

Markus Dietz

Aerodynamik des Fliegens

Von den Grundlagen
bis zur Flugzeugauslegung

FLASH-
CARDS
INSIDE

MOREMEDIA



Springer Vieweg

Aerodynamik des Fliegens

SPRINGER NATURE

FLASH-
CARDS
INSIDE

SN Flashcards Microlearning

Schnelles und effizientes Lernen mit digitalen Karteikarten – für Arbeit oder Studium!

Diese Möglichkeiten bieten Ihnen die SN Flashcards:

- Jederzeit und überall auf Ihrem Smartphone, Tablet oder Computer **lernen**
- Den Inhalt des Buches lernen und Ihr Wissen **testen**
- Sich durch verschiedene, mit multimedialen Komponenten angereicherte Fragetypen **motivieren lassen** und zwischen drei Lernalgorithmen (Langzeitgedächtnis-, Kurzzeitgedächtnis- oder Prüfungs-Modus) **wählen**
- Ihre eigenen Fragen-Sets **erstellen**, um Ihre Lernerfahrung zu **personalisieren**

So greifen Sie auf Ihre SN Flashcards zu:

1. Gehen Sie auf die **1. Seite des 1. Kapitels** dieses Buches und folgen Sie den Anweisungen in der Box, um sich für einen SN Flashcards-Account anzumelden und auf die Flashcards-Inhalte für dieses Buch zuzugreifen.
2. Laden Sie die SN Flashcards Mobile App aus dem Apple App Store oder Google Play Store herunter, öffnen Sie die App und folgen Sie den Anweisungen in der App.
3. Wählen Sie in der mobilen App oder der Web-App die Lernkarten für dieses Buch aus und beginnen Sie zu lernen!

Sollten Sie Schwierigkeiten haben, auf die SN Flashcards zuzugreifen, schreiben Sie bitte eine E-Mail an customerservice@springernature.com und geben Sie in der Betreffzeile **SN Flashcards** und den Buchtitel an.

Markus Dietz

Aerodynamik des Fliegens

Von den Grundlagen
bis zur Flugzeugauslegung



Springer Vieweg

Markus Dietz
Fakultät für Maschinenbau (HAW)
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-68233-3

ISBN 978-3-662-68234-0 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68234-0>

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

Springer Vieweg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Caroline Strunz

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Für Emma und Noah

Vorwort

Flugzeuge üben auf viele Menschen eine Faszination aus. Selbst wenn man sich wie der Autor bereits länger mit der Fliegerei und insbesondere ihrer Aerodynamik beschäftigt hat, so entlockt einem der Anblick eines startenden Jumbo-Jets, der seine 400 Tonnen Masse scheinbar in Schrittgeschwindigkeit in die Luft erhebt, jedes Mal aufs Neue ein ehrfürchtiges Staunen. Dass „weiche, nachgiebige“ Luft solch enorme Kräfte zu generieren in der Lage ist, wird einem in diesem Moment nachdrücklich vor Augen geführt.

Wie Flugzeuge Auftrieb erzeugen, wie ihre Aerodynamik rechnerisch beschrieben werden kann und wie Flugzeuge ausgelegt werden müssen, um möglichst gute aerodynamische Eigenschaften aufzuweisen – all dies ist Gegenstand dieses Buchs. Die aerodynamische Auslegung von Flugzeugen unterscheidet sich dabei erheblich in Abhängigkeit ihres Einsatzzwecks, wie der rein visuelle Vergleich zwischen Segelflugzeugen, Kleinflugzeugen, Verkehrsflugzeugen und überschallschnellen Kampfflugzeugen zeigt. Warum Flugzeuge so aussehen, wie sie aussehen – diese Frage möchte dieses Buch beantworten.

Das Buch entstand nach fünfjähriger Lehrtätigkeit am Institut für Aeronautical Engineering des Hochschulbereichs der angewandten Wissenschaften an der Universität der Bundeswehr München. Im Rahmen des zugehörigen dualen Studiengangs „Aeronautical Engineering“ erwerben die zukünftigen Pilotinnen und Piloten der Bundeswehr einen Bachelorabschluss in Luftfahrttechnik parallel zu ihrer fliegerischen Ausbildung. Als Professor für Aerodynamik und Thermodynamik übernehme ich die Ausbildung der Studenten in den Grundlagenvorlesungen zur Aerodynamik und Thermodynamik sowie in einer Vertiefungsvorlesung zur aerodynamischen Flugzeugauslegung.

Die Grundidee dieses Werks bestand darin, die relevanten Vorlesungsinhalte zur Aerodynamik von Flugzeugen aus den angebotenen Lehrveranstaltungen in einer umfassenden Arbeit zusammenzufassen. Bei der Recherche stellte sich heraus, dass es ein derartiges Werk zumindest im deutschsprachigen Raum in dieser Form noch nicht gibt.

Das Buch setzt keine aerodynamischen Vorkenntnisse voraus. Es spannt den Bogen von den elementaren Grundlagen der Strömungsmechanik, über die Aerodynamik von Tragflügelprofilen und Tragflügeln bis zur Aerodynamik des Gesamtflugzeugs inklusive Flugzeugauslegungsaspekten. Aus diesem Grund eignet sich das Buch nicht nur für Stu-

denen der Luftfahrttechnik, sondern allgemein für jeden interessierten Leser, der sich schon immer genauer mit der Aerodynamik von Flugzeugen auseinandersetzen wollte.

Vorausgesetzt werden zwar keine Aerodynamikkenntnisse, jedoch sind Kenntnisse in Mathematik und Physik, speziell in der technischen Mechanik, und idealerweise auch in der Thermodynamik zum Verständnis des Buchs sehr empfehlenswert. Auf mathematischer Seite sind die Anforderungen glücklicherweise erträglich – Schulmathematik auf Abiturniveau ist in der Regel ausreichend. Eine Ausnahme stellt das Kapitel zur Potentialtheorie dar, für das Vorkenntnisse in der Vektoranalysis von Vorteil sind. Sind diese nicht vorhanden, kann dieses Kapitel auch übersprungen werden. Die wichtigsten mathematischen und thermodynamischen Grundlagen sind zudem im Anhang kurz zusammengefasst.

Im Vergleich zu spezifischen Hochschulvorlesungen, wie zum Beispiel universitären Flugzeugaerodynamik-Vertiefungsvorlesungen, steigt dieses Buch weniger tief in die Materie ein. Zielsetzung des Buchs ist vielmehr, einen querschnittlichen Überblick über die Materie zu geben und Verknüpfungen herzustellen, z. B. zwischen den strömungsmechanischen Grundlagen und ihrer Anwendung im Entwurf von Tragflügeln und Flugzeugen oder zwischen der Flugzeugaerodynamik und angrenzenden Fachgebieten, speziell der Flugmechanik. Aus diesem Grund enthält das Buch auch einen Grundlagenteil zur Flugmechanik, der allerdings ein Flugmechanikfachbuch weder ersetzen kann noch soll.

Bei der Erstellung des Manuskripts war es mein Ziel, nicht nur die entsprechenden Berechnungsformeln zu präsentieren, sondern – wo immer möglich – den jeweiligen Sachverhalt auch anschaulich zu erklären und Bezüge zur fliegerischen Praxis herzustellen. Aus diesem Grund bin ich der Ansicht, dass sich das Buch durchaus auch für Luftfahrttechnik-Studenten in der Mastervertiefung eignet. Ergänzend zu den Vorlesungsunterlagen der jeweiligen Vertiefungsvorlesungen kann dieses Buch dabei helfen, den Blick „aufs Wesentliche“ nicht zu verlieren und Zusammenhänge zwischen den Fachrichtungen einfacher herzustellen.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den einzelnen Kapiteln wurden stichpunktartig zusammengefasst, wobei in diesem Zusammenhang auf Formeln weitestgehend verzichtet wurde. Am Ende der Kapitel befinden sich Übungsaufgaben, die so gestaltet wurden, dass das vermittelte Wissen angewandt und vertieft wird. Die Musterlösungen zu den Aufgaben sind unter

► <http://www.unibw.de/aero/aerodynamik-des-fliegens>

abrufbar. Eine umfangreiche Sammlung von Verständnisfragen ist online als „Springer Nature-Flashcards“ (digitale Karteikarten) verfügbar.

Bedanken möchte ich mich ganz herzlich bei Dr. Thorsten Lutz vom Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der Universität Stuttgart für die fachlichen Diskussionen zu verschiedenen aerodynamischen Fragestellungen. Für die fachliche Unterstützung bei

flugmechanischen Themen bin ich ebenso meinem Kollegen Prof. Dr. Stephan Myschik sehr verbunden. Weiterer Dank gebührt Prof. Dr. Dieter Scholz von der HAW Hamburg und Dr. Helmut Quabeck. Darüber hinaus habe ich mich über die Unterstützung all meiner Kollegen am Institut sowie meiner Ansprechpartnerinnen vom Springer-Verlag sehr gefreut. Hier möchte ich mich besonders für das entgegengebrachte Vertrauen sowie die Geduld bei der Manuskripterstellung bedanken.

Juni 2023

Markus Dietz

Abkürzungsverzeichnis

Akronyme

CAS	Calibrated Airspeed
CFD	Computational Fluid Dynamics
CG	Schwerpunkt (Center of gravity)
CS	Certification Specifications
DGL	Differentialgleichung
DNS	Direkte Numerische Simulation
EAS	Equivalent Airspeed
EFIS	Electronic Flight Instrument System
ETOPS	Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards
ETW	Europäischer Transsonischer Windkanal
FAR	Federal Aviation Regulations
IAS	Indicated Airspeed
ICAO	International Civil Aviation Organisation
IFR	Instrument Flight Rules
ISA	International Standard Atmosphere
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
LERX	Leading Edge Root Extension
LES	Large Eddy Simulation
MAC	Mean Aerodynamic Chord
MCAS	Maneuvering Characteristics Augmentation System
MSL	Mean Sea Level
MTOW	Maximales Abfluggewicht (Maximum take-off weight)
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NFAC	National Full Scale Aerodynamics Complex
OAT	Outside Air Temperature
PIV	Particle Image Velocimetry
QFE	lokaler Luftdruck am Flugplatz

QNH	auf Meereshöhe reduzierter Luftdruck, basierend auf der Standardatmosphäre
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
ROC	Steigrate (Rate of climb)
ROD	Sinkrate (Rate of descent)
Scramjet	Supersonic Combustion Ramjet
SM	Stabilitätsmaß (Stability margin)
STOL	Short Take-Off and Landing
TAS	True Airspeed
TS	Tollmien-Schlichting
VFR	Visual Flight Rules
VTOL	Vertical Take-Off and Landing

Griechische Formelzeichen

α	Anstellwinkel [°, rad]
α_0	Nullauftriebswinkel [°, rad]
α_{abs}	absoluter Anstellwinkel [°, rad]
α_{dw}	Abwindwinkel des Hauptflügels auf das Höhenleitwerk [°, rad]
α_e	effektiver Anstellwinkel [°, rad]
α_g	geometrischer Anstellwinkel [°, rad]
α_i	induzierter Anstellwinkel [°, rad]
α_t	Anstellwinkel des Höhenleitwerks [°, rad]
β	Schiebewinkel [°, rad]
Γ	Zirkulation [m ² /s]
γ	Bahnneigungswinkel, Flight path angle [°, rad]
γ	Pfeilungswinkel, gemessen von der Anströmrichtung [°, rad]
γ	Scherwinkel [°, rad]
γ	normierte Koordinate bei Kegelsymmetrie [–]
γ	verteilte Wirbelstärke [m/s]
$\dot{\gamma}$	Scherwinkelgeschwindigkeit [1/s]
δ	Grenzschichtdicke [m]
δ	Verhältnis des statischen Drucks zum Druck auf MSL [–]
δ	relative Profildicke [–]
δ_1	Verdrängungsdicke [m]
δ_2	Impulsverlustdicke [m]
δ_3	Energieverlustdicke [m]
ϵ	Einstellwinkel [°, rad]
ϵ	Gleitverhältnis [–]
ϵ_t	Einbauwinkel des Höhenleitwerks relativ zu dessen Nullauftriebsrichtung [°, rad]
ϵ_t^*	Einbauwinkel des Höhenleitwerks relativ zu dessen effektiver Nullauftriebsrichtung bei Klappenausschlag [°, rad]

ζ	Seitenruderausschlag [°, rad]
ζ	normierte Koordinate bei Kegelsymmetrie [–]
η	Flächenanteil der Randbereiche am Rechteckflügel [–]
η	Gesamtwirkungsgrad [–]
η	Höhenruderausschlag [°, rad]
η	dimensionslose Spannweitenkoordinate [–]
η	dimensionsloser Wandabstand [–]
η	dynamische Viskosität [N s/m ²]
θ	Nickwinkel, Pitch angle [°, rad]
ϑ	Umlenkwinkel [°, rad]
κ	Isentropenexponent [–]
Λ	Streckung [–]
λ	Zuspitzung [–]
λ	mittlere freie Weglänge [m]
μ	Dipolmoment [m ³ /s]
μ	Machwinkel [°, rad]
ν	Prandtl-Meyer-Funktion [°, rad]
ν	V-Stellung [°, rad]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
ξ	Querruderausschlag [°, rad]
ρ	Dichte [kg/m ³]
σ	Stoßwinkel [°, rad]
$\bar{\sigma}$	Viskoser Spannungstensor [Pa]
τ	Schubspannung [Pa]
ϕ	Potentialfunktion [m ² /s]
ϕ	Rollwinkel, Bank angle [°, rad]
$\hat{\phi}$	Störpotential [m ² /s]
φ	Pfeilung [°, rad]
φ	Polarwinkel (Polarkoordinaten) [°, rad]
χ	Bahnazimut, Track angle [°, rad]
ψ	Gierwinkel, Heading [°, rad]
ψ	Stromfunktion [m ² /s]
$\Omega, \bar{\Omega}$	Wirbelstärke [1/s]
$\omega, \vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit [1/s]

Lateinische Formelzeichen

A	Fläche [m]
a	Schallgeschwindigkeit [m/s]
a	Temperaturgradient in der Troposphäre [K/m]
A, \vec{A}	Auftrieb [N]

A_t	Auftrieb des Höhenleitwerks [N]
A_{wb}	Auftrieb der Flügel-Rumpf-Kombination [N]
b	Spannweite [m]
c_A	Auftriebsbeiwert des dreidimensionalen Problems [–]
c_a	Auftriebsbeiwert des zweidimensionalen Problems [–]
c_f	Schubspannungsbeiwert [–]
c_L	Rollmomentenbeiwert [–]
c_M	Nickmomentenbeiwert des dreidimensionalen Problems [–]
c_m	Nickmomentenbeiwert des zweidimensionalen Problems [–]
c_N	Giermomentenbeiwert [–]
c_p	Druckbeiwert [–]
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [J/(kg K)]
c_Q	Querkraftbeiwert [–]
c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen [J/(kg K)]
c_W	Widerstandsbeiwert des dreidimensionalen Problems [–]
c_w	Widerstandsbeiwert des zweidimensionalen Problems [–]
$c_{A,t}$	Auftriebsbeiwert des Höhenleitwerks [–]
$c_{A,wb}$	Auftriebsbeiwert der Flügel-Rumpf-Kombination [–]
$c_{A\alpha,t}$	Auftriebsgradient des Höhenleitwerks [–]
$c_{A\alpha,wb}$	Auftriebsgradient der Flügel-Rumpf-Kombination [–]
$c_{A\alpha}$	Auftriebsgradient des dreidimensionalen Problems [–]
$c_{a\alpha}$	Auftriebsgradient des zweidimensionalen Problems [–]
$c_{f,j}$	spezifischer Treibstoffverbrauch bei Strahlantrieb [kg/(N s)]
$c_{f,p}$	spezifischer Treibstoffverbrauch bei Propellerantrieb [kg/(W s)]
$c_{L\beta}$	Schiebewinkel-Rollmomenten-Derivativ [–]
$c_{L\xi}$	Querruder-Rollmomenten-Derivativ [–]
$c_{L\zeta}$	Seitenruder-Rollmomenten-Derivativ [–]
c_{Lp}	Rollrate-Rollmomenten-Derivativ [s]
c_{Lr}	Gierrate-Rollmomenten-Derivativ [s]
$c_{M0,wb}$	Nullmomentenbeiwert der Flügel-Rumpf-Kombination [–]
c_{M0}	Nullmomentenbeiwert des dreidimensionalen Problems [–]
c_{m0}	Nullmomentenbeiwert des zweidimensionalen Problems [–]
$c_{M\alpha}$	Anstellwinkel-Nickmomenten-Derivativ, Momentengradient [–]
$c_{m\alpha}$	Momentengradient des zweidimensionalen Problems [–]
c_{Mq}	Nickrate-Nickmomenten-Derivativ [s]
$c_{N\beta}$	Schiebewinkel-Giermomenten-Derivativ [–]
$c_{N\zeta}$	Seitenruder-Giermomenten-Derivativ [–]
c_{Np}	Rollrate-Giermomenten-Derivativ [s]
c_{Nr}	Gierrate-Giermomenten-Derivativ [s]
$c_{W,i}$	Beiwert des induzierten Widerstands [–]
$c_{W,t}$	Widerstandsbeiwert des Höhenleitwerks [–]
$c_{W,wb}$	Widerstandsbeiwert der Flügel-Rumpf-Kombination [–]

c_{w0}	Nullwiderstandsbeiwert des dreidimensionalen Problems [–]
c_{w0}	Nullwiderstandsbeiwert des zweidimensionalen Problems [–]
d	Dämpferkonstante [N s/m]
d	Profildicke [m]
E	Flugdauer [s]
E	Gleitzahl [–]
e	Oswald-Faktor des Gesamtflugzeugs [–]
e	spezifische innere Energie [J/kg]
f	Kraft pro Einheitsmasse [m/s ²]
f	Profilwölbung [m]
F, \vec{F}	Kraft [N]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²]
G, \vec{G}	Gewichtskraft [N]
G_0	Startgewicht [N]
G_f	Treibstoffgewicht [N]
h	Höhe [m]
h	spezifische Enthalpie [J/kg]
I, \vec{I}	Impuls [N s]
K	Kompressibilität [m ² /N]
k	Federkonstante [N/m]
k	k -Faktor der Gesamtflugzeugpolaren [–]
k^*	k -Faktor der Prandtl'schen Traglinientheorie [–]
Kn	Knudsen-Zahl [–]
L	Rollmoment [Nm]
La	Lavalzahl [–]
M	Molare Masse [kg/kmol]
M	Nickmoment [Nm]
m	Aerodynamische Schlankheit des Tragflügels [–]
m	Masse [kg]
M, \vec{M}	Drehmoment [Nm]
M_0	Nullmoment [Nm]
$M_{0,t}$	Nullmoment des Höhenleitwerks [Nm]
$M_{0,wb}$	Nullmoment der Flügel-Rumpf-Kombination [Nm]
Ma	Machzahl [–]
Ma_{MO}	Maximale operationelle Flugmachzahl [–]
N	Giermoment [Nm]
\vec{n}	Normaleneinheitsvektor [m]
n, \vec{n}	Lastfaktor [–]
n_{lim}	Lastfaktor, bei dem die sichere Last erreicht wird [–]
n_{ult}	Lastfaktor, bei dem die Bruchlast erreicht wird [–]
P	Leistung [W]
p	Rollrate [1/s]

p	statischer Druck [Pa]
P, \vec{P}	Last auf ein Massenelement [N]
P_A	verfügbare Leistung (Power available) [W]
P_R	erforderliche Leistung (Power required) [W]
Q	Quellstärke [m^2/s]
Q	Querkraft [N]
q	Nickrate [$1/\text{s}$]
q	Staudruck $q = (\rho/2) \cdot V^2$ [Pa]
q	spezifische Wärme [J/kg]
q	verteilte Quellstärke [m/s]
R	Radius [m]
R	Reichweite [m]
R	Spezifische Gaskonstante [J/(kg K)]
r	Gierrate [$1/\text{s}$]
r	radiale Koordinate (Polarkoordinaten) [m]
\vec{r}	Ortsvektor [m]
R, \vec{R}	Luftkraftresultierende [N]
Re	Reynoldszahl [–]
ROC	Steigrate (Rate of climb) [m/s]
ROD	Sinkrate (Rate of descent) [m/s]
S	Flügelfläche, Bezugsfläche [m^2]
s	Halbspannweite [m]
s	Weg [m]
s	spezifische Entropie [J/(kg K)]
T	Temperatur [K]
T	Triebwerksschub [N]
t	$\tan \gamma / \tan \mu$ bei Kegelsymmetrie [–]
t	Profiltiefe, lokale Flügeltiefe [m]
t	Zeit [s]
T_A	verfügbarer Schub (Thrust available) [N]
t_a	Flügeltiefe an der Spitze [m]
t_i	Flügeltiefe an der Wurzel [m]
t_m	mittlere Flügeltiefe [m]
T_R	erforderlicher Schub (Thrust required) [N]
t_μ	Bezugsflügeltiefe [m]
u	Geschwindigkeitskomponente in x -Richtung [m/s]
u	Normalgeschwindigkeit [m/s]
\hat{u}	Störgeschwindigkeit in x -Richtung [m/s]
u_τ	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
u_r	Geschwindigkeit in radialer Richtung [m/s]
u_φ	Geschwindigkeit in Umfangsrichtung [m/s]
V	Volumen [m^3]

v	Geschwindigkeitskomponente in y -Richtung [m/s]
v	Tangentialgeschwindigkeit [m/s]
v	spezifisches Volumen [m ³ /kg]
\hat{v}	Störgeschwindigkeit in y -Richtung [m/s]
V, \vec{V}	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
V_t^*	normiertes Höhenleitwerksvolumen inkl. Staudruckverlust [–]
v_{gust}	Geschwindigkeit der Vertikalbö [m/s]
V_{MO}	Maximale operationelle Fluggeschwindigkeit, Maximum operating limit speed [m/s]
V_A	Manövergeschwindigkeit [m/s]
V_D	Auslegungsgeschwindigkeit (höchste Geschwindigkeit im Rahmen der Flugerprobung, Dive Speed) [m/s]
V_H	Horizontalgeschwindigkeit [m/s]
V_H	Maximalgeschwindigkeit im Horizontalflug bei maximaler Dauerleistung des Triebwerks [m/s]
v_i	induzierte Geschwindigkeit [m/s]
V_L	Landegeschwindigkeit [m/s]
V_S	Überziehggeschwindigkeit, Stall speed [m/s]
V_t	normiertes Höhenleitwerksvolumen [–]
V_V	Vertikalgeschwindigkeit [m/s]
V_{vt}	normiertes Seitenleitwerksvolumen [–]
w	Geschwindigkeitskomponente in z -Richtung [m/s]
w	spezifische Arbeit [J/kg]
W, \vec{W}	Widerstand [N]
W_t	Widerstand des Höhenleitwerks [N]
W_{wb}	Widerstand der Flügel-Rumpf-Kombination [N]
x	x -Richtung, x -Koordinate [m]
x_D	Druckpunktlage [m]
x_d	Dickenrücklage [m]
x_f	Wölbungsrücklage [m]
x_N	Neutralpunktlage [m]
x_μ	Position der Flügelvorderkante des flächengleichen Rechteckflügels [m]
x_{N25}	geometrische Neutralpunktlage [m]
y	y -Richtung, y -Koordinate [m]
y_S	spannweitiger Auftriebsmittelpunkt [m]
z	z -Richtung, z -Koordinate [m]
z_ρ	Dichtehöhe [m]
z_p	Druckhöhe [m]

Lateinische Tiefstellungen

0	Ausgangskonfiguration
0	Referenzwert, Referenzzustand
0	Totalzustand
0	Zustand auf Meereshöhe
0	auftriebsfreier Zustand, $c_a = 0$, $c_A = 0$
1	Zustand 1, Zustand vor dem Stoß
2	Zustand 2, Zustand nach dem Stoß
A	Fläche
A	aerodynamisches Koordinatensystem
A	verfügbar (available)
a	außen
abs	absolut
B	körperfestes Koordinatensystem
BA0	Erste Birnbaum-Ackermann'sche Normalverteilung
BA1	Zweite Birnbaum-Ackermann'sche Normalverteilung
BA2	Dritte Birnbaum-Ackermann'sche Normalverteilung
CAS	Calibrated Airspeed
CG	Schwerpunkt
cl	keine Hochauftriebshilfe (clean)
CR	Reiseflug (cruise)
D	Druckpunkt
DD	Drag-Divergence, Widerstandsanstieg
dyn	dynamisch (z. B. dynamischer Druck)
e	effektiv
EAS	Equivalent Airspeed
elev	Elevation
ell	elliptisch
eng	Triebwerk (engine)
F	Fluid
f	Reibung
f	Treibstoff (fuel)
flap	Hochauftriebshilfe (flap)
G	Gewicht
G	Göthert-Regel
g	geometrisch
ges	Gesamt
H	horizontal
i	induziert
i	innen
IAS	Indicated Airspeed

ik	inkompressibel
irrev	irreversibel (reibungsbefahet)
j	Strahlantrieb (jet)
K	Bahnachsensystem
K	Körper
k	kompressibel
korr	korrigiert
krit	kritisch
L	Landung
l	Längsschnitt
LE	Vorderkante (leading edge)
Level	Horizontalflug
max	Maximum
mess	gemessen
MSL	Mean Sea Level, Meeresspiegel
N	Neutralpunkt
<i>n</i>	Normalschnitt
O	erdlotfestes Koordinatensystem
o	oben
<i>p</i>	Druck
p	Propeller
PG	Prandtl-Glauert-Regel
R	erforderlich (required)
<i>r</i>	radial
rev	reversibel
S	Kurvenzug
s	Skelettlinie
SP	Staupunkt
SSL	Staustromlinie
t	Höhenleitwerk (tail)
t	Profiltropfen
<i>t</i>	tangential
<i>t/4</i>	<i>t/4</i> -Linie
TAS	True Airspeed
TE	Hinterkante (trailing edge)
TO	Start (take-off)
u	Unterdruck
u	unten
ue	Überdruck
V	vertikal
vt	Seitenleitwerk (vertical tail)
w	Tragflügel (wing)

w	Wand
w	Wind
wb	Flügel-Rumpf-Kombination (wing-body)

Weitere Indizierungen

*	kritische Größe
+	dimensionslose Größe in der turbulenten Grenzschicht
'	turbulente Schwankungsgröße, spannweitige Streckenlast
∞	Fernfeldzustand, Umgebungszustand
μ	Bezugsgröße, z. B. Bezugsflügeltiefe
99	Grenzschichtrand

Links zu den Lizenzmodellen¹

FAL Free Art License 1.3	http://artlibre.org/licence/lal/en/
CC BY 2.0	http://creativecommons.org/licenses/by/2.0
CC BY 3.0	http://creativecommons.org/licenses/by/3.0
CC BY 4.0	http://creativecommons.org/licenses/by/4.0
CC BY-SA 2.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0
CC BY-SA 2.0 DE	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de
CC BY-SA 2.5	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5
CC BY-SA 3.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0
CC BY-SA 3.0 DE	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de
CC BY-SA 4.0	http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0

¹ Sofern nicht anders angegeben, werden modifizierte CC BY- und CC BY-SA-Abbildungen unter ihrer Ausgangslizenz weitergegeben.

Inhaltsverzeichnis

Teil I Grundlagen der Strömungsmechanik

1	Physikalische Eigenschaften von Fluiden	3
1.1	Der Begriff des Fluids	3
1.2	Kontinuumsströmung	4
1.3	Reibungsbehaftete Fluide und Viskosität	5
1.4	Luft	7
	Übungsaufgaben	8
2	Hydro- und Aerostatik	9
2.1	Druck	9
2.2	Hydrostatische Druckverteilung	12
2.2.1	Das Euler'sche Gesetz der Hydrostatik	12
2.2.2	Lösung für ein inkompressibles Fluid im Schwerfeld	14
2.2.3	Hydrostatisches Paradoxon	15
2.3	Hydrostatischer Auftrieb	16
	Übungsaufgaben	17
3	Strömungsmechanische Erhaltungssätze	21
3.1	Die Beschreibung der Strömung	21
3.1.1	Betrachtungsweisen	22
3.1.2	Substantielle, lokale und konvektive Ableitung	22
3.1.3	Stromlinien, Bahnlinien, Streichlinien und Zeitlinien	25
3.1.4	Differentielle und integrale Darstellung	27
3.2	Kontinuitätsgleichung	27
3.2.1	Kontinuitätsgleichung in differentieller Form	28
3.2.2	Kontinuitätsgleichung in integraler Form	30
3.2.3	Kontinuitätsgleichung für die Stromröhre	31
3.3	Impulsgleichung	32
3.3.1	Impulsgleichung in integraler Form	32
3.3.2	Anwendung des Impulssatzes	36

3.4	Energiegleichung	39
	Übungsaufgaben	40
4	Grundlagen inkompressibler Strömungen	43
4.1	Gleichung von Bernoulli	43
4.1.1	Herleitung aus der Energiegleichung	44
4.1.2	Herleitung aus der Impulsgleichung	45
4.1.3	Interpretation der Gleichung von Bernoulli	48
4.1.4	Druckbeiwert und Staupunkt	49
4.1.5	Anwendungsbeispiele	52
4.2	Reibungseinfluss	54
4.3	Aerodynamische Lasten	56
4.3.1	Auftrieb, Widerstand und Nickmoment	57
4.3.2	Aerodynamische Beiwerte	59
4.4	Ähnlichkeitszahlen der Strömungsmechanik	61
4.4.1	Machzahl	62
4.4.2	Reynoldszahl	64
	Übungsaufgaben	66
5	Potentialtheorie und die Entstehung von Auftrieb	67
5.1	Grundlagen	68
5.1.1	Drehungsfreie und drehungsbehaftete Strömungen	68
5.1.2	Zirkulation	71
5.1.3	Stromfunktion	72
5.1.4	Potentialfunktion	74
5.2	Laplace-Gleichung	76
5.2.1	Eigenschaften der Laplace-Gleichung	78
5.2.2	Randbedingungen der Laplace-Gleichung	78
5.3	Elementarströmungen	81
5.3.1	Translationsströmung	81
5.3.2	Quelle und Senke	82
5.3.3	Dipol	83
5.3.4	Potentialwirbel	85
5.4	Überlagerung von Elementarströmungen	87
5.5	Die Entstehung von Auftrieb	90
5.6	Singularitätenmethode	100
5.6.1	Quell-Panelverfahren	101
5.6.2	Wirbel-Panelverfahren	102
	Übungsaufgaben	103

6	Grenzschicht und Strömungsablösung	105
6.1	Grundlagen	105
6.2	Grenzschicht	107
6.2.1	Grenzschichtparameter	107
6.2.2	Laminare und turbulente Grenzschicht	110
6.2.3	Grenzschichtberechnung	112
6.2.4	Grenzschicht der ebenen Platte	116
6.3	Transition und Instabilitätsmechanismen	117
6.3.1	Einflussfaktoren auf den laminar-turbulenten Umschlag	117
6.3.2	Instabilitätsmechanismen	118
6.4	Strömungsablösung	121
6.4.1	Ursachen und Folgen der Strömungsablösung	121
6.4.2	Ablösung an der umströmten Kugel	125
	Übungsaufgaben	128
7	Aerodynamik der kompressiblen Strömung	131
7.1	Geschwindigkeitsbereiche	132
7.1.1	Unterschallströmung	132
7.1.2	Transschallströmung	132
7.1.3	Überschallströmung	133
7.2	Kompressibilität	133
7.3	Schallgeschwindigkeit	135
7.4	Schallausbreitung und Mach'scher Winkel	139
7.5	Die isentrope Strömung	141
7.6	Kritische Größen und Lavalzahl	148
7.7	Druckbeiwert	151
	Übungsaufgaben	152
8	Aerodynamik der Überschallströmung	155
8.1	Einleitung	155
8.2	Der senkrechte Verdichtungsstoß	156
8.3	Schräge Verdichtungsstöße	163
8.4	Expansions- und Kompressionswellen	171
8.5	Stoß-Expansions-Theorie	178
8.6	Linearisierte Behandlung	181
	Übungsaufgaben	186

Teil II Die Aerodynamik von Profilen

9	Grundlagen	191
9.1	Der Begriff des Tragflügelprofils	191
9.2	Profilgeometrie und Nomenklatur	192

9.3	Bedeutende Profilserien	194
9.3.1	NACA-Profile	194
9.3.2	Weitere Profilserien	197
10	Profilaerodynamik bei inkompressibler Strömung	199
10.1	Kutta'sche Abflussbedingung und Anfahrwirbel	199
10.2	Kräfte, Momente und Beiwerte	203
10.3	Druckverteilung	205
10.4	Druckpunkt und Neutralpunkt	208
10.5	Profilpolare	213
10.5.1	Aufgelöste Auftriebspolare	214
10.5.2	Aufgelöste Widerstandspolare	217
10.5.3	Aufgelöste Nickmomentenpolare	218
10.5.4	Lilienthalpolare	219
10.6	Maximalauftrieb und Strömungsablösung	222
10.7	Geometrische und aerodynamische Einflussgrößen	224
10.7.1	Profilwölbung	224
10.7.2	Profildicke	225
10.7.3	Dickenrücklage	226
10.7.4	Einfluss der Reynoldszahl	228
10.7.5	Klappenausschlag	231
10.8	Statische Längsstabilität	234
10.9	Profilberechnung	239
10.9.1	Entwurfs- und Nachrechenaufgabe	239
10.9.2	Grundlagen der Tropfen- und Skeletttheorie	239
10.9.3	Tropfentheorie	241
10.9.4	Skeletttheorie	241
	Übungsaufgaben	247
11	Profilaerodynamik bei kompressibler Strömung	249
11.1	Profilaerodynamik bei kompressibler Unterschallströmung	249
11.1.1	Linearisierte Potentialgleichung	250
11.1.2	Die Göthert-Ähnlichkeitsregel	252
11.1.3	Die Prandtl-Glauert-Ähnlichkeitsregel	255
11.2	Profilaerodynamik bei Transschallströmung	259
11.2.1	Kritische Machzahl	259
11.2.2	Machzahl des Widerstandsanstiegs und Schalldurchgang	264
11.2.3	Transsonik-Profile	268
	Übungsaufgaben	273

12	Profilaerodynamik bei Überschallströmung	275
12.1	Einleitung	275
12.2	Linearisierte Potentialgleichung	276
12.3	Die Prandtl-Glauert-Ackeret'sche Regel	278
12.4	Profiltheorie im Überschall	282
12.4.1	Auftriebsbeiwert und Auftriebsgradient	284
12.4.2	Momentenbeiwert und Neutralpunkt	286
12.4.3	Wellenwiderstand	288
	Übungsaufgaben	296

Teil III Die Aerodynamik des Tragflügels

13	Grundlagen	299
13.1	Vom Profil zum Tragflügel	299
13.2	Tragflügelgeometrie und Nomenklatur	300
13.3	Geometrischer Neutralpunkt und Bezugsflügelteufe	304
	Übungsaufgaben	312
14	Tragflügelaerodynamik bei inkompressibler Strömung	313
14.1	Induzierter Widerstand	313
14.2	Gesamtwiderstand und Beiwerte des Tragflügels	317
14.3	Wirbellinie und Biot-Savart'sches Gesetz	319
14.4	Prandtl'sche Traglinientheorie	321
14.5	Ergebnisse aus der Prandtl'schen Traglinientheorie	327
14.5.1	Elliptische Zirkulationsverteilung	327
14.5.2	Auftriebsgradient des Tragflügels	332
14.5.3	Beliebige Zirkulationsverteilungen	334
14.6	Erweiterte Traglinientheorie	343
14.6.1	Konzept	343
14.6.2	Anwendung auf den Pfeilflügel	346
14.6.3	Auftriebsgradient des Tragflügels	349
14.7	Wirbelleiterverfahren	350
14.8	Tragflügel mit geringer Streckung	352
14.8.1	Auftriebsanstieg und Zirkulationsverteilung	353
14.8.2	Einfluss des Flügelgrundrisses	353
	Übungsaufgaben	356
15	Tragflügelaerodynamik bei kompressibler Strömung	359
15.1	Tragflügelaerodynamik bei kompressibler Unterschallströmung	359
15.1.1	Die Prandtl-Glauert-Ackeret'sche Regel	360
15.1.2	Neutralpunktwanderung	365
15.1.3	Tragflügel mit geringer Streckung	369

15.2	Flügel­peilung und Transschallströmung	370
15.2.1	Schiebender und gescherter Pfeil­flügel	373
15.2.2	Unabhängigkeitsprinzip	375
15.2.3	Druckbeiwert	378
15.2.4	Auftriebsbeiwert und Auftriebsgradient	379
15.2.5	Kritischer Druckbeiwert und kritische Machzahl	383
15.2.6	Einfluss der Flügel­peilung auf den Widerstandsbeiwert	389
15.2.7	Pfeil­flügel endlicher Streckung	392
	Übungsaufgaben	394
16	Trag­flügel­aerodynamik bei Überschallströmung	397
16.1	Einführung	397
16.2	Über- und Unterschallkanten	398
16.3	Die Prandtl-Glauert-Ackeret'sche Regel	402
16.4	Die kegelsymmetrische Strömung	405
16.5	Flügel unendlicher Streckung	409
16.5.1	Ungepeilter Trag­flügel	409
16.5.2	Pfeil­flügel unendlicher Streckung	410
16.6	Rechteck­flügel	417
16.6.1	Auftriebsbeiwert und Auftriebsgradient	418
16.6.2	Beiwert des auftriebsabhängigen Widerstands	420
16.6.3	Neutralpunkt und Neutralpunktwanderung	422
16.7	Delta­flügel	424
16.7.1	Auftriebsbeiwert und Auftriebsgradient	425
16.7.2	Beiwert des auftriebsabhängigen Widerstands	428
16.7.3	Neutralpunkt und Neutralpunktwanderung	434
	Übungsaufgaben	436
17	Nichtlineare Aerodynamik des Delta- und Strake­flügels	439
17.1	Einführung	439
17.2	Flügel­geometrien	440
17.3	Vortex lift	441
17.4	Strömungsabriss	445
17.5	Strake­flügel und Doppeldelta­flügel	446
Teil IV Flugmechanik, Flugleistung und Einsatzgrenzen		
18	Grundlagen der Flugmechanik	451
18.1	Einführung	451
18.2	Koordinatensysteme in der Flugmechanik	452

18.3	Weitere flugmechanische Definitionen	462
18.3.1	Aerodynamische Kräfte und Momente	462
18.3.2	Drehraten und Winkelbeschleunigungen	464
18.3.3	Steuerelemente	466
18.3.4	Längs- und Seitenbewegung	469
18.3.5	Derivativa	470
18.4	Die Beschreibung der Erdatmosphäre	472
18.4.1	Aerostatische Grundgleichung	473
18.4.2	Atmosphärische Schichtung	474
18.4.3	Standardatmosphäre	476
18.4.4	Druck- und Dichtehöhe	478
18.5	Fluggeschwindigkeiten und Fahrtmessung	484
18.5.1	Messsonden	485
18.5.2	Fluggeschwindigkeiten	488
18.5.3	Fahrtmessung im Überschall	499
	Übungsaufgaben	503
19	Längs- und Seitenbewegung des Flugzeugs	505
19.1	Stabilität und Steuerbarkeit der Längsbewegung	505
19.1.1	Statische und dynamische Stabilität	505
19.1.2	Eigenformen der Längsbewegung	510
19.1.3	Neutralpunkt und Stabilität	514
19.1.4	Trimmung der Längsbewegung	527
19.1.5	Stabilitäts- und Steuerbarkeitsgrenze	535
19.2	Seitenbewegung des Flugzeugs	538
19.2.1	Eigenformen der Seitenbewegung	538
19.2.2	Derivativa des Rollmoments	542
19.2.3	Derivativa des Giermoments	546
	Übungsaufgaben	550
20	Flugleistungen	551
20.1	Polare des Gesamtflugzeugs	552
20.2	Besondere Punkte auf der Polaren	555
20.2.1	Punkt des besten Gleitens	555
20.2.2	Punkt des geringsten Sinkens	556
20.2.3	Punkt der besten Reichweite eines Strahlflugzeugs	558
20.3	Antriebscharakteristika	558
20.3.1	Propellerantrieb	559
20.3.2	Strahlantrieb	561
20.4	Stationärer Horizontalflug	562
20.4.1	Erforderlicher Schub	564
20.4.2	Fluggeschwindigkeit bei gegebenem Schub	565

20.4.3	Leistungskurve und Maximalgeschwindigkeit	567
20.4.4	Minimaler Leistungsbedarf	568
20.4.5	Einfluss der Flughöhe	569
20.5	Steigflug	571
20.5.1	Bester Steigwinkel	576
20.5.2	Beste Steiggeschwindigkeit	577
20.5.3	Maximale Flughöhe und Dienstgipfelhöhe	578
20.6	Gleitflug	579
20.6.1	Geschwindigkeitspolare	584
20.7	Reichweite	587
20.8	Flugdauer	593
20.9	Zusammenfassung	596
	Übungsaufgaben	598
21	Flugbereichsgrenzen	601
21.1	Das Lastvielfache	602
21.2	Kurvenflug	607
21.3	V-N-Diagramm	613
21.4	Aerodynamische Grenzen	619
21.4.1	Stall und Deep Stall	619
21.4.2	Buffet	622
21.4.3	Mach Tuck	625
21.5	Aeroelastische Grenzen	626
21.5.1	Statische Aeroelastik	627
21.5.2	Dynamische Aeroelastik	630
	Übungsaufgaben	632
Teil V Aerodynamische Auslegung des Flugzeugs		
22	Einführung in den Flugzeugentwurf	637
22.1	Flugzeugkonfigurationen	637
22.1.1	Drachenkonfiguration	639
22.1.2	Entenkonfiguration	640
22.1.3	Unkonventionelle Konfigurationen	645
22.2	Phasen des Entwurfsprozesses	648
22.3	Konzeptentwurfsphase	649
22.3.1	Anforderungen	650
22.3.2	Performance-Parameter	651
22.4	Vorentwurf	659
22.4.1	Numerische Strömungssimulation	659
22.4.2	Windkanalversuch	662

23	Auslegung des Tragflügels	671
23.1	Anforderungen an den Tragflügel	671
23.2	Tragflügelkonfigurationen	672
23.3	Flügelfläche	674
23.4	Auslegungsparameter des Tragflügels	675
23.4.1	Positionierung relativ zum Rumpf	675
23.4.2	Flügelstreckung	678
23.4.3	Flügelpfeilung	682
23.4.4	Zuspitzung	687
23.4.5	Flügelschränkung	689
23.4.6	V-Stellung	691
23.4.7	Einbauwinkel	693
23.4.8	Profilauswahl	695
23.4.9	Gestaltung der Flügelspitze	696
23.4.10	Maßnahmen zur Strömungsbeeinflussung	699
24	Aerodynamik des Hochauftriebssystems	703
24.1	Grundlagen	703
24.2	Funktionsweise	704
24.2.1	Hinterkantenklappen	706
24.2.2	Vorderkantenklappen	707
24.2.3	Kombination aus Vorder- und Hinterkantenklappen	708
24.3	Konstruktive Umsetzung	709
24.3.1	Landeklappensysteme	709
24.3.2	Die Fowlerklappe	711
24.3.3	Integration in den Tragflügel	712
	Übungsaufgaben	715
25	Leitwerksaerodynamik	717
25.1	Aufgaben der Leitwerke	717
25.2	Leitwerkskonfigurationen	718
25.3	Aufbau des Leitwerks	721
25.4	Auslegungsrichtlinien für das Höhenleitwerk	723
25.5	Auslegungsrichtlinien für das Seitenleitwerk	725
26	Aerodynamik des Gesamtflugzeugs	729
26.1	Gesamtwiderstand	729
26.2	Transsonische Flächenregel	734
26.3	Flächenregel im Überschall	736
26.4	Spezielle Auslegungsaspekte für Verkehrsflugzeuge	739
26.4.1	Verkehrsflugzeugkonfigurationen	739
26.4.2	Der Tragflügel des Verkehrsflugzeugs	745

26.5	Spezielle Auslegungsaspekte für Kampfflugzeuge	749
26.5.1	Kampfflugzeugkonfigurationen	751
26.5.2	Der Tragflügel des Kampfflugzeugs	756
A	Thermodynamische Grundlagen	759
B	Mathematische Grundlagen	767
C	Diagramme und Tabellen	775
	Literatur	783
	Stichwortverzeichnis	787

Teil I
Grundlagen der Strömungsmechanik