

Grundlagen des Fluges

081 Principles of Flight

Ein Lehrbuch für Piloten
nach europäischen Richtlinien

1. Auflage Januar 2012

Draft Version 1.22.12.2011

Copyright © 2011 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 247 Abbildungen (Grafiken und Fotos) und 8 Tabellen

ISBN-13: 978-3-942095-22-8 (Schwarz-Weiß-Druck)

ISBN-13: 978-3-942095-23-5 (Farbdruck)

ISBN-13: 978-3-942095-62-4 (e-Book)

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 DES VERLAGS.....	13
GRUNDLAGEN DES FLUGES	15
01 00 00 Aerodynamik im Unterschallbereich.....	17
01 01 00 Grundlagen.....	17
01 01 01 Physikalische Grundgrößen und Gesetze.....	17
Masse, Kraft, Newtonsche Gesetze	17
Temperatur, Luftdichte, Druck, Bernoullisches Gesetz	20
Fluggeschwindigkeit (IAS, CAS, TAS, Mach number).....	25
Arbeit, Leistung, Flächenbelastung.....	31
01 01 02 Strömungen und Strömungsfelder	32
01 01 03 Aerodynamische Kräfte und Momente bei Tragflügelprofilen	34
01 01 04 Parameter der Tragflügelprofile	37
01 01 05 Parameter der Tragflügel und Tragflügelformen	41
01 02 00 Zweidimensionale Strömung um einen Tragflügel	46
01 02 01 Zweidimensionales Strömungsmuster.....	47
01 02 02 Staupunkt.....	48
01 02 03 Druckverteilung.....	49
01 02 04 Druckpunkt und aerodynamisches Zentrum.....	51
01 02 05 Auftrieb und induzierter Abwind (Downwash)	52
01 02 06 Widerstand und Wirbelschlepe (Wake).....	52
01 02 07 Einfluss des Anstellwinkels	53
01 02 08 Strömungsabriss bei hohem Anstellwinkel.....	54
01 02 09 Die Auftriebskurve.....	55
01 03 00 Koeffizienten	56
01 03 01 Auftrieb und Auftriebskoeffizient C_L	56
01 03 02 Widerstand und Widerstandskoeffizient C_D	59
Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand.....	61
Polardiagramm.....	62
01 04 00 Dreidimensionale Strömung um Tragflügel und Flugzeug	64
01 04 01 Dreidimensionales Strömungsmuster.....	64
Strömung am Tragflügel	64
Downwash	67
01 04 02 Induzierter Widerstand	68
Strömung am Flugzeug, Wirbelschleppen	72

01 05 00	Aerodynamischer Widerstand	77
	Komponenten des aerodynamischen Widerstands	77
01 05 01	Parasitärer Widerstand.....	77
01 05 02	Parasitärer Widerstand und Auftriebsbeiwert	77
01 05 03	Induzierter Widerstand und Auftriebsbeiwert.....	78
01 05 04	Intentionally left blank.....	78
01 05 05	Gesamtwiderstand und Auftriebsbeiwert.....	78
	Gesamtwiderstand und Geschwindigkeit	79
01 05 06	Intentionally left blank.....	79
01 05 07	Parabolische Widerstandspolare.....	80
	Abhängigkeit von Masse/Gewicht.....	81
	Abhängigkeit von der Luftdichte	81
	Stabilitätsbereiche der Geschwindigkeit.....	82
01 06 00	Bodeneffekt	85
01 06 01	Reduktion des induzierten Widerstandes	86
01 06 02	Reduktion des Anstellwinkels	86
01 06 03	Erhöhung des Auftriebs	87
01 06 04	Auswirkungen des Bodeneffekts bei Start und Landung	87
01 07 00	Auftriebsbeiwert und Geschwindigkeit im Horizontalflug	89
01 07 01	C_L - V -Gleichung.....	89
01 07 02	C_L - V -Kurve	89
01 08 00	Der Strömungsabriss („Stall“).....	90
01 08 01	Übergang zur Turbulenz bei hohem Anstellwinkel	90
	Laminare und turbulente Grenzschicht.....	90
	Turbulenz bei hohem Anstellwinkel.....	93
01 08 02	Stallgeschwindigkeit	99
	Stall – Speeds (CS-25.103)	101
	Stall im beschleunigten Flugzustand	102
	Das V - n Diagramm	106
01 08 03	Ausbreitung des Turbulenzbereichs auf dem Tragflügel	110
	Konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Stalleigenschaften	113
01 08 04	Stallwarnung	117
01 08 05	Besondere Phänomene beim Stall	120
	Veränderte Stalleigenschaften durch Kontamination des Tragflügels	125
01 09 00	Auftriebshilfen, Vortex Generatoren.....	133
01 09 01	Auftriebshilfen an der Tragflügelhinterkante (Trailing edge flaps).....	133
01 09 02	Auftriebshilfen an der Tragflügelvorderkante (Leading edge devices).....	141
01 09 03	Vortex-Generatoren (Low-Speed)	146
01 10 00	Spoiler und Speedbrakes.....	147

01 10 01 Einsatz von Spoilern in verschiedenen Flugphasen	147
01 10 02 Die Wirkung von Speedbrakes.....	149
01 11 00 Die Grenzschicht (boundary layer).....	150
01 11 01 Verschiedene Typen der Grenzschicht	150
01 11 02 Vor- und Nachteile bei Form- und Reibungswiderstand.....	150
01 12 00 Aerodynamische Verschlechterung.....	151
01 12 01 Eis und sonstige Kontamination.....	151
01 12 02 Deformation und Modifikation, Flugzeugalterung	151
02 00 00 Aerodynamik im High-Speed-Bereich.....	153
02 01 00 Geschwindigkeiten im High-Speed-Bereich.....	153
02 01 01 Schallgeschwindigkeit.....	153
02 01 02 Machzahl.....	153
02 01 03 Einfluss von Temperatur und Altitude auf die Machzahl	154
02 01 04 Kompressibilität der Luft	154
02 01 05 Unterbereiche der Strömungsaerodynamik	157
02 02 00 Stoßwellen	158
02 02 01 Senkrechter Verdichtungsstoß	160
02 02 02 Schräger Verdichtungsstoß (Oblique shock waves).....	163
02 02 03 Machkegel	165
02 03 00 Effekte bei Überschreiten der kritischen Machzahl	168
02 03 01 Kritische Machzahl	168
02 03 02 Auftrieb bei hoher Machzahl.....	169
02 03 03 Widerstand bei hoher Machzahl	171
02 03 04 Nickmoment bei hoher Machzahl.....	173
02 03 05 Steuerbarkeit bei hoher Machzahl.....	174
02 04 00 Buffet-Grenze	174
02 05 00 Maßnahmen zur Vergrößerung des superkritischen Bereichs.....	178
02 05 01 Pfeilung des Tragflügels	178
02 05 02 Dünne und superkritische Profile	180
02 05 03 Vortex-Generatoren (High-Speed)	183
02 05 04 Flächenregel.....	184
03 00 00 Lockheed SR-71 (Exkurs).....	185
New York –London in 1:55, London–Los Angeles in 3:48	186
Die Entwicklung der SR-71	188
Herausforderungen	188
Pratt&Whitney J58.....	189
Arbeitsplätze der Crew	192
Handbuch.....	192

Einsatz der SR-71	192
Weltrekorde der SR-71	193
Verwandte Typen	193
04 00 00 Flugstabilität	195
04 01 00 Statische und dynamische Stabilität	195
04 01 01 Grundlagen und Definitionen.....	195
04 01 02 Voraussetzung für statische Stabilität	198
04 01 03 Summe der Kräfte.....	198
04 01 04 Summe der Momente.....	199
04 02 00 Intentionally left blank	199
04 03 00 Statische und dynamische Längsstabilität	199
04 03 01 Methoden zur Erreichung des Gleichgewichts	200
04 03 02 Variation des Gleichgewichts	203
Kriterium für statische Längsstabilität	203
04 03 03 Neutralpunkt des Flugzeugs	206
04 03 04 Neutralpunkt: beeinflussende Faktoren.....	206
04 03 05 Schwerpunktlage für Stabilität	207
04 03 06 Die CM - α Kurve	210
04 03 07 Faktoren, welche die CM - α Kurve beeinflussen	210
04 03 08 Höhenruderausschlag versus Geschwindigkeit bzw. Auftrieb	211
04 03 09 Höhenruder: Positionsstabilität.....	213
04 03 10 Höhenrudersteuerkraft: Konstruktionsvorschriften	214
04 03 11 Höhenrudersteuerkraft: beeinflussende Faktoren.....	215
04 03 12 Manöverstabilität und Steuerkraft beim Lastvielfachen.....	216
04 03 13 Intentionally left blank.....	217
04 03 14 Faktoren der Manöverstabilität	217
04 03 15 Konstruktionsvorschriften	219
04 03 16 Dynamische Längsstabilität	220
04 04 00 Statische Richtungsstabilität	223
04 04 01 Schiebewinkel.....	224
04 04 02 Koeffizient des Giermoments.....	224
04 04 03 Giermoment-Schiebewinkel-Kurve	224
04 04 04 Die Richtungsstabilität beeinflussende Faktoren	225
04 05 00 Statische Rollstabilität.....	227
04 05 01 Neigungswinkel.....	228
04 05 02 Koeffizient des Rollmoments	228
04 05 03 Kopplung von Roll- und Schiebemoment	228
04 05 04 Rollmoment-Schiebewinkel-Kurve.....	229

04 05 05 Die Rollstabilität beeinflussende Faktoren	229
04 05 06 Intentionally left blank.....	230
04 06 00 Dynamische Richtungs- und Rollstabilität	231
04 06 01 Effekte asymmetrischer Propellerluftströmung (s. 07 04 03)	231
04 06 02 Spiralsturz	231
04 06 03 Dutch Roll	233
04 06 04 Einfluss der Altitude auf die dynamische Stabilität	235
05 00 00 Flugsteuerung	237
05 01 00 Grundlegende Definitionen	237
05 01 01 Bezugssysteme und Achsen.....	237
05 01 02 Steuerruder: Änderung der Wölbung.....	242
05 01 03 Steuerruder: Änderung des Anstellwinkels.....	242
05 02 00 Höhenrudersteuerung (Pitch control)	242
05 02 01 Höhenruder/ Stabilator.....	242
05 02 02 Effekte am Leitwerk durch den Downwash	244
05 02 03 Vereisung des Höhenleitwerks	245
05 02 04 Schwerpunktlage	245
05 02 05 Momente durch Triebwerkschub.....	245
05 03 00 Seitenrudersteuerung (Yaw control)	245
05 03 01 Ausschlagbegrenzung beim Seitenruder	246
05 04 00 Querrudersteuerung (Roll control).....	246
05 04 01 Querruder	246
05 04 02 Intentionally left blank.....	247
05 04 03 Spoiler.....	247
05 04 04 Negatives Wendemoment	247
05 04 05 Maßnahmen zur Kompensation des negativen Wendemoments.....	248
05 05 00 Interaktion von Rollen und Gieren.....	248
05 06 00 Maßnahmen zur Reduzierung der Steuerkräfte.....	249
05 06 01 Aerodynamischer Ruderausgleich	250
05 06 02 Hydraulische Ruderkraftverstärkung	254
05 07 00 Rudermassenausgleich.....	256
05 08 00 Trimmung.....	256
05 08 01 Notwendigkeit einer Trimmung	256
05 08 02 Trim Tabs.....	257
05 08 03 Stabilizer Trim.....	258
Besondere Trimmsituationen	260
06 00 00 Grenzwerte	263

06 01 00	Betriebsgrenzwerte eines Flugzeuges.....	263
06 01 01	Aeroelastizität, Ruderflattern.....	263
06 01 02	Aeroelastische Ruderumkehr.....	266
06 01 03	Grenzwerte beim Betrieb von Klappen und Fahrwerk.....	267
06 01 04	Geschwindigkeitsgrenzwerte VMO, VNO, VNE.....	268
06 01 05	Geschwindigkeitsgrenzwert MMO.....	269
06 02 00	Manöverlast–Grenzbereich.....	270
06 02 01	Manöverlast–Diagramm (V–n–Diagramm).....	270
06 02 02	Einflussfaktoren beim Manöverlast–Diagramm.....	273
06 03 00	Böenlast–Grenzbereich.....	275
06 03 01	Böenlast–Diagramm.....	277
06 03 02	Einflussfaktoren beim Böenlast–Diagramm.....	280
07 00 00	Propeller.....	281
07 01 00	Umwandlung von Drehmoment in Schubkraft.....	281
07 01 01	Relevante Propellergrößen.....	282
	Die Propellersteigung.....	282
	Profilwölbung und Profildicke.....	284
	Strömungsverhältnisse am Profilschnitt.....	285
	Die Rückstoßtheorie (Strahltheorie)**.....	288
	Die Tragflächentheorie (Historie)**.....	290
07 01 02	Blattverwindung des Propellers.....	292
07 01 04	Propellerwirkungsgradkurve, Geschwindigkeit und Schub.....	292
07 01 03	Festpropeller, Verstellpropeller, Constant–Speed–Propeller.....	295
	Ungeregelter Verstellpropeller.....	296
	Constant–Speed (CS) Propeller.....	297
	Geschwindigkeitsgeregelter Propeller**.....	298
	Vorteile beim Verstellpropeller/Constant–Speed–Propeller.....	298
07 01 05	Propellervereisung.....	300
07 02 00	Ausfall eines Triebwerks.....	302
07 02 01	Aerodynamischer Widerstand bei Windmilling.....	302
07 02 02	Feathering.....	303
	Hydraulische Blattverstellung**.....	303
	Einfach–hydraulische Blattverstellung**.....	303
	Blattverstellung mit Feathering.....	304
	Feathering, Un–Feathering, Auto–Feathering.....	304
	Low–Pitch–Stopvorrichtung**.....	307
	Flugleistung und Steuerbarkeit eines “gefeatherten” Flugzeugs.....	307
07 03 00	Entwicklungsparameter.....	308

07 03 01 Streckungsverhältnis der Propellerblätter.....	309
07 03 02 Propellerdurchmesser.....	309
07 03 03 Blattanzahl eines Propellers.....	310
Die Blattrücklage (Skew)**.....	312
07 03 04 Propellerlärm.....	313
07 04 00 Sekundäreffekte des Propellers.....	313
07 04 01 Torque-Effekt.....	313
07 04 02 Gyroskopische Präzession.....	314
07 04 03 Asymmetrischer Slipstream-Effekt.....	315
07 04 04 Asymmetrischer Schubeffekt der Propellerblätter.....	315
08 00 00 Flugmechanik.....	319
08 01 00 Einwirkende Kräfte am Flugzeug.....	319
08 01 01 Unbeschleunigter Horizontalflug.....	319
08 01 02 Unbeschleunigter Steigflug.....	320
Steiggradient, Steigwinkel, Windeinfluss.....	322
08 01 03 Unbeschleunigter Sinkflug.....	325
Sinkgradient, Sinkwinkel, Windeinfluss.....	326
08 01 04 Gleitflug.....	326
08 01 05 Koordinierter Kurvenflug.....	330
08 02 00 Asymmetrischer Schub.....	332
08 02 01 Momente um die Hochachse.....	334
08 02 02 Intentionally left blank.....	336
08 02 03 Kräfte in Richtung der Querachse.....	336
08 02 04 Einfluss der Flugzeugmasse.....	340
08 02 05 Intentionally left blank.....	341
08 02 06 Sekundäreffekte des Propellers.....	341
08 02 07 Minimum control speeds.....	341
08 02 08 V_{MC} , V_{MCA}	342
08 02 09 V_{MCL}	343
08 02 10 V_{MCG}	344
08 02 10a Einfluss der Schwerpunktlage.....	344
08 02 11 Einfluss von Altitude und Temperatur.....	344
08 03 00 Besondere Punkte auf der Polarkurve.....	346
Musterprüfungsfragen.....	347
PRINCIPLES OF FLIGHT (AEROPLANE) (SYLLABUS).....	359

ANHANG	411
Auszug CS23 Controllability, Stability	413
Auszug CS25 Controllability, Stability	424
Informative Internet-Links	435
Literaturverzeichnis	436
Autor dieses Buches.....	438
Bildnachweis	439
Übersicht zur Lehrbuchreihe nach JAR-FCL	440