

**F. Dubs**  
**Aerodynamik der reinen Unterschallströmung**

## Flugtechnische Reihe, Band 1

# Aerodynamik

der reinen Unterschallströmung

F. Dubs  
Flugingenieur, Zürich

Vierte, neubearbeitete Auflage



Springer Basel AG

1954 1. Auflage  
1966 2., neubearbeitete Auflage  
1975 3. Auflage  
(unveränderter Nachdruck der 2. Auflage)  
1979 4., neubearbeitete Auflage

Die vorliegende Publikation ist urheberrechtlich geschützt.  
Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikrofilm oder andere Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere Datenverarbeitungsanlagen, verwendbare Sprache übertragen werden.

CIP-Kurztitelaufnahme  
der Deutschen Bibliothek  
**Dubs, Fritz:**

Aerodynamik der reinen Unterschallströmung/  
F. Dubs. – 4., neubearb. Aufl. – Basel, Boston,  
Stuttgart: Birkhäuser, 1979.  
(Flugtechnische Reihe; Bd. 1)

ISBN 978-3-0348-5296-8

ISBN 978-3-0348-5295-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-0348-5295-1

© Springer Basel AG, 1954, 1966, 1975, 1979  
Ursprünglich erschienen bei Birkhäuser Verlag Basel 1979.  
Softcover reprint of the hardcover 4th edition 1979

Prof. Dr. J. Ackeret gewidmet

## Zum Geleit

Je besser die in der Luftfahrt Tätigen und Verantwortlichen die Grundlagen des Flugwesens und der Flugtechnik kennen, desto zuverlässiger, sicherer und auch umweltfreundlicher können sie die Luftfahrt betreiben. Das vorliegende Buch leistet einen Beitrag zu diesem Wissen. Es unterstützt dadurch die Bestrebungen meines Departements und der Eidg. Flugunfall-Untersuchungskommission (deren langjähriges Mitglied der Verfasser ist). Ich hoffe, dass auch die vierte Auflage des Buches in der Fachwelt eine gute Aufnahme finden wird.

**Willi Ritschard**  
Vorsteher  
des Eidgenössischen Verkehrs- und  
Energiewirtschaftsdepartementes

## Vorwort zur vierten Auflage

Betrachtet man die Zustandsform der Zivilisation, so lässt sich leicht erkennen, dass sie am sichtbarsten durch die Elektronik und die Flugtechnik verändert wird. Auch in nächster Zukunft dürften diese beiden Gebiete ihre Entwicklungsrichtung entscheidend beeinflussen.

Trotz der grossen Bedeutung dieser Zweige der Technik ist es erstaunlich, wie wenig über sie im Grunde genommen bekannt ist.

Das vorliegende Buch will nun dazu beitragen, die aerodynamischen Grundlagen der reinen Unterschallströmung in allgemeinverständlicher Form zu erläutern. Es wendet sich an alle technisch Vorgebildeten und an der Flugtechnik Interessierten sowie an Piloten.

Um die Ausführungen einem grösseren Leserkreis zugänglich zu machen, wurde auf die Verwendung der höheren Mathematik verzichtet.

Die neue Auflage ist an verschiedenen Stellen umgearbeitet und ergänzt worden, um die Weiterentwicklung der Luftfahrt in den letzten Jahren zu berücksichtigen. Es handelt sich vor allem um die Kapitel «Mittel zur Verhinderung der Ablösung», «Tragflügel», «Propeller» sowie «Profilform und Polare».

Anregungen aus dem Leserkreis nachkommend, nahm ich die Abschnitte «Beschleunigungswirkung auf den Menschen» und «Der Propellerlärm» neu in das Buch auf.

Die vorgenommenen Ergänzungen und Änderungen führte ich unter Wahrung des bisherigen Grundcharakters des Buches durch, im Bewusstsein, dass dieser beim Leser Anklang gefunden hat.

Den Erfordernissen der Zeit Rechnung tragend, wurde das «Internationale Einheitensystem» mit seinen SI-Einheiten im Buch eingeführt. Ausserdem passte ich die Benennungen und Zeichen den neuen Normen für die Luftfahrt an.

Von meinen Freunden habe ich viele wertvolle Ratschläge erhalten, für die ich auch an dieser Stelle bestens danke. Mein Dank gilt auch dem Birkhäuser Verlag für die gewohnte vorbildliche Sorgfalt bei der Ausstattung des Buches und die Berücksichtigung meiner zahlreichen Wünsche.

Zürich, im August 1979

Fritz Dubs

# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Die Atmosphäre</b>	
1. Die Zusammensetzung der Lufthülle	13
2. Schichtung der Atmosphäre	14
3. Der Luftdruck	20
4. Die Wichte der Luft	23
5. Fallbeschleunigung	24
6. Luftdichte	25
7. ICAO-Normatmosphäre	26
8. Höhenwirkung auf den Menschen	29
9. Beschleunigungswirkung auf den Menschen	32
<b>II. Strömungsgesetze</b>	
1. Die Stromlinie	36
2. Die Kontinuitätsgleichung	36
3. Der kinetische Druck	37
4. Gleichung von Daniel Bernoulli	37
5. Anwendung der Bernoullischen Gleichung	39
6. Abweichungen von der Bernoullischen Gleichung	42
7. Der Impulssatz	45
8. Das Widerstandsgesetz	49
9. Das Ähnlichkeitsgesetz	51
<b>III. Strömungsformen</b>	
1. Laminare Strömung	58
2. Turbulente Strömung	58
<b>IV. Strömungsbilder</b>	
1. Strömungskanal	60
2. Strömungsfelder	60
3. Kármánsche Wirbelstrasse	65
<b>V. Die Grenzschicht</b>	
1. Allgemeines	67
2. Der Einfluss des Grenzschichtcharakters auf den Reibungswiderstand	68
3. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Reibungswiderstand	71
4. Rückströmung in der Wandnähe	72
5. Die kritische Reynoldssche Zahl	74
6. Die Grenzschicht am Tragflügel	78
<b>VI. Mittel zur Verhinderung der Ablösung</b>	
1. Allgemeines	80
2. Leitschaufeln	80
3. Mitlaufende Wand	82
4. Ausblasen von Druckluft	83
5. Grenzschichtabsaugung	85
A. Allgemeines	85
B. Absaugleistung	87



<b>VII. Unterschall-Windkanäle</b>	
1. Allgemeines	88
2. Anforderungen an den Versuchsluftstrom	89
3. Bauarten	89
4. Bauteile	91
5. Meßstrecke	95
6. Modellaufhängung	96
7. Einfluss der Kanalturbulenz	98
<b>VIII. Der Magnus-Effekt</b>	
1. Allgemeines	100
2. Erklärung des Magnus-Effekts	100
<b>IX. Der Tragflügel</b>	
1. Allgemeines	103
2. Bezeichnungen	103
3. Die Entstehung des Auftriebs	106
4. Druckverteilung in Flügeltiefe	109
5. Das Polardiagramm	113
6. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf die Polare	119
7. Der Einfluss der Reynoldsschen Zahl auf die Polare	122
8. Der induzierte Widerstand des Tragflügels bei elliptischer Auftriebsverteilung	124
9. Der induzierte Widerstand des Eindeckers bei nichtelliptischer Auftriebsverteilung	133
10. Der induzierte Widerstand des Eindeckers mit Endscheiben	147
11. Der induzierte Widerstand des Doppeldeckers	151
12. Sonderflügelformen	157
A. Deltaflügel	157
B. Strake-Flügel	160
13. Der Abwind hinter dem Tragflügel	162
14. Rotierende Flügel	164
<b>X. Profilform und Polare</b>	
1. Allgemeines	167
2. Das Profilskelett	168
3. Die Polare eines Profils bei Anstellwinkeln von 0° bis 360°	169
4. Der Einfluss des Dickenverhältnisses auf die Polare	170
5. Der Einfluss des Wölbungsverhältnisses auf die Polare	172
6. Der Einfluss der Wölbungsrücklage auf die Polare	173
7. Der Einfluss der Dickenverteilung längs der Profiltiefe auf die Polare	173
A. Allgemeines	173
B. Versuchswerte	175
8. Einige Besonderheiten der Laminarprofile	176
9. Der Einfluss der Reynoldsschen Zahl auf den Beiwert des Mindestwiderstandes und den des Höchstauftriebs	180
10. Druckpunktfeste Profile	184
11. Auftriebssteigerung durch Klappen	186
A. Allgemeines	186
B. Wirkungsweise der verschiedenen Klappenarten	188
C. Auftriebserhöhung durch direkte Grenzschichtbeeinflussung	205
D. Auftriebserhöhung durch externe Anblasung der Landeklappen mittels Triebwerkstrahls	206
E. Höchstauftriebsbeiwert eines Flügels mit Klappen	207

Inhaltsverzeichnis	11
12. Der Einfluss der Bodennähe auf den Auftrieb	208
13. Profilsystematik	210
A. Allgemeines	210
B. Nach geometrischen Gesichtspunkten entwickelte Profile	210
C. Nach gewünschten Eigenschaften entwickelte Profile	213
D. Bezeichnung der Wortmann-Profile	217
E. Bezeichnung der Eppler-Profile	218
14. Profilaufmessung	218
15. Widerstandsbestimmung	228
A. Allgemeines	228
B. Auswertungsformel	231
16. Hitzdraht-Anemometer	233
A. Allgemeines	233
B. Bauliches	234
<b>XI. Der Restwiderstand</b>	
1. Allgemeines	236
2. Widerstandsbeiwerte von Flugzeugteilen	237
3. Berechnungsbeispiel	239
<b>XII. Der Interferenzwiderstand</b>	
1. Allgemeines	240
2. Negativer Interferenzwiderstand	240
3. Positiver Interferenzwiderstand	241
4. Grösse des Interferenzwiderstandes	247
<b>XIII. Flugbremsen</b>	
1. Allgemeines	248
2. Aufgaben der Flugbremsen	248
3. Ausführungsbeispiele	250
A. Klappen am Flügel	250
B. Klappen am Rumpf	254
C. Bremsschirme	255
D. Weitere Möglichkeiten	256
E. Bremsung durch Schubumkehr	256
<b>XIV. Der Propeller</b>	
1. Allgemeines	261
2. Wirkungsweise	261
3. Geometrie des Propellers	265
4. Charakteristische Kennwerte des Propellers	266
5. Standschubberechnung	268
6. Gewinnung und Darstellung von Versuchsergebnissen	273
7. Starre Propeller	275
8. Verstellpropeller	276
9. Einblatt-Schwenkpropeller	276
10. Gegenlaufverstellpropeller	279
11. Der Propeller als aerodynamische Bremse	280
12. Strahlverlust	282
13. Kompressibilitätseinflüsse	283
14. Der effektive Propellerwirkungsgrad	284
15. Die Kreiselwirkung	284
16. Propellerdrehmoment	285
17. Die Drallwirkung des Propellerstrahls	286

18. Der Propellerlärm .....	288
A. Der Luftschall und seine Bewertung .....	288
B. Zusammensetzung des Propellerlärms .....	293
C. Einflussgrößen des Propellerlärms .....	294
<b>XV. Die Gesamtpolare</b>	
1. Aufbau .....	297
2. Einfluss des Propellerstrahls .....	300
Schlusswort .....	302
Beziehungen zwischen den Einheiten des technischen und des internationalen Maßsystems .....	303
Ausgewählte Literatur	
a) Bücher .....	307
b) Zeitschriften .....	307
Schrifttum .....	308
Namen- und Sachverzeichnis .....	313