



Elektroflug

Technologie, Geschichte, Zukunft

Klaus L. Schulte

Elektroflug

– Technologie, Geschichte, Zukunft –

Erste Auflage 2014

Final Version 1.07.10.14

Copyright © 2014 bei K.L.S. Publishing, Köln

Alle Rechte vorbehalten

Vervielfältigungen jeglicher Art z. B. in Form konventioneller Kopiertechnik oder auch mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auch in Auszügen nur mit schriftlicher Genehmigung des Verlags

Herstellung: Verschiedene Druckereien im Auftrag des Verlags

Dieses Buch wurde im Digitaldruckverfahren hergestellt.

Verlag: K.L.S. Publishing, Köln

Umschlaggestaltung, Satz und Layout: K.L.S. Publishing, Köln

Text: Neue deutsche Rechtschreibung

Mit 273 Abbildungen (Grafiken, Fotos) und 35 Tabellen

ISBN-13: 978-3-942095-28-0 (Schwarz-Weiß-Druck)

ISBN-13: 978-3-942095-44-0 (Farbdruck)

ISBN-13: 978-3-942095-63-x (e-Book)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	11
Elektroflug - Technologie, Geschichte, Zukunft -	13
Einleitung	15
Peak-Oil und schwindende Erdöl-Reserven	15
Die Suche nach dem alternativen Antriebsmittel	17
Fossile Energieträger	19
Erneuerbare Energieträger	19
Solarenergie	20
Kategorisierung und Bewertung	21
CO ₂ als Rohstoff	26
Die Antriebsmittel der Zukunft	28
Teil I: Grundlagen	31
Lieferanten elektrischer Energie	33
Akkumulatoren	33
Grundlagen Akkutechnologie	33
Kenngrößen	34
Zugelassene Typen und ihre Eigenschaften	34
Energiespeicherung bei Akkus im Vergleich	36
Neuere Technologien	36
Forschungsprojekte der Akkumulatortechnologien	40
Lithium-Schwefel-Akku	40
Lithium-Luft-Akku	44
Gefahren beim Einsatz moderner Lithium-Akkus	46
Zusammenfassung Akkutechnologie	49
SuperCaps	52
Grundlagen SuperCaps	52
Kenngrößen von SuperCaps	53
Anwendungen von SuperCaps	54
Solarzellen	56
Grundlagen Solarenergie	56
Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle	60
Wirkungsgrad einer Solarzelle	61
Typen von Solarzellen	61
Strom-Spannungs-Kennlinie einer Solarzelle	62
Solarzellen im Flugzeugbau	63

Brennstoffzellensysteme	66
Grundlagen der Brennstoffzelle	66
Aufbau und Funktionsweise einer PEM-Brennstoffzelle	67
Weitere Brennstoffzellentypen	68
PEM-Brennstoffzellensysteme kleiner Leistung	71
Intelligent Energy Brennstoffzellensystem	71
SER Energy Brennstoffzellensystem	72
PEM-Brennstoffzellensysteme höherer Leistung	74
Ballard Mark 1100 (114kW)	75
Nuvera Vehicle Engine (132 kW)	76
SymbioFCCell Green GT (400 kW)	77
Physikalische Grundlagen Wasserstoff	78
Problemzone Wasserstofftank	78
Metallhydridspeicher	79
Gasdruckspeicher	79
Kryospeicher	80
CcGH ₂ -Speicher	82
Carbon-Nanofaserspeicherung (CNF)	83
Betankung, Tankanschlüsse	84
Elektromotoren	85
Aufbau und Funktionsweise von Elektromotoren	85
Gleichstrommotor (GM)	85
Drehstrommotoren	88
Elektrisch erregter Synchronmotor (SM)	88
Permanenterregter Synchronmotor (PSM)	89
Asynchronmotor (ASM)	91
Geschalteter Reluktanzmotor (SRM)	92
Transversalflussmotor (TFM)	93
Bauformen von Elektromotoren im Vergleich	94
HTS-Elektromotoren	95
Elektrische Motorsteuerung	99
Arbeitsbereich von Elektromotoren	99
Leistungshalbleiter für die Motorsteuerung	100
Elemente und Funktionsweise der Motorsteuerung	102
Realisierte Flugelektromotoren	108
Flugelektromotoren kleiner Leistung bis 100 kW Nennleistung	108
Geiger Engineering HPD10/13.5 (10 bzw. 13,5 kW)	109
AstroFlight 4535 (15 kW)	110

LZ Design FES-M130 (23 kW)	111
Sineton A30K016 (30 kW)	112
Electravia GMPE 102/ GMPE 205 (19 kW /36 kW)	113
Lange EM42 (42 kW)	114
Yuneec Power Drive Motoren (10 kW, 24 kW, 45 kW, 60 kW)	115
e-Flight Initiative e-Motor (54 kW)	116
Sineton e-Genius (60 kW)	117
Rotex REB 90 (80 kW)	118
Siemens Integrated Drive System (80 kW)	119
Flugelektromotoren mittlerer Leistung über 100 kW Nennleistung	121
UQM PowerPhase Motorenserie	121
GKN EVO eDrive Systems	123
Remy HVH 250 /HVH 410	124
Zusammenfassung Flugelektromotoren	125

Teil II: Realisierte Flugzeugentwürfe 127

Solarflugzeuge 129

Sunrise I+II (1974, 1975)	129
Solar Riser (1979)	132
Solar One (1979)	134
Gossamer Penguin und Solar Challenger (1980-81)	136
Solair I+II (1983, 1998)	139
Pathfinder, Pathfinder Plus, Centurion, und Helios (1980-2003)	141
Sunseeker I+II (1990, 2002)	147
icaré 2 (1996)	151
Solar Impulse A+B (2009, 2014)	154
Elektra One Solar (2013)	157

Elektro-Motorsegler 159

Militky MB-E1 (1973)	159
Alisport Silent AE-1 (1998)/Alisport Silent 2 Electro (2011)	161
Lange Antares 20E/23E (2003)	163
Electraflyer C (2008)	166
Schempp-Hirth Arcus-E (2010)	168
Pipistrel Taurus Electro G2 (2007)	169
Pipistrel Taurus Electro G4 (2011)	172
IFB e-Genius (2011)	174
Embry Riddle EcoEagle (2011)	178
Phoenix Air ePhoenix (2011)	179

Yuneec E1000 (2011)	182
Wezel Apis 2 Electro (2011)	183
Yuneec eViva (2012)	184
Elektro-Trikes, 120-kg-Klasse	186
ElectraFlyer Trike (2007)	186
Electravia Electro Trike (2008)	188
ElectraFlyer ULS / Song 120 (2012)	191
Archaeopterix Elektro (2012).....	193
Elektro-Leichtflugzeuge (UL, LSA).....	196
Sonex ESA (2007)	196
Skyspark Pioneer 300 (2009)	199
Yuneec/GreenWing eSpyder (2009)	200
Yuneec/GreenWing e430 (2009)	202
Cri-Cri-E (2010)	205
PC-Aero Elektra One (2011)	208
IABG/Acentiss ELIAS (2012)	209
Long ESA (2012)	210
Evektor Sportstar EPOS (2013)	212
EADS E-Fan (2014)	214
Erstvorstellung auf der Paris Airshow 2013.....	214
Erstflug des EADS E-Fan	216
Pipistrel WATTsUP (2014)	218
AEAC Sunflyer (2015, in Planung)	220
Elektro-Reiseflugzeuge (CS23)	221
Bye Energy/Beyond Aviation Cessna C172 (2010)	222
Pipistrel Panthera Electro (in Planung)	225
Elektro-Hybrid-Flugzeuge	228
Diamond E-Star (2011)	228
Diamond E-Star 2 (2013)	229
Volta Volaré GT4 (in Planung).....	230
Pipistrel Panthera Hybrid (in Planung)	232
Brennstoffzellen-Flugzeuge	233
Boeing Fuel Cell Demonstrator (2008)	233
DLR Antares 20E Fuel Cell (2009)	236
POLITO ENFICA Fuel Cell Zweisitzer (2010).....	239

Elektro-Drehflügler	243
e-volo VC200 (2013)	243
Autogyro e-Cavalon (in Planung)	246
Teil III: Die Konstruktion elektrisch angetriebener Luffahrzeuge	247
Antriebskonzepte beim Elektroflugzeug	249
Aerodynamik und Performance eines Flugzeugs.....	251
Auftriebs- und Widerstandskraft.....	251
Gesamtwiderstand und Widerstandspolare.....	253
Parasitärer Widerstand	254
Induzierter Widerstand.....	254
Widerstandspolare	255
Minimum Power Required	257
Solarzellen-Antrieb (PVEV)	263
Überlegungen zur Konstruktion eines Solarflugzeugs.....	270
Akku-Antrieb (BEV)	273
Mit Akku-Antrieb erzielbare Reichweite	278
Temperaturabhängigkeit	281
Commuter-Flugzeug mit Akku-Antrieb	281
Fazit Akku-Antrieb	283
Brennstoffzellen-Antrieb (FCEV).....	284
Grundlegende Konstruktionsfragen.....	284
Mit FC-System erzielbare Reichweite	287
Viersitziges Reiseflugzeuge mit Brennstoffzellen-Antrieb	288
EU-Projekt ENFICA-FC	289
Commuter-Flugzeug mit Brennstoffzellen-Antrieb.....	291
Fazit Brennstoffzellen-Antrieb.....	294
Hybridantriebssysteme (PHEV, SHEV)	295
Parallel-Hybrid-Antrieb	296
Seriell-Hybrid-Antrieb.....	298
Range Extender	298
Fazit Hybridantriebe	305
Überlegungen zur Propellerauslegung	306
Grundlegendes bei einem Einzelpropeller	307
Optionen bei mehreren Propellern	308
Zusammenfassung Propellerauslegung.....	316
Antriebskonzepte beim Elektro-Transportflugzeug.....	318
Neue Antriebsmittel beim Transportflugzeug	318
Turbinenantrieb mittels Kryotreibstoffen	319

Notwendige Anpassungen beim Transportflugzeug	320
Hybridantrieb beim Transportflugzeug	322
Vollelektrisches Transportflugzeug	323
Konzeptionelle Entwürfe der Hersteller	325
EADS/Airbus VoltAir	325
EADS/Airbus E-Thrust	326
NASA/Boeing SUGAR.....	327
Fazit Elektro-Transportflugzeug	330
Zulassungsfragen.....	331
Zulassung von Motorseglern (CS 22)	332
JAR/CS 22, Abschnitt C - Festigkeit.....	332
JAR/CS 22, Abschnitt E - Triebwerksanlage	333
JAR/CS 22, Abschnitt E - Energieanlage	333
JAR/CS 22, Abschnitt F - Ausrüstung	335
JAR/CS 22, Abschnitt H - Motoren	336
Zulassung von Reise- und kleinen Commuterflugzeugen (CS23)	338
Zulassung von Transportflugzeugen (CS25).....	339
Anhang.....	341
Abkürzungen	342
Literaturverzeichnis	345
Autor dieses Buches	350
Bildnachweis	351

Vorwort

Obwohl das Thema Elektroflug bei den meisten Passagieren, Piloten und Experten der Luftfahrt noch nicht so recht angekommen ist, der Weg zum Elektroflug ist durch die stetige Abnahme fossiler Brennstoffe und letztendlich ihrem in den nächsten Jahrzehnten zu erwartenden Versiegen vorgezeichnet. Unklar ist allerdings mit welcher Technologie die Luftfahrzeuge von morgen fliegen werden. Werden es einfache Elektroflugfahrzeuge mit Akku- und Solartechnologie sein, wird der elektrische Antrieb durch Brennstoffzellensysteme realisiert sein oder wird der Antrieb weiter wie heute durch Kolben- und Turbinenriebwerke erfolgen, die lediglich andere Treibstoffe wie z.B. Biotreibstoffe oder durch Fotovoltaik hergestellten Wasserstoff oder Flüssigpropangas nutzen?

Das vorliegende Buch, gegliedert in drei Teile, gibt einen Überblick über die neue Technologie sowie die vorhandenen Optionen bei der Konstruktion elektrisch angetriebener Luftfahrzeuge und skizziert den Weg zur elektrischen Zukunft der Luftfahrt.

Der erste Teil des Buches beschäftigt sich mit den Grundlagen. Die Diskussion des Themas Elektroflug macht es erforderlich, den Stand der Dinge bei Akkutechnologie, Solarzellen und Fotovoltaik, Brennstoffzellen und ihre Systeme, verschiedene Typen von Elektromotoren, Propellertechnologie sowie Fragen der elektrischen Steuerung all dieser Komponenten genauer zu erklären.

Im zweiten Teil des Buches sind bereits realisierte Konstruktionen von Elektroflugzeugen entstehungsgeschichtlich und ferner nach Typ klassifiziert und werden in ihren wesentlichen Eigenschaften beschrieben. Vielfach handelt es sich dabei um Luftfahrzeuge, die aus Forschungsprojekten entstanden sind, aber auch zugelassene elektrisch angetriebene Luftfahrzeuge wie z.B. Elektro-Motorsegler. Die Anzahl der zugelassenen Elektroflugzeuge nimmt dabei ständig weiter zu.

Der dritte Teil des Buches beschäftigt sich mit Konstruktionsfragen. Es werden verschiedene Optionen der Konstruktion von Elektroflugzeugen diskutiert, darunter das Solarflugzeug, das Akku-angetriebene Elektroflugzeug, das Elektroflugzeug mit Brennstoffzellensystemantrieb, Luftfahrzeuge mit Hybridantrieb sowie Fragen zum Bau elektrisch angetriebener Airliner.

Das vorliegende Buch ist als Einführung in das Thema Elektroflug gedacht und soll dem interessierten Leser eine fundierte Übersicht über den aktuellen Stand der technologischen Entwicklung bei elektrischen Luftfahrzeugen sowie Hinweise für eigene weitere Studien geben. Ich hoffe, mit dem Buch dieses Ziel erreicht zu haben. Die Entwicklung des Elektroflugs schreitet rasant voran. Obwohl meine Übersicht über die realisierten Projekte recht umfassend ist, erhebt sie keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Hinweise zu Ergänzungen oder zu weiteren Projekten werden im Rahmen der zukünftigen Aktualisierung des Buches dankend entgegen genommen.

Der Autor dankt allen, die beim Verfassen des Buches unterstützt haben und die nach Durchlesen des Manuskripts wertvolle fachliche Hinweise gaben.

Klaus L. Schulte

Köln, den 7. Oktober 2014