

Lehrbuch Flugdurchführung
032 Flugleistung von Flugzeugen

K.L.S. Publishing

Ein Lehrbuch
für Piloten
nach
europäischen
Richtlinien

Flugdurchführung

Flugleistung von Flugzeugen



ebook

Flugdurchführung

Teil 2:

Flugleistung

von

Flugzeugen

Ein Lehrbuch für Piloten
nach europäischen Richtlinien

2. Ausgabe Februar 2017

Final Version 5_15.02.17_K5F

Copyright © 2011–2017 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 117 Abbildungen (Grafiken, Fotos) und 12 Tabellen

ISBN-13: 978-3-942095-10-5 (Schwarz-Weiß-Druck)

ISBN-13: 978-3-942095-11-2 (Farbdruck)

ISBN-13: 978-3-942095-56-3 (e-Book)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort des Verlags	11
030 Flugdurchführung Teil 2:	13
Einleitung	15
Gliederung des Themas 030	15
Gliederung des Bandes 032.....	16
Dokumente mit Prüfungsvorgaben.....	16
Weiterführende Literatur	16
032 00 00 00 FLUGLEISTUNG	17
032 01 00 00 Generelles zur Flugleistung von Flugzeugen	19
032 01 01 00 Gesetzliche Regelungen	19
032 01 01 01 Anforderungen zur Zulassung gemäß CS-23 / CS-25	20
032 01 01 02 Vorschriften für Betriebsverfahren	23
032 01 02 00 Allgemeine Theorie der Flugleistung.....	25
032 01 02 01 Flugphasen.....	25
032 01 02 02 Definitionen und theoretische Konzepte	26
Auftriebskraft.....	27
Widerstandskraft.....	28
Auftrieb, Widerstand und Polardiagramm	28
Die Maxima bei $C_L^{1/2}/C_D$ und $C_L^{3/2}/C_D$	33
Modelle P und T, parabolische Widerstandspolare, Steady Flight.....	34
Abrissgeschwindigkeit	35
Schubkraft und Geschwindigkeit, maximale Geschwindigkeit	36
Leistung und Geschwindigkeit.....	39
Der Einfluss der Altitude	42
Steigflug	43
Steiggradient, Steigwinkel	45
Maximale Steigrate, größter Steigwinkel	48
V_x und V_y als Funktion der Altitude.....	52
Minimale Steigzeit.....	53
Absolute Gipfelhöhe, Dienstgipfelhöhe	54
Sinkflug, Sinkgradient, Sinkwinkel, Windeinfluss	55
Gleitflug, maximale Reichweite, geringste Sinkrate.....	56
Maximale Reichweite.....	59
Maximale Flugdauer.....	65

Spezifische Reichweite	66
Geschwindigkeiten im Überblick.....	69
Macheffekte	73
032 01 02 03 Die Flugleistung bestimmende Parameter	75
Sicht des Piloten.....	75
Sicht des Konstrukteurs	76
Performance in der Start- und Landephase	77
Startphase	77
Beim Startlauf wirkende Kräfte	79
Die Startstrecke bestimmende Parameter	81
Die Schubkraft während des Startlaufs	82
Einfluss der Bahnneigung	84
Startstrecke bei besonderen Bodenverhältnissen	85
Einfluss des Windes.....	86
Einfluss der Auftriebshilfen	87
Einfluss des Brake Release Zeitpunktes.....	88
Fehlerhaftes Rotieren	89
Landephase	89
Berechnung der Landerollstrecke	90
Beschleunigter Flug.....	91
Hinweise zu den nächsten Kapiteln	93
032 02 00 00 Flugleistung von einmotorigen Flugzeugen (CS-23, CLASS B).....	95
032 02 01 00 Verwendete Geschwindigkeitsbegriffe.....	95
Vorschriften in Part-CAT	96
032 02 02 00 Einflussgrößen der Flugleistung bei einmotorigen Flugzeugen.....	96
032 02 03 00 Start und Landung	96
Vorschriften für den Start (CAT.POL.A.305).....	96
Vorschriften für die Landung (CAT.POL.A.330 - trockene Landebahn).....	98
032 02 04 00 Steigflug, Reiseflug, Sinkflug	99
032 02 05 00 Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (SEP1).....	100
032 02 05 01 Start	100
032 02 05 02 Steigflug.....	104
032 02 05 03 Reiseflug	107
032 02 05 04 Landung	109
032 03 00 00 Flugleistung von mehrmotorigen Flugzeugen (CS-23, CLASS B)	111
032 03 01 00 Begriffsdefinitionen, Geschwindigkeiten	111
032 03 02 00 Einflussgrößen der Flugleistung bei mehrmotorigen Flugzeugen .	113

032 03 02 01 Start und Landung	114
032 03 02 02 Steigflug, Reiseflug, Sinkflug	114
032 03 02 03 Landung	115
032 03 03 00 Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (MEP1).....	116
032 03 03 01 Start	116
Take-off Climb	123
Hindernisvermeidung (CAT.POL.A.310)	124
032 03 03 02 Steigflug.....	126
032 03 03 03 Reise- und Sinkflug	128
032 03 02 03 Landung	130
Missed Approach Climb (CS-23.67).....	130
Balked Landing Climb (CS-23.77).....	130
Landestrecke.....	132
032 04 00 00 Flugleistung von Transportflugzeugen (CS-25, Class A).....	135
032 04 01 01 Definitionen der verwendeten Begriffe	135
Definition ACN/PCN	135
Definition Stopway	135
Definition Clearway	136
Rollbahn, offiziell festgelegte Kenngrößen	136
Stall – Speeds (CS-25.103).....	139
Take-off Speeds (CS-25.107).....	140
Landing Speeds (CS-25.125)	143
Minimum control speeds (CS-25.149)	143
032 04 01 00 Start (Take – off)	144
032 04 01 02 Startstrecke	145
Startstrecke, Startlaufstrecke (CS-25.113).....	145
032 04 01 03 Benötigte Startstoppstrecke (ASDR) (CS-25.109).....	147
032 04 01 04 Balanced Field Length Konzept	149
Balanced Field Length ohne/mit Stopway, Clearway.....	152
032 04 01 05 Unbalanced Field Length Konzept.....	153
Unbalanced Field Length ohne/mit Stopway, Clearway	155
032 04 01 06 Runway (Field) Length Limited Take-off Mass	156
Referenzflugzeug des Syllabus (MRJT).....	158
032 04 01 07 Take-off Steigphase	159
032 04 01 08 Obstacle-limited Take-off Mass	163
032 04 01 09 Performance Limited Take-off mass	166
032 04 01 10 Take-off Performance bei kontaminierter Rollbahn.....	166
032 04 01 11 Start mit reduzierter Schubkraft/Leistung.....	168
032 04 01 12 PLTOM bei unterschiedlicher Klappenstellung.....	173

032 04 01 13	Startverfahren mit erhöhtem V_2 (Improved Climb Performance).....	174
032 04 01 14	Bremsenergie und maximale Reifengeschwindigkeit	174
	Maximale Bremsenergie	174
	Maximale Reifengeschwindigkeit.....	176
032 04 01 15	Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (Take-off)	178
	Bestimmung von RTOM	178
	Bestimmung der V-Speeds	178
	Berücksichtigung von Stopway und Clearway.....	181
032 04 02 00	Steigflug (Climb)	182
032 04 02 01	Steigflugtechnik	182
032 04 02 02	Einfluss verschiedener Parameter auf die Steigleistung	184
032 04 02 03	Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (Climb).....	187
032 04 03 00	Reiseflugphase (Cruise).....	187
032 04 03 01	Reiseflugtechniken	187
032 04 03 02	Maximale Flugdauer	188
032 04 03 03	Maximale Reichweite	190
032 04 03 04	Long Range Cruise	191
032 04 03 05	Einflussparameter bei der Reiseflugleistung.....	192
032 04 03 06	Optimale Reiseflughöhe.....	193
	Buffet-Grenze (Buffet Onset Boundary).....	196
032 04 03 07	Kostenindex	199
032 04 03 08	Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (Cruise).....	201
032 04 04 00	Ausfall eines Triebwerks im Streckenteil	203
032 04 04 01	Drift Down Verfahren.....	204
	Maximale OEI-Entfernung en-route und ETOPS	205
032 04 04 02	Einflussgrößen der Flugleistung beim Triebwerkausfall.....	206
032 04 04 03	Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (OEI).....	207
032 04 05 00	Sinkflug (Descent).....	209
032 04 05 01	Sinkflugtechnik.....	209
032 04 05 02	Einflussgrößen der Flugleistung im Sinkflug	211
032 04 05 03	Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (Descent).....	213
032 04 06 00	Anflug und Landung (Approach and Landing)	213
032 04 06 01	Anforderung beim Go-around	213
032 04 06 02	Anforderung an die Landestrecke	215
032 04 06 03	Einflussgrößen der Flugleistung bei der Landung.....	217
032 04 06 04	Grenze beim quick Turnaround	218
032 04 06 05	Leistungsdaten im Flugzeughandbuch (Landing).....	219
Musterprüfungsfragen.....		225

Performance (Aeroplanes) (Syllabus)	239
Verteilung der Prüfungsfragen gemäß PART-ARA.....	259
Anhang	261
Abkürzungen	263
V-Speeds Übersicht	267
Stall-Speeds	267
Startphase	267
Steigflugphase.....	268
Reise- und Sinkflugphase	268
Landephase	269
Engine Failure.....	269
Zulassungsvorschriften CS-23 Subpart B Flight	270
Zulassungsvorschriften CS-25 Subpart B Flight	291
Vorschriften zur Performance in Part-CAT	312
Internetlinks	330
Literaturverzeichnis	331
Autor dieses Buches.....	333
Bildnachweis	334
Übersicht der ATPL-Lehrbuchreihe nach FCL.....	337

Vorwort des Verlags

Seit Gründung der Joint Aviation Authorities (JAA) zur Einführung und Regelung einheitlicher europäischer Luftfahrtstandards und später der EASA 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 Lehrbuchreihe zur Pilotenausbildung, mit dem Schwerpunkt auf Berufs- und Verkehrspilotenausbildung. 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. Es eignet sich zur Vorbereitung auf die theoretische Prüfung beim Lizenzerwerb von ATPL, CPL und IR 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 vorliegenden Faches 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 Lehrbuchreihe 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 ent-

haltenen 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 Studiensituation mit Hilfe eines Fachbuches selbst erarbeiten kann.

Daher werden in den Lehrbüchern 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.

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 ergänzt. Die dort als Fragen formulierten Lernziele können in einem Unterrichtskonzept ergänzend zur Ausbildung direkt als mündliche Übungsfragen verwendet werden.

Leider ist der uns vorliegende Syllabus 032 nicht konsequent strukturiert. Eine andere Strukturierung ohne Wiederholungen und bessere Zuordnungen der Lernziele zu den Unterthemen wäre wünschenswert gewesen. Da wir als Verlag wie immer in dieser Lehrbuchreihe der Struktur des Syllabus gefolgt sind, enthält das Buch leider ebenfalls besagte Strukturängel. Wir bitten dies zu entschuldigen.

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

K.L.S. Publishing Verlag,

Köln, im Januar 2011,
überarbeitet im Januar 2017

030 Flugdurchführung

Teil 2:

032 Flugleistung von Flugzeugen



Lernziele für das Fach Flugdurchführung–Flugleistung (032)

Für den Betrieb von Luftfahrzeugen ist ein bestimmtes Maß an Kenntnissen zur Flugplanung und Flugdurchführung erforderlich. Der Pilot hat nachzuweisen, dass er diese Kenntnisse besitzt.

Lernziele:

Kenntnisse. Nach Beendigung seines/ihres Trainings muss der/die Pilot(in) in der Lage sein, für das verantwortliche Führen eines Luftfahrzeuges

1. die theoretischen Grundlagen der Flugleistung eines Flugzeuges und ihre Bedeutung für den sicheren Flug zu kennen,
2. die Leistungsparameter eines Flugzeuges, ihre Grenzwerte und ihre Auswirkungen auf die Flugphasen zu kennen,
3. die Methodik der Flugplanung und die Verfahren der Überwachung während eines Fluges (Monitoring) zu kennen.

Fähigkeiten. Nach Beendigung seines/ihres Trainings muss der/die Pilot(in) in der Lage sein,

1. Flugleistung eines Flugzeuges anhand vorgegebener Daten zu berechnen und hinsichtlich der zulässigen Grenzwerte zu beurteilen,
2. die Leistungsparameter eines Luftfahrzeuges im Umfeld der Flugplanung anzuwenden und hinsichtlich aller Grenzwerte zu bestimmen,
3. VFR- und IFR-Flüge eigenständig zu planen und durchzuführen inklusive der kontinuierlichen Überwachung in allen Phasen eines Fluges.

Gültigkeitsbereich. Die Lernziele von Abschnitt 032 sind anzuwenden für (Flugzeuge(A)):

1. Verkehrspilotenlizenzen (ATPL)
2. Berufspilotenlizenzen (CPL, CPL/IR)

Theoretischer Unterricht und Prüfungen

Der *theoretische Unterricht* umfasst das Training, den theoretischen Syllabus und die Lernziele. Mit den abschließenden theoretischen Prüfungen wird ermittelt, ob der Pilot das erforderliche Wissen und die Fähigkeiten im Hinblick auf die Lernziele des Syllabus durch Unterricht und Training erzielt hat.

Gliederung des Themas 030

Die Lernziele zum Themenkomplex Beladung, Performance, Flugplanung und Flugmonitoring, also alles, was mit Planung und konkreter Durchführung eines Fluges zu tun hat, ist mit seinen Lernzielen in den JAA/EASA Syllabus 031, 032, 033 und 034 festgelegt. Wir haben daher dem Hauptthema, also der Syllabus Id-Nr. 30, den Begriff Flugdurchführung zugeordnet. Genauer bestehen die Unterthemen von ‚Flugdurchführung‘ aus folgenden Bereichen:

- ▶ **Masse und Schwerpunktlage (Mass and Balance)**
Theoretische Grundlagen und Berechnung
Syllabus-Abschnitt 031
- ▶ **Flugleistung von Flugzeugen (Performance of Aeroplanes)**
Flugleistung und ihre Grenzwerte in allen Flugphasen, theoretische Grundlagen und praktische Anwendung
Syllabus-Abschnitt 032
- ▶ **Flugplanung und Monitoring (Flight Planning):**
Methodik der Flugplanung und Flugverfolgung (Monitoring)
Syllabus-Abschnitt 033
- ▶ **Flugleistung von Hubschraubern (Performance of Helicopters)**
Flugleistung und ihre Grenzwerte in allen Flugphasen, theoretische Grundlagen und praktische Anwendung
Syllabus-Abschnitt 034

Im Rahmen unserer Lehrbuchreihe sind die Unterthemen jeweils als eigenständige Lehrbücher angelegt. Der vorliegende Band 032 behandelt das Thema Flugleistung von Flugzeugen.

Gliederung des Bandes 032

Der vorliegende Band 032 ist in vier Kapitel gegliedert. Das erste Kapitel beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Allgemeinen Theorie der Flugleistung ergänzt mit einer Übersicht über die gesetzlichen Vorschriften bei Zulassung (CS-23, CS-25) und Betrieb von Flugzeugen (CAT.POL.A). Die folgenden drei Kapitel haben den praktischen Aspekt der Performancetheorie zum Inhalt, jeweils für einmotorige Flugzeuge (Kapitel 02), kleine zweimotorige Flugzeuge (Kapitel 03) und große Transportflugzeuge (Kapitel 04). Der Abschnitt 'Hinweise zu den nächsten Kapiteln' auf Seite 93 enthält weitere Details.

Dokumente mit Prüfungsvorgaben

CAP-Dokumente. Bei der Behandlung der einzelnen Themen wird intensiv Bezug genommen auf Daten von FCL-Musterflugzeugen, die in den Dokumenten

- ▶ CAP 696 (Mass and Balance),
- ▶ CAP 697 (Flight Planning) und
- ▶ CAP 698 (Performance)

enthalten sind. Die genannten Dokumente werden von der englischen Luftfahrtbehörde CAA (Civil Aviation Authority) herausgegeben und sind im Internet kostenlos verfügbar. Obwohl die hieraus genutzten Daten im vorliegenden Band dort dargestellt sind, wo sie genutzt werden, wird empfohlen, sich die vollständigen Dokumente herunterzuladen. Detailinformationen sind im Literaturverzeichnis zu finden.

Weiterführende Literatur

In diesem Buch sind wir beim Thema ‚Allgemeine Theorie der Flugleistung‘ in weiten Teilen der Darstellung im Buch ‚Aircraft Performance and Design‘ von Prof. John D. Anderson (vgl. [1]) gefolgt, das der Autor darüber hinaus dem Leser für weitere Studien empfehlen möchte.

Ebenfalls empfehlenswert ist die Darstellung des Airbus Support Teams zum Thema aus der Sicht eines Herstellers: ‚Getting to grips with aircraft performance‘ (vgl.[16]).

032 00 00 00
FLUGLEISTUNG





„Die Macht des Verstandes, o, wend sie nur an,
Es darf dich nicht hindern ein ewiger Bann,
Sie wird auch im Fluge Dich tragen!
Es kann deines Schöpfers Wille nicht sein,
Dich, Ersten der Schöpfung, dem Staube zu weih'n,
Dir ewig den Flug zu versagen!“

Aus einem Gedicht von Otto Lilienthal,
enthalten in seinem Buch
„Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“, 1889.

Das Foto auf der vorherigen Seite zeigt den strategischen Höhenaufklärer SR-71 Blackbird der USAF. Die Blackbird hält mehrere Rekorde für Turbinenflugzeuge, darunter den Höhenrekord im Horizontalflug mit 26.213 m (86.000 ft) und den Geschwindigkeitsrekord mit 3.529,6 km/h (1.906 KTAS, M3.36). Die SR-71 schaffte die schnellste Nordatlantiküberquerung von New York nach London in 1 Stunde 55 Minuten inklusive Nachtanken in der Luft. Als Triebwerke wurden Pratt & Whitney J58 verwendet, streng genommen eine Kombination aus Turbinen- und Staustrahltriebwerk, da große Mengen Zapfluft direkt zum Nachbrenner geleitet werden. Die Temperatur der Aussenhaut im Flug erreichte maximal 316 °C am Bug bis 593 °C am Heck.

032 01 00 00

Generelles zur Flugleistung von Flugzeugen

032 01 01 00 Gesetzliche Regelungen

Die gesetzlichen Vorschriften zur Zulassung von Luftfahrzeugen regeln neben den Sicherheitsanforderungen auch die Anforderungen hinsichtlich der von einem Luftfahrzeug mindestens zu erbringenden Flugleistungen. Zum Beispiel wird dort geregelt, welche Steigleistung für ein Flugzeug beim Ausfall von einem oder mehreren Triebwerken im kritischen Moment eines Starts nachzuweisen ist. Die Anforderungen sind je nach Zulassungsklasse unterschiedlich geregelt. In Europa werden folgende Zulassungsvorschriften angewendet:

- ▶ CS-22 (Sailplanes and Powered Sailplanes)
- ▶ CS-23 (Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Aeroplanes)
- ▶ CS-25 (Large Aeroplanes)
- ▶ CS-27 (Small Rotorcraft)
- ▶ CS-29 (Large Rotorcraft)
- ▶ CS-31HB (Hot Air Balloons)
- ▶ CS-34 (Aircraft Engine Emissions and Fuel Venting)
- ▶ CS-36 (Aircraft Noise)
- ▶ CS-APU (Auxiliary Power Units)
- ▶ CS-AWO (All Weather Operations)
- ▶ CS-E (Engines)
- ▶ CS-P (Propellers)
- ▶ CS-VLA (Very Light Aeroplanes)
- ▶ CS-VLR (Very Light Rotorcraft)

Zusätzlich zu den Regelungen für die Zulassung von Luftfahrzeugen hat der Betreiber eines Luftfahrzeugs die Betriebsverfahren nach EU OPS 1 (Flugzeuge) bzw. JAR OPS 3 (Hubschrauber) einzuhalten, sofern das Luftfahrzeug kommerziell betrieben wird. Im Rahmen des Syllabus 032 werden nur CS-23, CS-25 und Part-CAT¹ näher betrachtet.

032 01 01 01 Anforderungen zur Zulassung gemäß CS-23 / CS-25

Die europäische Spezifikation CS-23 (EASA) enthält alle Zulassungsbestimmungen

- ▶ für Flugzeuge der Kategorien Normal, Utility und Aerobatic mit maximal 9 Passagiersitzen bis zu einem MTOM von 5.670 kg (12.500 lb)
- ▶ für zweimotorige Propellerflugzeuge der Commuter Kategorie mit maximal 19 Passagiersitzen bis zu einem MTOM von 8.618 kg (19.000 lb)



Abbildung 1: Beech 1900 Commuter, Zulassung nach CS23/FAR 23 (Quelle: Wikipedia, Foto: Jürgen Lehle)

¹ Die Vorschriften in EU OPS 1 und JAR OPS 3 sind im Rahmen der EASA „PART“ Änderungen in andere Dokumente verlegt worden. Die Performanceabschnitte von EU OPS 1 sind in PART.CAT.POL.A transponiert worden. Wir gehen im Rahmen dieses Buches nur noch auf die neue Darstellung nach Part-CAT ein.

Generelles zur Flugleistung

Die *Normalkategorie* erlaubt sämtliche normalen Flugmanöver inklusive Stalls, Lazy Eights, Chandelles und Steilkurven solange eine Schräglage von 60° nicht überschritten wird.

Bei der *Utilitykategorie* werden zusätzlich zu den Manövern der Normalkategorie Spins und Lazy Eights, Chandelles und Steilkurven erlaubt, solange eine Schräglage von 90° nicht überschritten wird.

Die *Aerobatic Kategorie* enthält keinerlei Beschränkungen der Flugmanöver.

Die *Commuterkategorie* erlaubt sämtliche normalen Flugmanöver inklusive Stalls und Steilkurven solange eine Schräglage von 60° nicht überschritten wird.

CS-25 enthält die Zulassungsbestimmungen für Großflugzeuge (Large Aeroplanes). Darunter fallen alle turbinengetriebenen Transportflugzeuge, wie sie im kommerziellen Bereich für den Passagier- oder Cargotransport zum Einsatz kommen, sofern die MTOM oberhalb von 5.670 kg liegt oder das Flugzeug mehr als 9 Passagiersitze hat.



Abbildung 2: B737, Zulassung nach CS 25/FAR 25 (Quelle: Wikipedia)

Subpart B der Spezifikation enthält unter ‚Performance‘ eine Fülle von Anforderungen hinsichtlich der Mindestflugleistungen eines solcherart zugelassenen Flugzeuges, die wir im Abschnitt 4 noch im Detail besprechen werden.

Unterschiede zwischen CS-23 und CS-25. Der wesentliche Unterschied zwischen CS-23 und CS-25 liegt in den unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Sicherheitsauslegung des Flugzeuges. Es sollte klar sein, dass ein kleines und leichtes Flugzeug sowohl aus Gewichtsgründen als auch aus Platzgründen nicht dieselben Anforderungen wie ein Großflugzeug erfüllen kann. Immerhin umfasst CS-23 so unterschiedliche Flugzeuge wie eine Cessna 152 mit zwei und eine Beech 1900 mit 19 Sitzplätzen.

So können beispielsweise die Anforderungen an die Redundanz von Komponenten bei CS-23 nicht so hoch gesetzt sein wie bei CS-25. Geringere Redundanz betrifft ggf. Strukturkomponenten, d.h. Rumpf, Tragwerk, Steuerwerk usw., Triebwerke, Hydraulik, elektrisches Bordsystem, Avionik und Flight Management System und die Not- und Sicherheitsausrüstung.

So darf beispielsweise die Struktur eines nach CS-23 zugelassenen Flugzeuges geringeren Anforderungen genügen, z.B. dürfen die Tragflügel nur mit einem statt mit zwei Holmen ausgelegt sein.

Method	CS-23	CS-25
Fail Safe	möglich	nicht erlaubt
Safe Life	möglich	nur erlaubt, falls fehlertolerant nicht machbar ist
Damage Tolerance	möglich	für nahezu alle Strukturkomponenten vorgeschrieben

Tabelle 1: Unterschiede CS23 – CS25

Auch bei den Triebwerken gibt es keine Vorschrift zu redundanter Auslegung, die Konstruktion mit nur einem Triebwerk ist möglich. Gleiches gilt für das Steuerwerk, im einfachsten Fall ist ein einzelnes mechanisches System ausreichend. Das elektrische Bordsystem darf im einfachsten Fall aus einem Generator und einer Bordbatterie bestehen. Wir wollen die vielen möglichen Variationen an dieser Stelle nicht weiter ausführen, da die Anzahl der Fälle groß ist und es uns hier nur um die Frage nach dem wesentlichen Unterschied geht.

Bezüglich der Performanceanforderungen bestehen ebenfalls große Unterschiede zwischen den beiden Zulassungsklassen.

Beispiel: Bei CS-23 wird beim Start über das 50 ft Hindernis vorausgesetzt, dass alle Triebwerke fehlerfrei arbeiten. Es ist dabei nur die unter diesen Bedingungen benötigte Startbahnlänge anzugeben. Der Hersteller muss darüber hinaus keinerlei Angaben machen, ob bei einem Triebwerkausfall die verbleibende Restlänge der Startbahn ausreichend für einen Stopp ist und ob der Start mit einem Triebwerk fortgesetzt werden kann.

Bei CS-25 zugelassenen Flugzeugen muss hingegen garantiert sein, dass das Flugzeug entweder auf der verbleibenden Startbahnlänge stoppen kann oder mit dem verbleibenden intakten Triebwerk den Start erfolgreich fortsetzen kann. Die erforderliche Startstrecke wird als Balanced Field Length (BFL) bezeichnet.

Nach CS-25 zugelassene Flugzeuge müssen demnach im Vergleich zu CS-23 einem höheren Sicherheitsstandard genügen und haben dazu auch performanceseitig mehr Reserven nachzuweisen.



CS-23 und CS-25 sind bis auf geringe Interpretationsunterschiede identisch mit den Zulassungsvorschriften FAR 23 und FAR 25 der US-amerikanischen Luftfahrtbehörde FAA.

032 01 01 02 Vorschriften für Betriebsverfahren

Alle kommerziell nach europäischem Recht betriebenen Transportflugzeuge müssen die in CAT.POL.A festgelegten Betriebsverfahren befolgen. Darin enthalten sind Vorschriften für Take-off, En-route, Landing usw., welche die Flugleistung betreffen. Die einzelnen Vorschriften sind je nach Leistungsklasse (Performance Class) des Flugzeuges unterschiedlich. Die genannten Vorschriften sind in folgenden Abschnitten geregelt.

- ▶ Performance General
ANNEX IV (PART-CAT) Subpart C Section 1 Aeroplanes Chapter 1²
- ▶ Performance Class A
ANNEX IV (PART-CAT) Subpart C Section 1 Aeroplanes Chapter 2
- ▶ Performance Class B
ANNEX IV (PART-CAT) Subpart C Section 1 Aeroplanes Chapter 3
- ▶ Performance Class C
ANNEX IV (PART-CAT) Subpart C Section 1 Aeroplanes Chapter 4

² Vorschriften von der EASA in Fortsetzung von OPS 1 neu verfasst in [14], siehe im Literaturverzeichnis

In Annex I 'Definitions for terms used in Annexes II–VIII', sind die einzelnen Klassen anhand des MTOM-Wertes und der Anzahl der Passagiersitze (MOPSC=Maximum Operating Passenger Seating Capacity) definiert:

Flugzeug mit	Multi-engine Turbojet*	Turbo Propeller	Propeller-driven engine (Kolbentriebwerke)
Passagiersitze ≥ 9 MTOM ≥ 5.700 kg	Class A	Class A (Multi-engine)	Class C
Passagiersitze ≤ 9 MTOM ≤ 5.700 kg	Class A	Class B	Class B

Tabelle 2: Definition der Zulassungs- bzw. Performanceklassen

*) unter Turbojet engines sind hier sowohl Turbojet- als auch Turbofan-Triebwerke zu verstehen

Zitat aus Annex I :“

- ‘Performance class A aeroplanes’ means multi-engined aeroplanes powered by turbo-propeller engines with an MOPSC of more than nine or a maximum take-off mass exceeding 5 700 kg, and all multi-engined turbo-jet powered aeroplanes.
- ‘Performance class B aeroplanes’ means aeroplanes powered by propeller engines with an MOPSC of nine or less and a maximum take-off mass of 5 700 kg or less.
- ‘Performance class C aeroplanes’ means aeroplanes powered by reciprocating engines with an MOPSC of more than nine or a maximum take-off mass exceeding 5 700 kg.“



Unter ‚propeller engines‘ bei Performance Class B versteht man dabei offensichtlich Turboprop- und Kolbentriebwerke.

Single-engine Turbojet Flugzeuge haben nach dieser Definition keine Zugehörigkeit zu einer Performance Class.

Die weiteren Einzelheiten werden in den Abschnitten zu den jeweiligen Performanceklassen besprochen. Bevor wir damit beginnen, wollen wir uns zunächst mit der allgemeinen Theorie der Flugleistung beschäftigen.

032 01 02 00 Allgemeine Theorie der Flugleistung

Die allgemeine Theorie der Flugleistung beschäftigt sich mit den generellen physikalischen Gesetzen, die das Verhalten eines Flugzeuges in seinen einzelnen Flugphasen bestimmen.

032 01 02 01 Flugphasen

Ein Flug lässt sich ganz allgemein in folgende Flugphasen einteilen:

- ▶ Start (engl. take-off),
- ▶ Steigflug (engl. climbing flight),
- ▶ Reiseflug (engl. level flight),
- ▶ Sinkflug und Landeanflug (engl. descending flight and approach),
- ▶ Landung (engl. landing).

Steigflug als auch Sinkflug lassen sich noch einmal unterteilen in die Phasen, in denen mit Auftriebshilfen (flaps, slats usw.) geflogen wird und in solche mit einer Clean-Konfiguration. Abbildung 3 gibt einen Überblick.

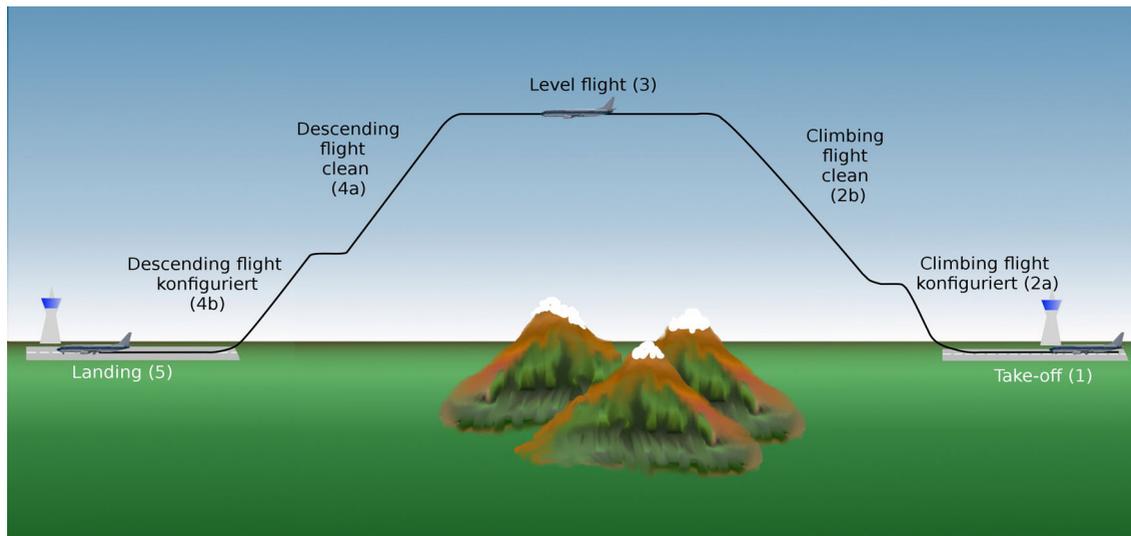


Abbildung 3: Die Flugphasen eines Fluges (Grafik: KLSP)

Zu den einzelnen Flugphasen lassen sich viele interessante Fragen stellen, wie beispielsweise folgende:

- ▶ Wie groß ist die benötigte Startstrecke (engl. take-off distance) bei einem Flugzeugstart und durch welche Parameter wird sie beeinflusst?
- ▶ Wie groß ist die maximale Steigrate (engl. maximum climb rate) eines Flugzeuges und bei welcher Geschwindigkeit wird sie erzielt?
- ▶ Wie groß ist die Dienstgipfelhöhe (engl. service ceiling) eines Flugzeuges und durch welche Parameter wird sie beeinflusst?
- ▶ Wie groß ist maximale Reisefluggeschwindigkeit (engl. maximum cruise speed) eines Flugzeuges und wie kann man sie berechnen?
- ▶ Wie groß ist die maximale Reichweite (engl. maximum range) und die maximale Flugdauer (engl. maximum endurance)? Bei welcher Geschwindigkeit wird sie im jeweiligen Fall erzielt? Welche ist die beste Strategie zur Erzielung der größten Reichweite mit und ohne Windeinfluss?
- ▶ Von welchen Größen wird der Sinkflug bestimmt? Wie groß ist die minimale Sinkrate und wie lange dauert der Sinkflug bis zur Zielhöhe?
- ▶ Wie groß ist die benötigte Landestrecke (engl. landing distance) bei einer Landung und durch welche Parameter wird sie beeinflusst?

Die gestellten Fragen betreffen allesamt Eigenschaften, nach denen man ein Flugzeug unter dem Gesichtspunkt seiner Leistungen beurteilen kann. Sie geben einen Einblick in das Thema, das uns im Folgenden intensiv beschäftigen wird: Die Theorie der Flugleistung von Flugzeugen (engl. performance of aeroplanes). Allgemein wird sie in der Hochschullehre als Unterthema von Flugdynamik (engl. flight dynamics) behandelt.

032 01 02 02 Definitionen und theoretische Konzepte

Bevor wir zur Theorie der Flugleistung kommen, wollen wir zuerst ein paar grundlegende Kenntnisse wiederholen, die im Rahmen der weiteren Betrachtungen immer wieder benötigt werden.



Aus didaktischen Gründen werden im Folgenden die einzelnen Learning Objectives (LOs) teilweise in anderer Reihenfolge dargestellt. Einige LOs können in andere Abschnitte verlagert sein, wenn sie dort besser im jeweiligen Zusammenhang erklärt werden können. In diesem Abschnitt gehen wir insbesondere bei der Darstellung der mathematischen Formeln über das hinaus, was im Syllabus verlangt wird.

Auftriebskraft

Ein Flugzeug fliegt mit Hilfe seiner Tragflächen. Die Tragflächen gleiten dabei im Flug durch die Luft, sodass um sie herum eine Luftströmung in Richtung der Sehne des Tragflächenprofils entsteht. Bei einem Motorflugzeug wird dabei der Vortrieb durch das Triebwerk geleistet. Allerdings ist die Art und Weise, wie die Luftströmung zu Stande kommt, sekundär, ein starker Wind am Boden oder beim Gleiter die Nutzung der Schwerkraft kann genauso gut für ausreichende Luftströmung sorgen. Existiert eine Luftströmung über einer Tragfläche, so erfährt diese eine Kraft, die senkrecht zur Luftströmung nach oben wirkt, genannt Auftriebskraft oder kurz Auftrieb. Der Auftrieb (engl. lift) ist demnach eine physikalische Kraft, die sich erst dann bildet, wenn die Tragflächen von Luft mit der Geschwindigkeit V umströmt werden.

Quantitative Messungen, wie sie bereits ab dem Neunzehnten Jahrhundert durchgeführt wurden, zeigen, dass der Auftrieb mit dem Staudruck, dem Produkt aus der halben Luftdichte ρ (sprich rho) mal dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit V zunimmt. Ferner ist der Auftrieb proportional zur Auftriebsfläche S , d.h. je größer die Fläche, umso größer ist der Auftrieb. Drittens ist die Auftriebskraft umso größer, je höher der Anstellwinkel α (engl. angle of attack, Abk. AoA), der Winkel der Tragflächenprofilsehne zur Strömungsrichtung, ist. Die letztgenannte Abhängigkeit wird allgemein in Form eines Auftriebskoeffizienten $c_l = f(\alpha)$ dargestellt, wobei sich die unterschiedlichen Eigenschaften einer Tragfläche im unterschiedlichen Verlauf der Kurve niederschlagen. Die gesamte Auftriebskraft eines Flugzeuges³ lässt sich somit in folgender Formel ausdrücken:

Auftriebskraft eines Flugzeuges

$$L = C_L(\alpha) * \frac{\rho}{2} * V^2 * S \quad (1)$$

L = Auftrieb (Lift); $C_L(\alpha)$ = Auftriebsbeiwert als Funktion von α ; ρ = Luftdichte;
 V = Strömungsgeschwindigkeit; S = auftriebswirksame Fläche (Surface)

³ Mit C_L , C_D in Großbuchstaben sind die Beiwerte der gesamten Tragfläche bzw. des Flugzeugs gemeint.

Widerstandskraft

Eine von einer Luftströmung umströmte Tragfläche erzeugt neben der Auftriebskraft zusätzlich eine aerodynamische Widerstandskraft, die quantitativ einer ähnlichen Abhängigkeit gehorcht wie die Auftriebskraft. Der aerodynamische Widerstand (engl. drag) ist ebenfalls proportional zum Staudruck und nimmt genauso wie der Auftrieb proportional zur Auftriebsfläche S zu. Ein Unterschied besteht im Verhalten bezüglich verschiedener Anstellwinkel. Der Widerstand ist bei einem bestimmten Anstellwinkel minimal und nimmt links und rechts von diesem Punkt aus nichtlinear zu. Die letztgenannte Abhängigkeit wird allgemein in Form eines Widerstandskoeffizienten $c_d = f(\alpha)$ dargestellt, wobei sich die unterschiedlichen Eigenschaften einer Tragfläche im unterschiedlichen Verlauf der Kurve niederschlagen. Die gesamte Widerstandskraft eines Flugzeuges lässt sich somit in folgender Formel ausdrücken:

Widerstandskraft eines Flugzeuges

$$D = C_D(\alpha) * \frac{\rho}{2} * V^2 * S \quad (2)$$

D = Widerstand (Drag); $C_D(\alpha)$ = Widerstandsbeiwert als Funktion von α ; ρ = Luftdichte;
 V = Strömungsgeschwindigkeit; S = auftriebswirksame Fläche (Surface)

Auftrieb, Widerstand und Polardiagramm

Die Gleichungen für Auftrieb und Widerstand sind grundlegend zum Verständnis der Aerodynamik. Zunächst einmal lässt sich daraus erkennen, dass sowohl Auftrieb als auch Widerstand von der Luftdichte ρ abhängen. Da sich der Wert von ρ mit Altitude und Temperatur ändert, trifft dies auch für Lift und Drag zu. Ferner ändern sich Lift und Drag mit der Auftriebsfläche S , was bei heutigen Transportflugzeugen bei Start und Landung genutzt wird, denn die eingesetzten Fowler-Flaps vergrößern die Fläche signifikant.

Kommen wir nun zu den beiden Funktionen $C_L(\alpha)$ und $C_D(\alpha)$. In Abbildung 4 haben wir generische Kurven dargestellt, also Kurven, die einen typischen Verlauf widerspiegeln.

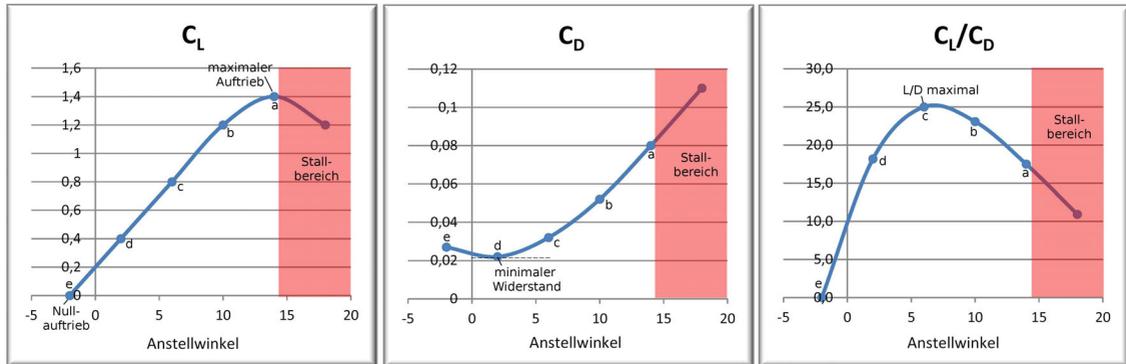


Abbildung 4: Generische Auftriebs- und Widerstandskurven (Grafik: KLSP)

Beginnen mit der Auftriebskurve $C_L(\alpha)$ links. Wie man sieht, ist die Zunahme des Auftriebsbeiwerts in weiten Teilen linear mit dem Anstellwinkel. Im oberen Bereich wird die Abhängigkeit nichtlinear und erreicht ein Maximum, das ist der Anstellwinkel mit dem höchsten Auftrieb. Bei noch größerem Anstellwinkel „stallt“ die Tragfläche und der Auftrieb nimmt wieder ab. Auf der linken Seite der Kurve lässt sich noch erkennen, dass beim Anstellwinkel null noch Auftrieb existiert und zum Nullauftrieb ein negativer Anstellwinkel nötig ist.

Betrachten wir nun die Widerstandskennlinie $C_D(\alpha)$ in der Mitte. Wie man sieht ist die Abhängigkeit nichtlinear, der Verlauf der Kurve ist vergleichbar dem einer Parabel. Es gibt einen minimalen Widerstandsbeiwert, der bei einem relativ geringen Anstellwinkel realisiert wird. Links und rechts von diesem Wert nimmt der Widerstand quadratisch mit dem Anstellwinkel zu.

Der aerodynamische Widerstand eines Flugzeuges setzt sich aus drei Teilgrößen zusammen:

$$\text{Gesamtwiderstand } (\alpha) = \text{parasitärer W.} + \text{kompresibler W.} + \text{induzierter W.}$$

Der parasitäre Widerstand (engl. parasite drag) besteht aus der Reibung der Luftteilchen an der Oberfläche des Flugzeuges und dem Formwiderstand, der durch die erzwungene Trennung der Strömung um die Form herum entsteht. Hinzu kommt der Widerstand aus den Interferenzen der Strömung an den Einzelkomponenten.

Der kompressible Widerstand (engl. compressible drag) tritt bei höheren Machzahlen durch die Kompression der Luft an der Form zutage.

Der induzierte Widerstand (engl. induced drag oder vortex drag = Wirbelwiderstand) entsteht an den Tragflächenenden durch den Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite.

Der Gesamtwiderstandsbeiwert C_D lässt sich in relativ einfacher Form und sehr guter Näherung in quadratischer (parabolischer) Abhängigkeit des Auftriebsbeiwerts C_L beschreiben und zwar wie folgt⁴:

Parabolische Widerstandspolare

$$C_D = C_{D,0} + K C_L^2 \quad (3)$$

$C_{D,0}$ = Nullauftriebskoeffizient; K = Koeffizient auftriebsinduzierter Widerstand

Dabei ist $C_{D,0}$ der Nullauftriebskoeffizient (engl. zero-lift drag coefficient) und $K C_L^2$ ist der durch den Auftrieb induzierte Widerstand (engl. lift-induced drag). Mit Hilfe dieser Gleichung kann der Widerstand über zwei Konstanten $C_{D,0}$ und K und $C_L(\alpha)$ ausgedrückt werden, was die Darstellungen und Berechnungen in der Performancetheorie deutlich vereinfacht.

Die grafische Darstellung zu Gleichung (3) wird parabolische Widerstandspolare genannt, siehe Abbildung 6. Der Gesamtwiderstand setzt sich dabei aus dem auftriebsinduzierten Widerstand, der aus dem Anstellwinkel herrührt und daher bei hohem Anstellwinkel groß ist, und dem Nullauftriebswiderstand zusammen, der aus der Oberflächenreibung herrührt und daher unabhängig vom Anstellwinkel quadratisch mit der Geschwindigkeit wächst.



$$C_{D,0} = 0,0163$$
$$K = 0,0576$$

Abbildung 5: Werte der P-51 Mustang
(Quelle: aus [3])

Es ist unmittelbar einzusehen, dass ein Flugzeug mit viel Widerstand und wenig Auftrieb keine besonders gelungene Konstruktion darstellt. Angestrebt bei der Konstruktion wird folglich ein hohes Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand (L/D). Das Verhältnis von Auftrieb zu Widerstand ist ein wichtiger Parameter der Flugleistung eines Flugzeuges. Wir werden an anderer Stelle noch sehen, dass es insbesondere bei Range und Endurance eine zentrale Rolle spielt. Wie man unschwer erkennt, kürzt sich bei der Division der Gleichungen (1) und (2) Staudruck und Flächenwert S heraus, sodass L/D (engl. Lift-to-Drag) identisch ist mit dem Quotienten aus C_L und C_D .

⁴ zur Ableitung siehe [1], S.129 ff.