

Triebwerkskunde

Ein Lernskript für Piloten
nach europäischen Richtlinien

1. Auflage Februar 2009

Version 11022009PP4

Copyright © 2009 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 215 Fotos, Abbildungen und Tabellen

ISBN-10: 3-9811404-8-6

ISBN-13: 978-3-9811404-8-4

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	11
Flugzeugtechnik Teil 2 TRIEBWERKKUNDE	13
Verbrennungskraftmaschinen	15
10 00 00 Flugkolbenmotoren	17
10 01 00 Generelle Eigenschaften	17
10 01 01 Definitionen und Grundprinzipien, Arbeitsverfahren, Kenngrößen	17
Hubkolbenmotor	17
Arbeitsverfahren.....	18
Kenngrößen Hubraum und Verdichtungsverhältnis	21
Kenngröße Drehzahl, maximale Drehzahl.....	22
Drehzahl und Ladedruck	23
Kenngröße Drehmoment, maximales Drehmoment	24
Kenngröße Leistung, maximale Leistung, maximale Dauerleistung	25
Kenngröße Spezifischer Treibstoffverbrauch.....	29
Kenngröße Gesamtwirkungsgrad	30
Kreisprozesse, thermodynamische Wirkungsgrade	30
Unterschiede zwischen Otto- und Dieselmotor.....	33
Unterschied zwischen dem theoretischen und tatsächlichen Arbeitszyklus	33
10 01 02 Baugruppen und Materialien, Bauformen	35
Baugruppen und Materialien	35
Bauformen.....	36
10 02 00 Treibstoff.....	43
10 02 01 Treibstoffsorten und ihre Charakteristiken	43
Motorklopfen und Oktanzahl.....	43
Details zu AvGas-Treibstoffsorten.....	44
Verbrennungsrate beim Ottomotor.....	45
Bedingungen für Motorklopfen	45
Selbstzündung durch Hot Spots.....	45
Treibstoffsorten für Flugdieselmotoren	46
Nageln und Cetanzahl	46
Dichte und weitere Kenngrößen von Avgas und Diesel	47
Dampfblasenbildung	47
Kontaminierung des Treibstoffs	48
10 02 02 Alternative Treibstoffsorten	49
10 03 00 Treibstoffpumpen	50
10 04 00 Vergaser und Einspritzsysteme	51

10 04 01 Vergaser: Bestandteile, Funktionsweise, Funktionsstörungen	51
Das Mischungsverhältnis	52
Vergaservorwärmung	56
10 04 02 Einspritzsysteme: Bestandteile, Funktionsweise, Funktionsstörungen	58
Vorteile des Einspritzsystems	63
Einspritzsysteme bei Dieselmotoren	64
Vor- und Nachteile von Common-Rail-Dieselmotoren:.....	65
10 04 03 Vereisung im Ansaugtrakt	66
Vergaservereisung.....	66
Ansaugrohrvereisung beim Einspritzsystem	67
10 05 00 Motorkühlsysteme	68
10 05 01 Bestandteile, Funktionsweise, Funktionsstörungen	68
10 06 00 Motorschmierung und Ölkreislauf.....	70
10 06 01 Schmieröle: Sorten, Eigenschaften, Grenzwerte.....	70
Schmierölsorten	72
10 06 02 Ölkreislauf: Bestandteile, Funktionsweise, Funktionsstörungen.....	73
10 07 00 Zündsystem	76
10 07 01 Bestandteile und Funktionsweise	76
Methoden der Zündverstärkung für den Anlassvorgang.....	79
Check der Magnete.....	81
Kennwerte der Zündkerzen.....	81
Korrektur Zündzeitpunkt	82
Zündung beim Dieselmotor	82
10 08 00 Gemisch.....	83
10 08 01 Definition, Gemischeinstellungen, Anzeigeeinstrumente, Gemischhebel, Fehlersymptome.....	83
Technik des Leanens	83
10 09 00 Propeller	86
10 09 01 Generelle Funktionsweise und Eigenschaften	86
Kenngrößen von Propellern	86
Strömungsverhältnisse am Profilschnitt	91
Die Rückstoßtheorie (Strahltheorie)	94
Die Tragflächentheorie (Historie)	96
Wirkungsgradkurve und Schub	98
10 09 02 Verstellpropeller, Constant-Speed-Propeller.....	100
Ungeregelter Verstellpropeller.....	101
Constant-Speed (CS) Propeller.....	102
Geschwindigkeitsgeregelter Propeller	103
Varianten der Blattverstellung.....	103
Vorteile des Verstellpropellers	108
Prinzip der Synchronisation und Synchrophasing Systeme	108
10 09 02a Ducted Fan (Mantelschraube).....	110

10 09 03	Untersetzungsgetriebe	112
10 09 04	Propellerhandhabung vor und im Flug	113
10 10 00	Leistung und Triebwerkbedienung	114
10 10 01	Einfluss der Atmosphäre, Aufladung durch Ladersystemen	114
	Aufladung durch Ladersystemen	116
	Triebwerke mit Turbolader	119
	Das Wastegate und seine Steuerung	120
	Ladeluftkühler (Intercooler)	122
	Turbo Lag.....	122
10 10 02	Bedienung von Flugkolbenmotoren.....	123
11 00 00	Flugturbinentriebwerke	127
11 01 00	Grundlagen und Definitionen	128
11 01 01	Funktionsweise, Jetgleichung.....	128
	Turbine versus Ottomotor	128
	Vortrieb durch Rückstoß.....	130
11 01 02	Typklassifizierung, Komponenten und Materialien	132
	Typklassifizierung bei Gasturbinen.....	132
	Komponenten eines Gasturbinentriebwerks.....	134
	Sektionsnummerierung einer Gasturbine	137
	Temperatur- und Druckverlauf.....	138
	Der Kreisprozess der Gasturbine	139
	Effizienz eines Vortriebs, der Vortriebswirkungsgrad	140
	Verwendete Materialien beim Gasturbinenbau	142
11 01 03	Direkt gekoppelte Turbine: Bauweise, Betrieb, Komponenten, Materialien.....	143
11 01 04	Frei laufende Turbine: Bauweise, Betrieb, Komponenten, Materialien	144
11 02 00	Hauptbestandteile von Gasturbinentriebwerken	146
11 02 01	Lufteinlass.....	146
	Mögliche Gefahren im Flugbetrieb	147
	Lufteinlass für den Überschallbereich	148
11 02 02	Verdichter	149
	Radialverdichter	150
	Kennfeld eines Radialverdichters	151
	Bauliche Ausführungen bei Axialverdichtern.....	156
	Kombination von Axial- und Radialverdichter.....	159
	Verdichterpumpen und Verdichterstall	159
	Konstruktive Maßnahmen gegen Verdichterpumpen.....	162
	Die Praxis: Ursachen, Symptome bei Verdichterpumpen und Verdichterstall.....	163
	Kennfeld des Axialverdichters, Einhalten der Pumpgrenze.....	163
	Die Crew: Vermeidung und Gegenmaßnahmen beim Verdichterstall.....	166
	Die für einen Verdichter benötigte Leistung.....	167
	Ein kurzer Vergleich zwischen Radial- und Axialverdichter.....	168
	Diffusor	168

11 02 03 Brennkammer	170
Bauformen der Brennkammer	171
Komponenten der Brennkammer	173
Verbrennungsvorgang	176
Entwicklungskriterien	177
11 02 04 Turbine	178
Bauformen.....	180
Die an der Turbine abgegebene Leistung.....	183
Thermischer Stress und Kühlung	183
Active Clearance Control System	185
11 02 05 Abgasanlage, Schubrohr, Schubdüse	186
Schubrohr/-düse für Turbojets/Turbofans	186
Besonderheit beim Turbofan	188
Grundwissen zur Lärmabstrahlung eines Turbintriebwerks	189
11 02 06 Helikopter: Besonderheiten beim Lufteinlass	191
11 02 07 Abgasanlagen für Turboprop-/Turboshafttriebwerke	194
11 03 00 Weitere Komponenten und Systeme	195
11 03 01 Treibstoffsystem und Fuel Control Unit.....	195
11 03 02 Triebwerkssteuerungssystem (Engine Control System).....	199
11 03 03 Ölkreislauf beim Gasturbintriebwerk	201
Ölsorten	204
11 03 04 Antrieb der Nebenaggregate (Accessory Gear Box).....	205
11 03 05 Zündsystem.....	207
Die Zündbox (Exciter).....	209
Die Zündkerze (Igniter).....	211
11 03 06 Anlasser	211
11 03 07 Umkehrschub	212
Umkehrschubmechanik	214
Umkehrschub - Bedienung und Monitoring	215
11 03 08 Helikopter: Weitere Komponenten und Systeme	218
Ölkreislauf.....	218
Triebwerkstart beim Turboshafttriebwerk.....	219
Accessory Gear Box	220
11 04 00 Triebwerk: Bedienung und Monitoring	222
11 04 01 Generelle Fragen zu Bedienung und Monitoring	222
Engine Thrust/Power Setting	222
Triebwerkanzeigen	224
Triebwerk-Monitoring	225
Ground Idle/Flight Idle	225
Turboprop: Alpha-Range, Beta-Range und Reverse	226
Torquemeter	227
11 04 02 Anlassvorgang und Anlassprobleme	228

Normaler Anlassvorgang	228
Probleme beim Anlassen	231
11 04 03 Wiederanlassen eines Triebwerks im Flug	232
11 05 00 Triebwerkleistung	234
11 05 01 Leistungskenngrößen und ihre Grenzwerte	234
Schubkraft	234
Spezifischer Treibstoffverbrauch bei Turbinen	235
Leistung bei Turbinentriebwerken	236
Einflussgrößen bei Schubkraft bzw. Wellenleistung	239
Abhängigkeiten in der Übersicht	242
Engine Pressure Ratio (EPR)	244
Negativer Einfluss von Zapfluft auf die Schubleistung	244
11 05 01a Schubleistungssteigerung	245
Wasser- und Wasser/Methanol-Einspritzung	246
Nachbrenner	246
11 05 02 Helikopter: Leistung und Drehmoment, Handling	248
11 06 00 Auxiliary Power Unit (APU)	249
11 06 01 Bau- und Funktionsweise, Grenzwerte beim Betrieb	249
11 07 00 Gasturbinentreibstoffe	252
11 07 01 Treibstoffsorten, Eigenschaften, Grenzwerte	252
JP-1 bis JP-10, Jet A bis Jet B	254
Treibstofftests beim Jettreibstoff	256
Wasser im Jet-Treibstoff	258
10 00 00 – 11 06 01 POWERPLANT (Syllabus)	259
Anhang	295
Datentabelle Gasturbinen	297
Lernskriptreihe zur Luftfahrt	305
Übersicht zur gesamten Lernskriptreihe	305
Autor dieses Bandes	307
Bildnachweis	307

Vorwort

Seit Gründung der Joint Aviation Authorities (JAA) zur Einführung und Regelung einheitlicher europäischer Luftfahrtstandards wird ein einheitlicher Themenkatalog als Basis für alle Prüfungen zur Erlangung europäischer Luftfahrtslizenzen verwendet, der Flight Crew Licensing (FCL) Syllabus.

Das vorliegende Buch ist ein Einzelband aus der K.L.S. Publishing Lernskriptreihe zur Pilotenausbildung. Es ist wie alle Bände aus dieser Reihe (eine Übersicht über sämtliche Bände befindet sich im Anhang) nach den Lernzielvorgaben des europäischen Themenkatalogs strukturiert und behandelt kurz und genau sämtliche Sachgebiete zum Prüfungsfach Meteorologie. Es eignet sich zur Vorbereitung auf die theoretische Prüfung beim Lizenzerwerb von PPL, IR, CPL und ATPL und kann daneben als ergänzende Vertiefung zum Computertraining genutzt werden.

Das vorliegende Buch kann als Lehrbuch im Selbststudium und parallel dazu im Theorieunterricht verwendet werden. Es bietet sich an, die einzelnen Kapitel bzw. Themen des Faches ‚Triebwerkskunde‘ jeweils einzeln zu studieren bzw. im Unterricht durchzunehmen und danach mit Selbstübungen oder mit Gruppenübungen im Unterricht zu vervollständigen. Zur Prüfung des Erlernten in Selbstprüfungen bzw. bei gemeinsamen Übungssessions in der Gruppe bietet sich zusätzlich die Verwendung marktgängiger Computerlernprogramme an.

Noch ein Wort zu Prüfungsaufgaben. Die K.L.S. Publishing Lernskriptreihe beinhaltet keine Sammlung von Prüfungsaufgaben zum Lernfach. Die Autoren und der Verlag sind der Meinung, dass zum Üben von Prüfungsaufgaben und für Selbsttests die bekannten Computerlernprogramme wegen der interaktiven Arbeitsweise und der enthaltenen Möglichkeiten bei Statistik und Auswertung das bessere Medium darstellen. Andererseits ist das Buch das bessere Medium, wenn es um die Vermittlung komplexer Zusammenhänge geht, die man sich meistens nur in einer ruhigen Studiumgebung mit Hilfe eines Fachbuches selbst erarbeiten kann.

Daher werden in den Lernskripten dieser Reihe neben der Darstellung von Sachthemen und Theorie ausschließlich einzelne Beispielaufgaben mit nach zu vollziehenden Berechnungen behandelt und ihr jeweiliger Lösungsweg aufgezeigt. Beide Lern- bzw. Arbeitsmethoden – das Buch, um den Stoff zu erlernen, und der Computer, um das Gelernte zu üben – lassen sich so gut miteinander kombinieren.

Die Struktur des FCL Syllabus ist – wie fast jede Struktur, die nach nicht voneinander unabhängigen Kriterien sortiert ist – nicht frei von Wiederholungen. Dort, wo die Struktur Wiederholungen vorgibt, wird dies auch im vorliegenden Lernskript in der gleichen Form umgesetzt, um so nahe wie möglich an den von JAA/EASA vorgegebenen Lernzielen zu bleiben. Um allerdings nicht Texte bzw. Darstellungen unnötig zu wiederholen, wird in solchen Fällen auf die zentrale Darstellung des jeweiligen Themas zurückverwiesen.

Noch ein Wort zur Korrektheit der Darstellung. Das Buch wurde durch eine Reihe von Experten auf Fehler hin überprüft. Wer trotzdem Fehler oder Ungenauigkeiten erkennt, möge bitte den Verlag anschreiben. Aufgrund des Digitaldruckverfahrens besteht die Möglichkeit, Fehler relativ zügig so zu korrigieren, dass bereits nach kurzer Zeit weitere gelieferte Exemplare fehlerbereinigt sind. Die im Buch verzeichneten Hyperlinks können sich im Laufe der Zeit ändern, ohne dass wir hier stets eine Korrektur vornehmen werden.

Am Ende des Buches ist der englische Original-Syllabus für das Prüfungsfach Flugzeugtechnik (behandelte Abschnitte) ergänzt. Die dort als Fragen formulierten Lernziele können in einem Unterrichtskonzept ergänzend zur Ausbildung direkt als mündliche Übungsfragen verwendet werden.

Der Verlag dankt allen, die beim Verfassen des Buches durch Überlassen von Fotos unterstützt haben oder die nach Durchlesen des Manuskripts wertvolle fachliche Hinweise oder Kommentare gaben. Besonderer Dank geht an Chris Brady für die freundliche Genehmigung zur Nutzung einiger seiner B737-Fotos (www.b737.org.uk).

K.L.S. Publishing Verlag, Köln, im Februar 2009

Flugzeugtechnik Teil 2

TRIEBWERKKUNDE

