparung nach Flugzeugfamilienmitglied . . . . .	127
7.4	Hybridisierungsstrategien und erwartete Systemgewichte für die betrachteten Varianten lokaler elektrischer Energiesysteme . . . . .	133
7.5	Auslegungsergebnisse für die betrachteten Varianten lokaler elektrischer Energiesysteme und ihrer Subsysteme . . . . .	138
7.6	Optimierungsergebnisse für die Luxus-Varianten lokaler elektrischer Energiesysteme nach Optimierungsansätzen . . . . .	145
7.7	Auslegungsergebnisse für die betrachteten Varianten lokaler elektrischer Energiesysteme nach der Systemoptimierung . . . . .	146
7.8	Parameter der approximativen Bewertungsfunktionen nach Gruppen ähnlicher Flugmissionen . . . . .	151
A.1	Spezifische Massen und Widerstände für Nexans ABS 1354 ADB Kabel (Auszug) [104] . . . . .	157
A.2	Dimensionen von Rohleitungen aus Baustahl nach DIN 2440 . . . . .	157
A.3	Herstellernamen und Modellbezeichnungen relevante Systemkomponenten nach [15], [14], [117], [118], [127], [99], [156], [129], [121], [18], [27], [26], [29], [147], [55], [161] . . . . .	158

B.1	Klassifizierung der im Rahmen des Fallbeispiels betrachteten Fluggesellschaften . . . . .	159
B.2	Allgemeine Anforderungen auf Systemebene . . . . .	160
B.3	Für die Mittel- und die Luxus-Variante gültige Anforderungen . . .	161
B.4	Für die Basis-Variante gültige Anforderungen . . . . .	162
B.5	Für die Mittel-Variante gültige Anforderungen . . . . .	162
B.6	Für die Luxus-Variante gültige Anforderungen . . . . .	163

# Nomenklatur

Die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen sind nachfolgend nach Kategorien zusammengestellt. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt jeweils im Kontext der Arbeit.

## Formelzeichen

### Lateinische Formelzeichen: Funktionen und Skalare

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	[–]	Faktor
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittfläche
$b_s$	[kg/s/N]	spezifischer Treibstoffverbrauch
$C$	[As]	Kapazität
$C_D$	[–]	Widerstandsbeiwert
$C_L$	[–]	Auftriebsbeiwert
$C_{rate}$	[1/h]	C-Rate
$d$	[m]	Durchmesser
$D$	[N]	<i>Drag</i>
$e$	[–]	Potentialgröße
$E$	[V]	elektrisches Potential
$E$	[Ws]	Energiemenge
$E^*$	[Ws/kg]	spezifische Energiemenge
$ESF$	[–]	<i>Energy-Share-Factor</i>
$f$	[–]	Faktor
$f$	[–]	Flussgröße
$f$	[Hz, 1/s]	Frequenz
$F$	[As/mol]	Faraday-Konstante
$F$	[kg/s]	<i>Fuel flow</i>

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$F$	[N]	Kraft, Schubkraft
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	Gravitationskonstante
$h$	[m]	Höhe
$h$	[–]	Schrittweite
$\dot{h}$	[m/s]	Höhenänderungsrate
$\dot{H}$	[W]	Enthalpiestrom
$h_i$	[J/mol]	unterer Heizwert
$I$	[A]	Elektrischer Strom
$I_{\text{def}}$	[–]	Deformationsintervall
$I_h$	[–]	Punktgitter
$k$	[–]	Faktor
$l$	[m]	Länge
$m$	[kg]	Masse
$m^*$	[kg/m], [kg/kg]	spezifische Masse
$\dot{m}$	[kg/s]	Massenstrom
$M$	[Nm]	Drehmoment
$M$	[g/mol]	molare Masse
$Ma$	[–]	Machzahl
$n$	[–]	Anzahl
$p$	[Pa]	Druck
$P$	[W]	Leistung
$P^*$	[W/kg]	spezifische Leistung
$Q$	[Ws]	Wärmemenge
$\dot{Q}$	[W]	Wärmestrom
$\dot{r}$	[m/s]	horizontale Fluggeschwindigkeit
$R$	[m]	Missionsreichweite
$R$	[J/mol/K]	Universelle Gaskonstante
$R^*$	[Ohm/m]	spezifischer Widerstand
$Re$	[–]	Reynoldszahl
$s$	[km]	Strecke
$S$	[J/K]	Entropie
$S$	[–]	Sicherheitsfaktor
$S_W$	[m <sup>2</sup> ]	Bezugsflügelfläche

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$t$	[s]	Zeit
$T$	[K]	Temperatur
$T$	[N]	<i>Thrust</i>
$U$	[V]	Spannung
$v$	[m/s]	Geschwindigkeit
$V$	[V]	Spannung
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$\dot{v}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung
$W$	[Nm]	Arbeit
$W$	[kg]	Gewichtskraft

### Lateinische Formelzeichen: Vektoren und Matrizen

Zeichen	Bedeutung
$HG$	Hybridisierungsgrad
$HS$	Hybridisierungsstrategie
$u$	Vektor der Näherungslösung
$x$	Zustandsvektor
$y$	Ausgangsvektor
$z$	Vektor mit algebraischen Variablen

### Chemische Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung
C	Kohlenstoff
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	Wasser
LiFePO <sub>4</sub>	Lithium-Eisen-Phosphat

---

<b>Zeichen</b>	<b>Bedeutung</b>
N <sub>2</sub>	Stickstoff
O <sub>2</sub>	Sauerstoff

---

### Griechische Formelzeichen

---

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$\alpha$	[–]	Proportionalitätskonstante
$\beta$	[–]	Proportionalitätskonstante
$\gamma$	[–]	Proportionalitätskonstante
$\gamma$	[rad]	Bahnneigungswinkel
$\delta$	[–]	Proportionalitätskonstante
$\delta$	[–]	Differenz
$\Delta$	[–]	Differenz
$\epsilon$	[–]	Proportionalitätskonstante
$\epsilon$	[–]	Effizienz
$\eta$	[–]	Wirkungsgrad
$\eta$	[Pa · s]	dynamische Viskosität
$\theta$	[–]	Verbraucherpriorität
$\Theta$	[–]	prioritätsgewichtete Verbraucherlastströme
$\lambda$	[–]	Reaktionsstoichiometrie
$\lambda_w$	[–]	Flügelzuspitzung
$\xi$	[–]	Massenanteil
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$	[–]	OSWALD-Faktor
$\tau$	[s]	Zeit
$\phi$	[–]	relative Feuchtigkeit
$\psi$	[–]	Verbraucherbetriebsszenario
$\omega$	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
$\Omega$	[–]	Verbraucherkonfiguration

---

---

**Indizes**

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
0	= Initialwert, Standardbedingungen
a	= außen
A	= Pol-Name
AC	= <i>Aircraft</i>
air	= Luft
akt	= Aktivierung
amb	= <i>ambient</i>
an	= <i>Anode</i>
B	= Pol-Name
BAT	= Batterie
BK	= Bordküche
BM	= Benutzermaske
BOP	= <i>Balance-of-Plant</i>
CAS	= <i>Calibrated Air Speed</i>
cat	= <i>Cathode</i>
CAX	= <i>Cabin-Air-Extraction</i>
cool	= <i>Coolant</i>
CWH	= <i>Cockpit-Window-Heating</i>
D	= <i>Drag</i>
dom	= Domäne
e	= Ende
el	= elektrisch
erf	= erforderlich
ES	= Entkopplungsstrategie
ESF	= <i>Energy-Share-Factor</i>
F	= <i>Fuel</i>
FC	= <i>Fuel Cell</i>
FCS	= <i>Fuel Cell System</i>
fuel	= <i>Fuel</i>
GD	= Gleitender Durchschnitt
gen	= Generator

---

---

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
ges	= gesamt
grenz	= Grenze
h	= Hysterese
h	= Schrittweite
h	= Wärme
H <sub>2</sub>	= Wasserstoff
H <sub>2</sub> O	= Wasser
i	= innen, Zählvariable
I	= Strom
IAS	= <i>Indicated Air Speed</i>
IFE	= <i>In-Flight Entertainment</i>
imp	= implizit
init	= initial
inst	= Installation
j	= Zählvariable
k	= Zählvariable
Kab	= Kabine
KM	= Komponentenmaske
kom	= Komponente
kon	= konsumiert
Konz	= Konzentration
Kühl	= Kühlmittel
kÜl	= kritische Überlast
lim	= Limit
m	= mittel
m	= Zählvariable
max	= maximal
min	= minimal
Misch	= Mischung
mkon	= maximal kontinuierlich
MZFW	= <i>Maximum Zero Fuel Weight</i>
n	= Zählvariable
nenn	= Nennwert

---

---

<b>Index</b>	<b>Bedeutung</b>
NTU	= <i>Number of Transfer Units</i>
O <sub>2</sub>	= Sauerstoff
Ohm	= Ohm'sch
opt	= optimal
p	= konstanter Druck
PAX	= Passagiere
puls	= Puls
ref	= Referenz
res	= rest
rot	= rotatorisch
std	= Standart
Sub	= Subsystem
Sys	= System
t	= Zeit
TAS	= <i>True Air Speed</i>
TE	= Tubrineneintritt
TM	= Treibstoffmasse
TOW	= <i>Take-Off-Weight</i>
TW	= Triebwerk
Ul	= Unterlast
Ül	= Überlast, Verbraucher
V	= Verlust
var	= variabel
WL	= Wellenleistung
x	= Zählvariable
Ziel	= Zielfunktion
ZL	= Zapfluft
∞	= Bedingungen in der freien Strömung

---

## Abkürzungen

---

<b>Abk.</b>	<b>Bedeutung</b>
AC	= <i>Alternating Current</i>
A/C	= <i>Aircraft</i>
ADS-B	= <i>Automatic Dependent Surveillance - Broadcast</i>
APU	= <i>Auxiliary-Power-Unit</i>
ATA	= <i>Air-Transport-Association</i>
ATU	= <i>Auto-Transformer-Unit</i>
AWG	= <i>American-Wire-Gauge</i>
BADA	= <i>Base of Aircraft Data</i>
BK	= <i>Bordküche</i>
BOP	= <i>Balance-of-Plant</i>
BTB	= <i>Bus Tie Breaker</i>
CAS	= <i>Calibrated Air Speed</i>
CAX	= <i>Cabin-Air-Extraction</i>
CS	= <i>Certification Specification</i>
CWH	= <i>Cockpit-Window-Heating</i>
DAE	= <i>Differential-Algebraic Equation</i>
DC	= <i>Direct Current</i>
DNR	= <i>Durchmesser Normreihe</i>
ELA	= <i>Electric-Load-Analysis</i>
ESF	= <i>Energy-Share-Faktor</i>
ES	= <i>Entkopplungsstrategie</i>
FC	= <i>Fuel Cell</i>
FCS	= <i>Fuel Cell System</i>
FSNC	= <i>Full-Service-Network-Carrier</i>
GCU	= <i>Generator Control Unit</i>
GD	= <i>Gleitender Durchschnitt</i>
GTB	= <i>Generator Tie Breaker</i>
HG	= <i>Hybridisierungsgrad</i>
HS	= <i>Hybridisierungsstrategie</i>
IAG	= <i>International Airlines Group</i>

---

---

<b>Abk.</b>	<b>Bedeutung</b>
IAS	= <i>Indicated Air Speed</i>
ICAO	= <i>International Civil Aviation Organization</i>
IFE	= <i>In-Flight Entertainment</i>
INV	= <i>(Static) Inverter</i>
KLM	= <i>Koninklijke Luchtvaart Maatschappij</i>
LCC	= <i>Low-Cost-Carrier</i>
LEES	= <i>Lokales elektrisches Energiesystem</i>
LM	= <i>Last-Management</i>
Mach	= <i>Mach-Zahl</i>
MEA	= <i>More Electric Aircraft</i>
MILAN	= <i>Mission-Load-Analyser</i>
MZFW	= <i>Maximum Zero Fuel Weight</i>
NACA	= <i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NTU	= <i>Number of Transfer Units</i>
ODE	= <i>Ordinary Differential Equation</i>
PEM	= <i>Polymer-Elektrolyt-Membran</i>
PEPDC	= <i>Primary Electrical Power Distribution Center</i>
SEPDC	= <i>Secondary Electrical Power Distribution Center</i>
SOC	= <i>State-of-Charge</i>
SPDB	= <i>Secondary Power Distribution Box</i>
TAS	= <i>True Air Speed</i>
TOW	= <i>Take-Off-Weight</i>
TRU	= <i>Transformer Rectifier Unit</i>

---