

Inhaltsverzeichnis

	Motivation zum Schreiben dieses Buches	V
	Geleitwort	VII
	Vorwort.....	IX
	Prolog	XIX
1	Einführung und elementare Grundlagen	1
1.1	Der Auftrieb – eine einleitende physikalische Deutung	1
1.2	Die Newtonschen Axiome	1
1.2.1	Das Erste Newtonsche Axiom.....	2
1.2.2	Das Zweite Newtonsche Axiom	3
1.2.3	Das Dritte Newtonsche Axiom	4
1.3	Die Auftriebskraft und wie sie entsteht.....	5
1.3.1	Impulsstrom und Bernoulli-Gleichung	5
1.3.2	Die Bernoulli-Gleichung in Strömungen mit Energiezufuhr ...	7
1.3.3	Bernoulli-Gleichung und Profilmströmungen. Eine Geschichte der Missinterpretationen	9
1.3.4	Otto Lilienthal, eine historische Beschreibung der Strömung um Profile	14
1.3.5	Die aerodynamische Auftriebskraft – der dynamische Auftrieb	16
1.4	Die Strömungsumlenkung längs gekrümmter Oberflächen und die Druckänderungen	19
1.4.1	Die d'Alembertsche Form des zweiten Newtonschen Axioms normal zur Strömungsrichtung	21

1.4.2	Die d'Alembertsche Form des zweiten Newtonschen Axioms in Strömungsrichtung.....	29
1.5	Zusammenfassungen und Ergänzungen.....	32
1.5.1	Ohne Viskosität kein Auftrieb	33
1.5.2	Zirkulation und aerodynamischer Auftrieb.....	36
1.5.2.1	Auftriebsbestimmung nach dem Kutta-Žukovskij-Theorem	39
1.5.2.2	Auftriebsbestimmung nach dem Zweiten und dem Dritten Newtonschen Axiom	40
1.5.2.3	Zirkulation und Auftriebsbeiwert von Verdichterprofilen zur Bestimmung der Belastungszahl.....	44
1.5.3	Der Coandă-Effekt	47
1.5.4	Der Magnus-Effekt	55
	Literatur	60
2	Aerodynamische Kräfte und Momente.....	63
2.1	Kräfte und Momente aus Druckverteilungen	63
2.1.1	Integration der Druck- und Scherspannungsverteilungen	67
2.1.2	Dimensionslose aerodynamische Beiwerte.....	75
2.1.2.1	Der Normalkraftbeiwert	77
2.1.2.2	Der Längskraftbeiwert	78
2.2	Der Auftriebs- und der Widerstandsbeiwert	78
2.2.1	Der Momentenbeiwert.....	78
2.3	Druckpunkt, Neutralpunkt und aerodynamisches Moment.....	81
2.4	Experimentell/theoretisch ermittelte Profileigenschaften.....	87
2.5	Bestimmung des aerodynamischen Zentrums	103
2.6	Der Einfluss der Flügelstreckung.....	111
2.7	Allgemeine Grundlagen zum induzierten Widerstand	115
2.8	Die parabolische Widerstandspolare.....	126
2.8.1	Einige Optimalwertbetrachtungen.....	128
2.8.2	Erforderlicher Schub und Geschwindigkeitsstabilität	131
	Literatur	135
3	Dimensionsanalyse – Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln	137
3.1	Das Buckingham'sche Π -Theorem.....	137
3.1.1	Das internationale Einheitensystem.....	138
3.1.2	Einige einfache Grundlagen zum Π -Theorem	139
3.1.3	Die Buckingham'schen Π -Größen und ihre Anzahl	143
3.1.4	Ein veranschaulichendes Basisbeispiel zum Π -Theorem.....	146
3.2	Dimensionslose Kenngrößen	153
3.2.1	Hintergrund zur Verwendung einheitenfreier Kenngrößen.....	154
3.2.2	Widerstand eines umströmten Zylinders der Einheitsbreite $b..$	157
3.3	Die Fractional Analysis	160

3.3.1	Kenngrößen aus Kräfteverhältnissen	160
3.3.2	Zusammenhänge zwischen den Kräfteverhältnissen	163
3.4	Ähnlichkeitsgesetze und Modellregeln	166
3.4.1	Ähnlichkeit von Strömungen und die Methode der Maßstäbe	166
3.4.2	Die aerodynamischen Beiwerte als Ähnlichkeitskenngrößen ..	169
3.4.3	Über die unvollständige Ähnlichkeit von Strömungen	172
3.4.4	Machsches Ähnlichkeitsgesetz	177
3.4.5	Reynoldssches Ähnlichkeitsgesetz	180
3.4.6	Zusammenfassung	183
	Literatur	189

4 Strömungsmechanische Grundlagen zur Aerodynamik 191

4.1	Die atmosphärische Druckverteilung	191
4.2	Stromlinie, Stromröhre und Stromfaden	201
4.2.1	Volumenstrom, Massenstrom und Kontinuität	207
4.3	Eindimensionale Eulersche Bewegungsgleichung	209
4.4	Stationäre und instationäre Strömungen	214
4.5	Die Kontinuitätsgleichung	219
4.6	Die dreidimensionalen Eulerschen Bewegungsgleichungen	226
4.7	Kinematik der Fluid- und Deformationsbewegungen	232
4.8	Die Bernoulli-Gleichung	238
4.8.1	Bernoulli-Integration der Eulerschen-Bewegungsgleichungen	246
4.8.2	Anmerkungen zur Bernoulli-Konstanten	251
4.8.3	Die Laplace-Gleichung und Strömungen mit ausnahmslos gleichen Bernoulli-Konstanten	254
4.8.3.1	Über die Begriffe Kraftfeld und Potenzial in der Aerodynamik	262
4.8.4	Über die Anfangs- und Randbedingungen	268
4.8.5	Einfache Anwendungen der Bernoulli-Gleichung	271
4.8.5.1	Potenzialströmung um einen symmetrischen Körper	271
4.8.5.2	Strömung um eine gekrümmte Profilkontur	273
4.8.5.2.1	Druckänderungen normal zu den Stromlinien	273
4.8.5.2.2	Druckänderung tangential zu den Stromlinien	281
4.8.5.2.3	Wichtige Schlussfolgerungen hinsichtlich von Profilmströmungen	283
4.8.5.3	Die Bernoulli-Gleichung in rotierenden Bezugssystemen	285
4.8.5.3.1	Detailliertere Präzisierung der vorhergehenden Ergebnisse	290
4.8.5.4	Die Bernoulli-Gleichung für instationäre Strömungen	293
4.8.5.5	Vergleichmäßigung von Geschwindigkeitsunterschieden	299

4.8.5.6	Die Bernoulli-Gleichung in Strömungen mit Dissipation, Energiezufuhr von außen oder Energieabgabe nach außen	301
4.8.5.7	Die Bernoulli-Gleichung und die Kavitationsgeschwindigkeit	311
4.9	Impulssatz für stationäre Strömungen	313
4.9.1	Grundsätzliches: Impuls und Impulsübertragung (Stoß)	313
4.9.2	Allgemeiner Impulssatz der Mechanik	315
4.9.3	Schwerpunktsatz der Mechanik	317
4.9.4	Differenzialquotient nach Leibniz	318
4.9.5	Reihenentwicklung nach Taylor	319
4.9.6	Der Impulssatz für instationäre und stationäre Strömungen ...	320
4.9.6.1	Ein Anleitung zur Wahl einer geeigneten Kontrollfläche	322
4.9.7	Die Kräfte in der Impulsgleichung	323
4.9.7.1	Äußere Kräfte	323
4.9.7.2	Die Volumen- oder Schwerkraft	323
4.9.7.3	Kräfte an den freien Teilen der Kontrollfläche	325
4.9.8	Kräfte an den festen Teilen der Kontrollfläche	326
4.9.9	Über die Auswahl der Kontrollfläche	328
4.9.10	Einfache Anwendungen des Impulssatzes	331
4.9.10.1	Auftrieb eines unsymmetrischen Profils mit Anstellung	331
4.9.10.2	Widerstand eines symmetrischen Profils	332
4.9.10.3	Kräfte auf eine geschwenkte Triebwerksschubdüse	336
4.9.10.4	Die Schubkraft eines Turbofantriebwerks	341
4.9.10.5	Turbofantriebwerk mit Schwenkdüse (<i>Swivel Nozzle</i>) und Triebwerksaußenströmung	347
4.9.10.6	Freistrahltrieburbine	349
4.9.10.7	Schräger Freistrahle trifft auf senkrechte Wand	352
Literatur	355

5 Potenzialströmungen 357

5.1	Potenzial – Potenzialströmung – Laplace-Gleichung	357
5.1.1	Die Interpretation der Potenzialfunktion als druckinduzierter Stoß	365
5.1.2	Anmerkungen zur Lösung der Laplace-Gleichung	367
5.2	Die Zirkulation	369
5.2.1	Die Zirkulation in Potenzialströmungen	372
5.2.1.1	Potenzialströmung	372
5.2.1.2	Das Wegintegral der Geschwindigkeit in Potenzialströmungen	375
5.2.2	Drehungsfreie Umlaufströmungen	377
5.2.2.1	Über die Drehungsfreiheit	380

5.2.2.2	Nicht drehungsfreie Dreh- oder Wirbelströmungen ..	383
5.2.2.3	Nicht drehungsfreie Horizontalströmungen	385
5.3	Die Stromfunktion	388
5.3.1	Zusammenhänge zwischen	
	Potenzial- und Stromfunktion	388
5.3.1.1	Extrakt des vorhergehenden Unterkapitels	394
5.3.2	Die Vertauschung von Potenzial- und Stromfunktion	397
5.3.3	Die Durchflussmenge.....	397
5.3.4	Das Superpositionsprinzip von Potenzialströmungen	400
5.4	Einfache ebene und räumliche Potenzialströmungen	
	anhand von Beispielen	402
5.4.1	Translatorische (geradlinige), stationäre, ebene Strömung.....	402
5.4.2	Ebene Staupunktströmung	404
5.4.3	Ebene Quellen und Senken	410
5.4.4	Ebener Halbkörper	415
5.4.5	Ebenes Quellen-Senken-Paar und ebener Dipol.....	423
5.4.5.1	Ebenes Quellen-Senken-Paar	423
5.4.5.2	Ebener Dipol (Punktdipol).....	427
5.4.6	Potenzialwirbel (Teil 1)	432
5.4.7	Ebene und drehsymmetrische Potenzialströmungen	434
5.4.7.1	Laplace-Gleichung in Polarkoordinaten	435
5.4.8	Potenzialwirbel (Teil 2)	440
5.4.9	Ebene Umströmung eines Kreiszylinders ohne Zirkulation.....	443
5.4.10	Umströmung einer Kugel	455
5.4.10.1	Die Stokessche Stromfunktion	456
5.4.10.2	Potenzial der räumlichen	
	Quellen- und Senkenströmung.....	463
5.4.10.3	Potenzial- und Stromfunktion der	
	räumlichen Dipolströmung	471
5.4.10.4	Potenzial und Druckverteilung der umströmten Kugel	480
5.4.11	Räumlicher, drehsymmetrischer Halbkörper	493
5.4.11.1	Nachweis des Nullwiderstandes eines räumlichen	
	Halbkörpers in einer irrotationalen	
	Potenzialströmung.....	505
5.4.11.1.1	Über die im Inneren des räumlichen	
	Halbkörpers verlaufenden drehsym-	
	metrischen Stromflächenformen.....	507
5.4.12	Schlussworte zum Thema einfache ebene und räumliche	
	Potenzialströmungsbeispiele	510
Literatur	512
6	Komplexe Strömungsfunktionen	515
6.1	Einleitende Vorbemerkungen und Wiederholungen	517
6.2	Rechnen mit komplexen Zahlen in der Aerodynamik	520

6.2.1	Die imaginäre Einheit	520
6.2.2	Die komplexen Zahlen	524
6.2.3	Die Gaußsche Zahlenebene	525
6.2.4	Addieren und Subtrahieren in der Gaußschen Zahlenebene ...	527
6.2.5	Goniometrische Form komplexer Zahlen	528
6.2.6	Multiplizieren, Dividieren und Potenzieren in der Gaußschen Zahlenebene	530
6.2.6.1	Multiplikation	530
6.2.6.2	Geometrische Konstruktion des Produktes $z \cdot z'$	531
6.2.6.3	Division	531
6.2.6.4	Geometrische Konstruktion des Quotienten $z : z'$	533
6.2.6.5	Potenzieren	534
6.2.6.6	Komplexe n -te Wurzeln einer Zahl	535
6.2.6.7	Potenzen der imaginären Einheit j und deren 4er-Periodizität	540
6.2.6.8	Algebraische Gleichungen im Komplexen	542
6.2.6.9	Logarithmen	549
6.2.6.9.1	Ergänzende Erklärung zur Addition von Vielfachen von $2\pi j$	551
6.2.6.10	Eulersche Formel und die Exponentialform komplexer Zahlen	552
6.2.6.11	Potenzen der Zahl e mit komplexen Exponenten	554
6.2.6.12	Fazit	554
6.3	Grundlagen und Ziele der komplexen Analysis in der Aerodynamik ..	557
6.3.1	„Potenzialwirbel und ebene Quelle“ und „Staupunktströmung und gedrehte Eckenströmung“ als Hilfen zur Einführung in das Thema	557
6.3.2	Über reelle und komplexe Differenzierbarkeit	568
6.3.2.1	Resümee	574
6.4	Beispiele einfacher komplexer Strömungsfunktionen $F(z)$	578
6.4.1	$F(z) = a + bz = a_1 + ja_2 + (b_1 + jb_2)(x + jy)$	579
6.4.2	$F(z) = (a/n)z^n$ – wenn a reell und $n \geq 1/2$ ist	586
6.4.3	$F(z) = -a/z$ Ebener Dipol – zweidimensionale Quellen-Senken-Kombination	593
6.4.4	$F(z) = a(z + z^{-1})$ – Ebene Strömung um einen Kreiszylinder ...	595
6.4.5	$F(z) = a_1(z + z^{-1}) + ja_2 \ln z$ – Ebene Strömung um einen Kreiszylinder mit Zirkulation	601
6.4.5.1	Das Kutta-Žukovskij-Theorem	620
6.4.5.2	Die zwei Blasius Theoreme	633
6.4.5.2.1	Resultierende Druckkraft auf starre Körper in zweidimensionaler ungleichförmiger stationärer Potenzialströmung	634

6.4.5.2.2	Das Moment infolge der Druckkraft auf starre Körper in zweidimensionaler ungleich- förmiger stationärer Potenzialströmung.....	638
6.4.5.2.3	Ein einfaches Beispiel für die zwei Blasius-Theoreme	641
6.4.6	$F(z) = a_1 z + a_2 \ln z$ – Ebene Strömung um einen zweidimensionalen Halbkörper.....	645
6.5	Beispiele diffizilerer komplexer Strömungsfunktionen	654
6.5.1	$F(z) = a_1 z + a_2 [(z + \ell)/(z - \ell)]$ – Ebenes Quellen-Senken-Paar	654
6.5.2	Stromlinienkörper – Abschnittsweise Anordnung von linear kombinierten Quellen- und Senkenstrecken	666
6.5.2.1	Kapitel-Vorwort	666
6.5.2.2	Stromlinienverläufe abschnittsweise angeordneter linear kombinierter Quellen- und Senkenstrecken	667
6.5.2.3	Spiegelsymmetrische, stromlinienförmige Körper mit Querschnitten unterschiedlicher Dicke.....	679
6.5.2.4	Kombination einer singulären Punktquelle mit der streckenförmigen Belegung einer Vielzahl punktförmiger Senken konstanten Schluckvermögens	694
Literatur	725

7 Konforme Abbildung 727

7.1	Einleitendes zum Verstehen, worum es geht.....	727
7.1.1	Über Abbildungen im Allgemeinen	730
7.1.1.1	Die stereografische Projektion	733
7.1.1.2	Die Mercatorprojektion	738
7.1.1.3	Konforme Abbildung eines Rechtecks auf einen Kreisringsektor.....	743
7.1.1.4	Allgemeine Anforderungen an grafische Abbildungsverfahren	745
7.2	Einige theoretische Grundlagen zur konformen Abbildung.....	747
7.2.1	Riemannsche Ebenen und Blätter am Beispiel $F(z) = a \ln z$	753
7.2.2	Stringente Zusammenhänge zwischen konformer Abbildung und den Basisgesetzen von Potenzialströmungen.....	762
7.3	Konforme Abbildung unterschiedlicher Strömungsfelder um eine ebene Platte.....	768
7.4	Konnex zwischen Strom- und Potenzialfunktion und der Theorie komplexer Zahlen	778
7.4.1	Zusammenhang zwischen komplexer Differenzierbarkeit und den Cauchy-Riemannschen partiellen Differenzialgleichungen	780
7.4.1.1	Theorem 1	780
7.4.2	Zusammenhang zwischen Laplacescher Gleichung und den Cauchy-Riemannschen partiellen Differenzialgleichungen	784
7.4.2.1	Theorem 2	784

7.4.3	Verflechtung der vorangegangenen beiden Unterkapitel	790
7.4.3.1	Theorem 3	790
7.5	Grundlagen zu Verzerrungen und Geschwindigkeitsbeträgen	791
7.5.1	Strömung entlang der Oberfläche einer schräg angeströmten ebenen, unendlich dünnen Platte	791
7.5.2	Geschwindigkeitsfeld um eine schräg angeströmte ebene, unendlich dünne Platte	797
7.5.3	Geschwindigkeitsfeld um eine quer angeströmte ebene, unendlich dünne Platte	803
7.5.4	Instationäre Strömung um eine waagrecht liegende ebene, unendlich dünne Platte, die sich vertikal von oben nach unten durch ein ruhendes Fluid bewegt	808
7.6	Geneigte ebene Platte mit Zirkulation bzw. mit Druckkraft	815
7.6.1	Geschwindigkeitsfeld und Geschwindigkeitsverteilung um eine schräg angeströmte ebene, unendlich dünne Platte mit Zirkulation bzw. mit Druckkraft	823
7.6.2	Druckverteilung, resultierende Kraft und Moment an einer schräg angeströmten ebenen, unendlich dünnen Platte mit Zirkulation	831
7.6.2.1	Druck- bzw. c_p -Verteilung	831
7.6.2.2	Die resultierende Kraft F_{res} , das aerodynamische Moment M und die zugehörigen Beiwerte c_A und c_M ..	833
7.7	Kreisbogenprofil	839
7.7.1	Geometrische Grundlagen	839
7.7.2	Zur Bedeutung des Kreisbogenprofils und seiner Umströmung für die Entwicklung aerodynamischer Profile....	855
Literatur	861