

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 Grenzschrift und Strömungsablösung 105

6.1 Grundlagen 105

6.2 Grenzschrift 107

 6.2.1 Grenzschriftparameter 107

 6.2.2 Laminare und turbulente Grenzschrift 110

 6.2.3 Grenzschriftberechnung 112

 6.2.4 Grenzschrift 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 Bezugshöhen	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	Wirbelleitervverfahren	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	Flügelpfeilung 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 Flügelpfeilung 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	Ungepfeilter 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	Konzeptentwurfphase	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