

Cord-Christian Rossow · Klaus Wolf · Peter Horst (Hrsg.)

Handbuch der Luftfahrzeug- technik



HANSER



AgustaWestland

Helicopter Division

Cord-Christian Rossow/Klaus Wolf/Peter Horst (Herausgeber)

Handbuch der Luftfahrzeugtechnik

Mit 1130 Bildern und 34 Tabellen

HANSER

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.

ISBN 978-3-446-42341-1

E-Book-ISBN 978-3-446-43604-6

Einbandbild und Bild Seite 2: Airbus S.A.S

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2014 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Projektleitung/Lektorat: Dipl.-Phys. Jochen Horn

Herstellung: Katrin Wulst

Zeichnungen Kapitel 3: Rosemarie Scheller, Berlin

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH

Printed in Germany

Vorwort

Kaum ein Bereich der Technik hat in den letzten 100 Jahren so weitreichende Auswirkungen auf unsere Gesellschaft gehabt wie die Luftfahrt. Obwohl der Traum vom Fliegen schon so alt wie die Menschheit ist, stellten sich praktische Erfolge bei der Verwirklichung jedoch erst mit den Arbeiten und Flugversuchen von *Lilienthal* und der Gebrüder *Wright* ein. In dieser Anfangszeit war Flugtechnik noch eine Beschäftigung für Enthusiasten, und bei der Umsetzung von Ideen spielte der Glaube an das Funktionieren oft eine deutlich größere Rolle als das Wissen um die physikalischen und technischen Zusammenhänge. Erst Errungenschaften in der Motorentechnik, bei den Material- und Strukturtechnologien sowie Fortschritte im Verständnis strömungsmechanischer Phänomene führten dann in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zu einer rasanten Entwicklung der Luftfahrttechnik. Innerhalb eines Zeitraums von nicht einmal 50 Jahren mündeten erste „Hüpfer“ mit kaum steuerbaren Fluggeräten in der bis dahin undenk바aren Beherrschung des Überschallfluges. Dieser enorme Fortschritt wurde allerdings wesentlich von militärischen Erfordernissen und Interessen getrieben. Zivile Anwendungen wurden in den ersten Jahrzehnten der Luftfahrtforschung weitgehend aus Entwicklungen der Militärluftfahrt abgeleitet. Ab den 1970er-Jahren hat sich die Weiterentwicklung der Luftfahrzeugtechnik zunehmend in Richtung ziviler Produkte verschoben, und der Luftverkehr ist zu einem bedeutenden globalen Wirtschaftsfaktor angewachsen. Sowohl im Geschäftsleben als auch in der Freizeit ist es heute selbstverständlich, das Flugzeug als Transportmittel gleichberechtigt neben dem Auto oder der Bahn zu nutzen.

Diese gesellschaftliche Entwicklung verdrängt häufig das Bewusstsein dafür, dass Entwurf, Konstruktion, Produktion und Betrieb von Luftfahrzeugen auch heute noch technische Meisterleistungen sind. Damit sich ein Flugzeug überhaupt in die Luft erheben kann, ist bereits im Vorfeld seines Entstehens ein sorgfältiges Zusammenspiel verschiedenster Fachdisziplinen, wie etwa der Aerodynamik, der Flugsysteme, der Strukturmechanik und der Antriebstechnik, erforderlich. Soll dann auch noch eine bestimmte Flugmission erfüllt werden, z. B. der Transport definierter Lasten über eine vorgegebene Distanz mit minimalen Betriebskosten bei geringem Schadstoffausstoß, nehmen die Anforderungen an die interdisziplinäre Abstimmung deutlich zu.

In den letzten Jahren haben sich die technischen Herausforderungen gerade im zivilen Flugzeugbau aufgrund zwingender Forderungen nach höherer Wirtschaftlichkeit noch weiter verschärft: Nur durch die strikte Einhaltung von Entwicklungs- und Produktionskosten sind die Vor-

aussetzungen für einen Markterfolg gegeben, wobei eine überlegene technische Leistungsfähigkeit als konkurrenzentscheidendes Merkmal selbstverständlich ist. Die Entwicklung neuer Luftfahrzeuge stellt daher hohe Anforderungen an die Fähigkeiten der beteiligten Techniker und Ingenieure. Jedes der involvierten Fachgebiete ist für sich genommen technologisch bereits sehr komplex und setzt fundiertes Wissen voraus. Zusätzlich ist das Verständnis für die Wechselwirkungen der Einzeldisziplinen erforderlich, damit in der Entwicklung notwendige Kompromisse eingegangen werden können.

Um dem Bedarf nach einer umfassenden ingenieurwissenschaftlichen Darstellung der Technik von Luftfahrzeugen nachzukommen, wurde mit dem vorliegenden **Handbuch der Luftfahrzeugtechnik** zum ersten Mal im deutschsprachigen Raum der Ansatz verfolgt, grundlegendes Wissen der wichtigsten flugtechnischen Disziplinen in einem Fachbuch zusammenzufassen. Die Herausgeber sind sich darüber im Klaren, dass der Inhalt der 1. Auflage noch keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann. Bedingt durch den begrenzten Seitenumfang wurden neben einem kurzen historischen Abriss der technischen Entwicklung zunächst die Fachgebiete Aerodynamik, Flugmechanik, Luftfahrzeugstrukturen, Antriebe, Flugführung und Flugzeugsysteme mit jeweils einem Kapitel berücksichtigt. Auch innerhalb dieser Themengebiete war eine Beschränkung auf wesentliche Grundlagen erforderlich. Dementsprechend ist mit diesem Kompendium nicht beabsichtigt, weiterführende Fachliteratur zu ersetzen. Eine Erweiterung des fachlichen Spektrums bleibt nachfolgenden Auflagen vorbehalten.

Das Handbuch wendet sich in erster Linie an Studierende der Luft- und Raumfahrttechnik. Ihnen soll der Einstieg in die relevanten Fachgebiete ermöglicht werden, wobei durch die Zusammenstellung in einem einheitlichen Werk besonders die interdisziplinären Zusammenhänge verdeutlicht werden können. Aber auch in der Praxis tätige Ingenieure sollen mit dem Handbuch ein für sie nützliches Nachschlagewerk vorfinden.

Die Anregung zu diesem Handbuch kam von Herrn *Jochen Horn* vom Carl Hanser Verlag München. Er hat sehr viel Zeit und Geduld investiert, bis aus der Idee ein fertiges Buch wurde. Dafür möchten sich die Herausgeber bei ihm und dem Verlag herzlich bedanken. Dank gebührt auch den Autoren für ihre Bereitschaft, Beiträge gemäß dem heutigen Wissensstand zu leisten. Ohne das uneigennütziges Engagement dieser Kollegen wäre das vorliegende Handbuch nicht realisierbar gewesen.

Cord-Christian Rossow, Klaus Wolf, Peter Horst

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. habil. *Cord-Christian Rossow*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig

Prof. Dr.-Ing. *Klaus Wolf*, Technische Universität Dresden, Institut für Luft- und Raumfahrttechnik

Prof. Dr.-Ing. *Peter Horst*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau

Autoren

Prof. Dr.-Ing. *Horst Baier*, Technische Universität München, Institut für Luft- und Raumfahrt, Lehrstuhl für Leichtbau, (Kapitel 4.6)

Dr.-Ing. *Andreas Bergmann*, Deutsch-Niederländische Windkanäle (DNW), Niedergeschwindigkeits-Windkanal Braunschweig, (Kapitel 2.9)

Prof. Dr.-Ing. *Jan Werner Delfs*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.7)

Prof. Dr.-Ing. *Thomas Fleischer*, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH Dresden, (Kapitel 4.7)

Dr.-Ing. *Lutz Gebhardt*, AIRBUS Operations GmbH Bremen, (Kapitel 2.6)

Prof. Dr.-Ing. *Wilhelm Hanel*, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH Dresden, (Kapitel 4.7)

Prof. Dr.-Ing. *Peter Hecker*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugführung, (Kapitel 6)

Prof. Dr.-Ing. *Peter Horst*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugzeugbau und Leichtbau, (Kapitel 4.1.1, 4.2.1.1, 4.2.1.3, 4.2.1.6, 4.2.1.8, 4.2.2, 4.2.3.1, 4.2.3.3, 4.2.4.1, 4.2.5, 4.4.1.4, 4.4.2, 4.4.3.3)

Prof. Dr.-Ing. *Karl Heinz Horstmann*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.4)

Prof. Dr.-Ing. *Horst Körner*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 1)

Prof. Dr.-Ing. *Ewald Krämer*, Universität Stuttgart, Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, (Kapitel 2.3.2)

Dipl.-Ing. *Anna Kröhnert*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.6)

Prof. Dr.-Ing. *Norbert Kroll*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.8)

Hauke Onissen, Hamburg, (Kapitel 5)

Dr.-Ing. *Klausdieter Pahlke*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Programmdirektion Luftfahrt Braunschweig, (Kapitel 2.3.3)

Prof. Dr.-Ing. *Rolf Radespiel*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik, (Kapitel 2.2)

Dipl.-Ing. *Gerd Roloff*, AIRBUS Operations GmbH Hamburg, (Kapitel 7.10)

Prof. Dr.-Ing. habil. *Cord-Christian Rossow*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.1)

Dr.-Ing. *Ralf Rudnik*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.3.1)

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. *Gottfried Sachs*, Technische Universität München, Lehrstuhl für Flugsystemdynamik, (Kapitel 3)

Dr.-Ing. *Per Martin Schachtebeck*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugführung, (Kapitel 6)

Prof. Dr.-Ing. *Dieter Scholz*, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau, (Kapitel 7)

Prof. Dr.-Ing. *Helmut Schürmann*, Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen, (Kapitel 4.1.2, 4.2.4.2)

Dipl.-Ing. *Meiko Steen*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Flugführung, (Kapitel 6)

Prof. Dr.-Ing. *Lorenz Tichy*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aeroelastik Göttingen, (Kapitel 4.5)

Dr.-Ing. *Jochen Wild*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik Braunschweig, (Kapitel 2.5)

Prof. Dr.-Ing. *Klaus Wolf*, Technische Universität Dresden, Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, (Kapitel 4.2.1.4, 4.2.1.5, 4.2.1.7, 4.2.3.2, 4.3, 4.4.1.1, 4.4.1.2, 4.4.1.3, 4.4.3.1, 4.4.3.2)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	21
1 Einleitung	25
1.1 Die Anfänge des Motorflugs	26
1.2 Der Erste Weltkrieg	27
1.3 Entstehung der Passagierluftfahrt	28
1.4 Der Zweite Weltkrieg	31
1.5 Das Strahltriebwerk erobert die Luftfahrt	33
1.6 Der Traum vom Überschallflug	35
1.7 Die Expansion des Luftverkehrs	36
1.8 Flugzeuge der allgemeinen Luftfahrt	39
1.9 Hubschrauber	40
1.10 Was bringt die Zukunft?	41
Kommentierte Literatur- und Quellenhinweise	43
Bildquellen	43
2 Aerodynamik	45
2.1 Strömungsmechanische Grundgleichungen	47
2.1.1 Allgemeines	47
2.1.2 Bilanzgleichungen für Masse, Impuls und Energie	47
2.1.2.1 Prinzip der Bilanzbildung	47
2.1.2.2 Massenbilanz	48
2.1.2.3 Impulsbilanz	48
2.1.2.4 Energiebilanz	49
2.1.2.5 Generalisierte Schreibweise	50
2.1.3 Differenzielle Form	50
2.1.3.1 Streng konservative Differenzialform	51
2.1.3.2 Schwach konservative Differenzialform	51
2.1.3.3 Nicht-konservative Differenzialformen	51
2.1.4 Konstitutive Beziehungen	52
2.1.4.1 Thermodynamische Zustandsgleichungen	52
2.1.4.2 Molekulare Reibungsspannung	52
2.1.4.3 Molekulare Wärmeleitung	53
2.1.4.4 Transportkoeffizienten	53
2.1.4.5 Turbulente Strömungen	53
2.1.5 Kennzahlen	54
2.1.5.1 Machzahl	54
2.1.5.2 Reynoldszahl	54
2.1.5.3 Prandtlzahl	54
2.1.5.4 Strouhalzahl	55
2.1.6 Vereinfachungen	55
2.1.6.1 Potenzialgleichung	55
2.1.6.2 Inkompressible Strömungen	55
2.1.6.3 Grenzschichtgleichungen	56
Literatur	57
Bildquelle	57

2.2 Grundlagen der Aerodynamik	57
2.2.1 Grundbegriffe	57
2.2.1.1 Luftkräfte und -momente	58
2.2.1.2 Beiwerte und Kennzahlen	59
2.2.1.3 Nachrechnungs- und Entwurfsaufgaben	59
2.2.1.4 Beschränkung der Grundlagen	59
2.2.2 Grundlagen der Grenzschichten umströmter Körper	60
2.2.2.1 Lösung der Grenzschichtgleichungen	61
2.2.2.2 Verhalten turbulenter Grenzschichten	63
2.2.2.3 Transition von laminaren zu turbulenten Grenzschichten	64
2.2.3 Potenzialtheorie der nichtviskosen Umströmung eines Tragflügels	64
2.2.3.1 Potenzialgleichung und Affinitätsgesetz	64
2.2.3.2 Allgemeine Lösung der Potenzialgleichung	65
2.2.3.3 Berechnungsmethoden	66
2.2.3.4 Überschallströmungen	68
2.2.4 Ergebnisse der Profiltheorie	69
2.2.4.1 Skeletttheorie	69
2.2.4.2 Einflüsse der Dickenverteilung und der Grenzschichten	71
2.2.4.3 Einfluss der Machzahl und transsonische Strömungsphänomene	72
2.2.4.4 Schlanke Profile im Überschall	74
2.2.5 Ergebnisse der Tragflügeltheorie	75
2.2.5.1 Ungefeilte Tragflügel mit großer Streckung bei inkompressibler Strömung	75
2.2.5.2 Tragflügel mit beliebigem Grundriss bei Unterschallgeschwindigkeit	77
2.2.5.3 Tragflügel bei Überschallgeschwindigkeit	81
Literatur	83
2.3 Konfigurationsaerodynamik	83
2.3.1 Transportflugzeuge	83
2.3.1.1 Aerodynamische Anforderungen an Verkehrs- und Transportflugzeuge	85
2.3.1.2 Flügel-Rumpf-Anordnungen	88
2.3.1.3 Triebwerksintegration	95
Literatur	113
Bildquellen	113
2.3.2 Kampfflugzeuge	113
2.3.2.1 Anforderungen an moderne Kampfflugzeuge	114
2.3.2.2 Tragflügel	115
2.3.2.3 Flügel-Rumpf-Integration	130
2.3.2.4 Integration der Leitwerke	133
2.3.2.5 Einlaufintegration	138
2.3.2.6 Außenlastenintegration	147
Literatur	150
Bildquellen	150
2.3.3 Hubschrauber	151
2.3.3.1 Grundbegriffe	151
2.3.3.2 Rotoraerodynamik	155
2.3.3.3 Rumpfaerodynamik	166
2.3.3.4 Auslegung des Heckauslegers	168
Literatur	171
Bildquellen	172
2.4 Flügelentwurf	173
2.4.1 Allgemeine Entwurfsziele	173
2.4.2 Flügelpfeilung	174
2.4.3 Transsonische Profile	175

2.4.4	Transsonischer Pfeilflügel	177
2.4.4.1	Aerodynamischer Entwurf	177
2.4.4.2	Elastischer Flügel.....	178
2.4.5	Laminarflügel.....	179
2.4.6	Vorgepfeilter Flügel.....	181
2.4.7	Ausblick	183
	Literatur	183
	Bildquellen.....	184
2.5	Hochauftrieb.....	184
2.5.1	Grundlagen	184
2.5.2	Passive Hochauftriebssysteme.....	186
2.5.2.1	Passive Hochauftriebshilfen an der Vorderkante.....	187
2.5.2.2	Passive Hochauftriebshilfen an der Hinterkante	188
2.5.3	Aktive Auftriebssteigerung.....	189
2.5.3.1	Grenzschichtbeeinflussung durch Ausblasen und Absaugen	190
2.5.3.2	Zirkulationskontrolle und Superzirkulation	190
2.5.3.3	Ausnutzung des Triebwerksstrahls	191
	Literatur	192
	Bildquellen.....	192
2.6	Heck- und Leitwerksaerodynamik	192
2.6.1	Anforderungen, Grundformen und Positionierung.....	192
2.6.1.1	Einführung und Begriffsdefinitionen	192
2.6.1.2	Stabilität, Steuerung, Kraft- und Momentengleichgewicht	193
2.6.1.3	Grundgedanken zur Auslegung.....	193
2.6.1.4	Grundformen	193
2.6.2	Aerodynamik des Rumpfhecks	196
2.6.3	Höhenleitwerk	198
2.6.3.1	Grundlegende Anforderungen.....	198
2.6.3.2	Beitrag zur Luftkraft des Gesamtflugzeugs.....	198
2.6.3.3	Entwurfsaspekte	201
2.6.3.4	Profile für Höhenleitwerke	204
2.6.4	Seitenleitwerk.....	204
2.6.4.1	Grundlegende Anforderungen.....	204
2.6.4.2	Beitrag zur Luftkraft des Gesamtflugzeugs.....	205
2.6.4.3	Entwurfsaspekte	206
2.6.4.4	Profile für Seitenleitwerke	209
2.6.5	Ruder an Leitwerken.....	209
	Literatur	211
	Bildquellen.....	212
2.7	Aeroakustik.....	212
2.7.1	Grundlagen	212
2.7.1.1	Störungs- und Wellengleichungen	214
2.7.1.2	Lighthill-Gleichung – Aeroakustische Analogie.....	214
2.7.1.3	Ffowcs-Williams-&Hawkings-Gleichung	215
2.7.2	Schallerzeugung an Flugzeugen.....	216
2.7.2.1	Propellergeräusch	217
2.7.2.2	Turbofaneräusch	217
2.7.2.3	Strahlgeräusch	219
2.7.2.4	Umströmungsgeräusch	220
2.7.3	Schallerzeugung an Hubschraubern	221
2.7.3.1	Hauptrotorgeräusch	222

2.7.3.2	Heckrotorgeräusch	223
2.7.4	Installation	223
2.7.4.1	Installationsschallquellen	223
2.7.4.2	Schallabstrahlung unter Installationsbedingungen	223
2.7.5	Lärminderung	224
2.7.5.1	Entwurf lärmarmer aerodynamischer Komponenten	224
2.7.5.2	Lärminderungstechnologien	224
	Literatur	225
	Bildquellen	226
2.8	Numerische Methoden der Strömungsmechanik	226
2.8.1	Allgemeines	226
2.8.2	Grundprinzipien der numerischen Verfahren	227
2.8.2.1	Netzgenerierung	227
2.8.2.2	Diskretisierung	228
2.8.2.3	Lösung der diskreten Gleichungen	229
2.8.3	Finite-Volumen-Verfahren zur Lösung der Euler-/Navier-Stokes-Gleichungen	229
2.8.3.1	Räumliche Diskretisierung	229
2.8.3.2	Lösungsverfahren	230
2.8.3.3	Beschleunigungstechniken	231
2.8.3.4	Instationäre Verfahren	231
2.8.3.5	Turbulente Strömungen	231
2.8.3.6	Beispielanwendungen	232
2.8.4	Multidisziplinäre Simulation	234
2.8.5	Entwurf und Optimierung	235
2.8.6	Perspektive	235
	Literatur	236
2.9	Versuchstechnik	237
2.9.1	Druckmessung	237
2.9.2	Geschwindigkeitsmessung	239
2.9.3	Temperaturmessung	244
2.9.4	Messung der Kräfte und Momente	245
2.9.5	Versuchsanlagen	247
	Literatur	252
	Bildquelle	253
3	Flugmechanik	255
3.1	Flugleistungen	255
3.1.1	Einleitung	255
3.1.2	Atmosphäre	256
3.1.2.1	Einleitung	256
3.1.2.2	Physikalische Zusammenhänge	256
3.1.2.3	Normatmosphäre	256
3.1.3	Aerodynamische Kräfte	257
3.1.3.1	Einleitung	257
3.1.3.2	Auftrieb	257
3.1.3.3	Widerstand	258
3.1.3.4	Flugzeugpolare	259
3.1.4	Antrieb	259
3.1.4.1	Definition von Schub und spezifischem Brennstoffverbrauch	259
3.1.4.2	Propellerantrieb	259
3.1.4.3	Strahltriebwerke	260

3.1.4.4	Raketenantrieb	260
3.1.4.5	Verallgemeinerte Triebwerksleistungsgröße	260
3.1.5	Stationäre Flugzustände	261
3.1.5.1	Gleitflug und seine Bedeutung für die aerodynamische Konfiguration des Flugzeugs	261
3.1.5.2	Horizontalflug	262
3.1.5.3	Maximale Flughöhe	263
3.1.5.4	Steigflug	264
3.1.5.5	Horizontaler Kurvenflug	265
3.1.5.6	Flugbereichsgrenzen	268
3.1.6	Flugabschnitte	269
3.1.6.1	Strecken- und Dauerflug	269
3.1.6.2	Steigflugverfahren	271
3.1.6.3	Abflug und Landung	272
3.2	Stabilität, Steuerung, Flugdynamik	276
3.2.1	Einleitung	276
3.2.2	Statische Stabilität und Steuerung der Längsbewegung	277
3.2.2.1	Längsbewegung des stationären Geradeausflugs	277
3.2.2.2	Manöverstabilität (Abfangbewegung)	285
3.2.2.3	Steuersysteme und Steuerkräfte	287
3.2.3	Seitenbewegung	289
3.2.3.1	Freiheitsgrade	289
3.2.3.2	Gierbewegung	289
3.2.3.3	Rollbewegung	293
3.2.3.4	Kopplungsmomente	295
3.2.3.5	Spezielle unsymmetrische Flugzustände	298
3.2.4	Dynamik der Längsbewegung	301
3.2.4.1	Bewegungsgleichungen	301
3.2.4.2	Dynamische Stabilität	302
3.2.4.3	Eigenwerte und Eigenbewegungsformen	303
3.2.5	Dynamik der Seitenbewegung	305
3.2.5.1	Bewegungsgleichungen	305
3.2.5.2	Dynamische Seitenstabilität	307
3.2.5.3	Eigenwerte und Eigenbewegungsformen	307
	Literatur	309
	Bildquellen	309
4	Luftfahrzeugstrukturen	311
4.1	Luftfahrtwerkstoffe	312
4.1.1	Metalle	312
4.1.2	Faserverbundwerkstoffe	315
4.1.2.1	Historie und Charakterisierung	315
4.1.2.2	Fasern, Matrix-Kunststoffe und Halbzeuge	317
4.1.2.3	Spannungsanalyse	320
4.1.2.4	Laminattypen	321
4.1.2.5	Fügetechniken	323
	Literatur	325
	Bildquellen	325
4.2	Strukturtheorie	325
4.2.1	Lineare Elastizitätstheorie	325
4.2.1.1	Grundlagen	325
4.2.1.2	Scheiben	327

4.2.1.3	Biegebalken	329
4.2.1.4	Dünnwandige Profile	333
4.2.1.5	Torsionsstäbe	339
4.2.1.6	Schubfeldtheorie	343
4.2.1.7	Platten	348
4.2.2	Plastizität	351
4.2.2.1	Ramberg-Osgood-Beziehung	351
4.2.2.2	v. Mises-Spannung	352
4.2.2.3	Verfestigung	353
4.2.3	Stabilität	354
4.2.3.1	Stabknicken	355
4.2.3.2	Plattenbeulen	357
4.2.3.3	Schalenbeulen	360
4.2.4	Schädigungsverhalten	362
4.2.4.1	Metalle	362
4.2.4.2	Faser-Kunststoff-Verbunde	367
4.2.5	Numerische Berechnungsmethoden	373
4.2.5.1	Strukturmechanische Grundlagen	374
4.2.5.2	Grundzüge des numerischen Verfahrens	375
4.2.5.3	Nachlaufrechnung	375
	Literatur	376
	Bildquellen	377
4.3	Lasten	377
4.3.1	Arten von Lasten	377
4.3.2	Bemessungslasten	377
4.3.3	Belastungsgrenzen	378
4.3.3.1	Manöverlasten	379
4.3.3.2	Böenlasten	382
	Literatur	385
4.4	Strukturkonstruktion	385
4.4.1	Konstruktionsphilosophien	386
4.4.1.1	Einführung	386
4.4.1.2	Safe-Life	387
4.4.1.3	Fail Safe	387
4.4.1.4	Damage Tolerance	387
4.4.2	Anforderungen	391
4.4.3	Bauweisen	391
4.4.3.1	Strukturelemente	391
4.4.3.2	Fachwerkbauweise	394
4.4.3.3	Schalenbauweise	395
	Literatur	399
	Bildquellen	399
4.5	Grundlagen der Aeroelastik	399
4.5.1	Einführung	399
4.5.2	Klassifizierung der aeroelastischen Probleme	400
4.5.3	Grundlagen der Elastomechanik	401
4.5.3.1	Strukturidealisation	401
4.5.3.2	Statisches Deformationsverhalten des Tragflügels großer Streckung	403
4.5.3.3	Gepfeilte Auftriebsflächen kleiner Streckung	405
4.5.3.4	Schwingungen	405
4.5.4	Grundlagen der instationären Aerodynamik	406

4.5.4.1	Einleitende Bemerkungen	406
4.5.4.2	Tragflügel großer Streckung in inkompressibler Strömung	406
4.5.4.3	Tragflügel in kompressibler Unterschallströmung	409
4.5.4.4	Tragflügel in transsonischer Strömung	410
4.5.5	Statische aeroelastische Probleme	411
4.5.5.1	Stationäre Auftriebsverteilung am elastischen Pfeilflügel	412
4.5.5.2	Tragflügeltorsionsdivergenz	412
4.5.5.3	Ruderwirksamkeit	414
4.5.6	Dynamische aeroelastische Probleme	415
4.5.6.1	Klassisches Flattern mit einem Freiheitsgrad	415
4.5.6.2	Klassisches Flattern mit zwei und mehr Freiheitsgraden	416
4.5.6.3	Aeroservoelastische Stabilität	418
4.5.6.4	Transsonisches Flattern	419
4.5.6.5	Abreißflattern – Dynamic Stall	420
4.5.6.6	Kreiseffekte – Whirlflattern	421
4.5.6.7	Flattern von Turbomaschinenbeschaufelungen	422
4.5.6.8	Buffeting	423
4.5.7	Experimentelle aeroelastische Methoden und Verfahren	425
4.5.7.1	Standschwingungsversuch	425
4.5.7.2	Windkanalversuchstechnik	426
4.5.7.3	Flugschwingungsversuch	428
	Literatur	428
	Bildquellen	429
4.6	Adaptive Strukturen	429
4.6.1	Einführung und Übersicht	429
4.6.2	Adaptive Elastodynamik	430
4.6.2.1	Aktive Schwingungsdämpfung und Lastabminderung in Flugzeugstrukturen	430
4.6.2.2	Aktive Helikopterrotoren	431
4.6.2.3	Aktive Lärmreduktion in Flugzeugkabinen	431
4.6.3	Formvariable Tragflächen	431
4.6.4	Aktorik und Sensorik	432
4.6.4.1	Aktorik	433
4.6.4.2	Aktorpositionierung	433
4.6.4.3	Integration und Interaktion von Aktoren mit Strukturen	433
4.6.4.4	Sensoren und Messtechnik	434
4.6.5	Zur Modellbildung und Simulation	434
4.6.6	Strukturüberwachung und -monitoring	435
	Literatur	436
	Bildquellen	436
4.7	Strukturversuche	437
4.7.1	Einleitung	437
4.7.2	Testpyramide	438
4.7.3	Lastannahmen	438
4.7.4	Bestimmung von Schnittkraftverläufen und deren Diskretisierung	439
4.7.5	Lasteinleitung	440
4.7.6	Statischer Festigkeitsnachweis	441
4.7.7	Betriebsfestigkeitsnachweis	441
	Literatur	443
	Bildquellen	443

5	Antriebe	445
5.1	Propeller- und Turbopropantriebe	446
5.1.1	Grundlagen	446
5.1.1.1	Einleitung	446
5.1.1.2	Winkel am Propellerblatt, Fortschrittsgrad und darauf aufbauende Größen	447
5.1.1.3	Aerodynamische Kräfte am Propellerblatt und Propellerwirkungsgrad	449
5.1.2	Grundlagen zur Propellergeometrie	450
5.1.3	Propellercharakteristika und Schlupf	452
5.1.3.1	Propellerwirkung auf das Flugzeug	456
5.1.3.2	Asymmetrische Propellerbelastung (P-Effekt oder P-Faktor)	458
5.1.4	Einfache quantitative Propelleranalyse	459
5.1.5	Propellertheorie	464
5.1.5.1	Blattelementtheorie	464
5.1.5.2	Impulstheorie	469
5.1.6	Propellerauswahl und zugehöriges Leistungsverhalten	471
5.1.6.1	Leistungsverhalten eines Verstellpropeller bei konstanter Drehzahl	472
5.1.6.2	Leistungsverhalten eines Propellers mit festem Blattwinkel	473
5.1.6.3	Windmilling und Umkehrschub	474
5.1.7	Arten von Propellern	475
5.1.7.1	Festpropeller (<i>Fixed-Pitch-Propeller</i>)	476
5.1.7.2	Einstellpropeller	476
5.1.7.3	Verstellpropeller (<i>Variable-Pitch-Propeller</i>)	477
5.1.7.4	<i>Constant-Speed</i> -Propeller für Kolbentriebwerke	480
5.1.8	Turboprop-Propeller	483
5.1.8.1	Arbeitsdrehzahlen	483
5.1.8.2	Alpha- und Beta-Mode	483
5.1.8.3	Negative Torque	484
5.1.9	Synchronisieranlagen	485
5.1.9.1	<i>Synchronizer</i>	485
5.1.9.2	<i>Synchrophaser</i>	486
5.1.10	Propellerwuchtung und Propellerspur	486
5.1.10.1	Statische Wuchtung	486
5.1.10.2	Dynamische Wuchtung	487
5.1.10.3	Aerodynamische Wuchtung	489
5.1.10.4	Überprüfung der Propellerspur	489
5.1.11	Turboprop-Triebwerk	489
5.1.11.1	Optimale Düsenaustrittsgeschwindigkeit	490
5.1.11.2	Betrachtungen zum Turboprop-Kreisprozess	492
	Literatur	497
	Bildquellen	497
5.2	Strahltriebwerke	497
5.2.1	Aufbau und Wirkungsweise von Turbofan-Triebwerken	499
5.2.1.1	Hauptbauteile und Grundbegriffe	499
5.2.1.2	Fan und Nebenstromverhältnis	501
5.2.1.3	Wellenanzahl und Drehrichtung	502
5.2.1.4	Einlauf und Schubdüsen	504
5.2.1.5	Stand der Leistungsfähigkeit	505
5.2.1.6	Positionierung am Flugzeug	506
5.2.1.7	Gondel und Reverser	508
5.2.1.8	Wie viel Schub braucht ein Triebwerk?	513
5.2.2	Triebwerksschub	514
5.2.2.1	Schubgleichung	514