

Einführung in die Technische Strömungslehre

Bearbeitet von
Gerd Junge

2., neu bearbeitete Auflage 2015. Buch. 318 S. Gebunden

ISBN 978 3 446 44430 0

Format (B x L): 16,8 x 240,2 cm

Gewicht: 599 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie > Strömungslehre](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



Leseprobe

Gerd Junge

Einführung in die Technische Strömungslehre

ISBN (Buch): 978-3-446-44430-0

ISBN (E-Book): 978-3-446-44541-3

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44430-0>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Dieses Buch wendet sich an Studierende der Technikwissenschaften im Grundstudium, aber auch an Ingenieure, die in ihrem Berufsleben bisher andere Fachgebiete verfolgt haben und sich nun in die Problematik der Strömungslehre einarbeiten möchten.

Der Text des Buches entstand aus Vorlesungsniederschriften für eine einsemestrige Lehrveranstaltung zur Einführung in die Strömungslehre. Über mehrere Jahre führten die Fragen und Anregungen der Studenten zu einer Darstellung, die den Lernzielen immer besser angepasst werden konnte.

Für die zweite Auflage wurden mit den Erfahrungen aus den Lehrveranstaltungen der letzten Jahre verschiedene inhaltliche Beschreibungen neu formuliert, um die Probleme besser verständlich zu erläutern.

Das Ziel besteht darin, den Zugang zur Literatur der technischen Strömungslehre und des Strömungsmaschinenbaus auf der Grundlage des physikalischen Allgemeinwissens zu erleichtern.

Aufbauend auf allgemein vorhandenem Grundwissen über Flüssigkeiten und Gase werden schrittweise die speziellen Eigenheiten von Strömungsvorgängen dargelegt und erläutert. Dabei wird großer Wert auf eine gut verständliche Problembeschreibung gelegt, die aus praktischen Beobachtungen nachvollzogen werden kann. Daraus werden plausible, physikalisch begründete Ansätze für eine mathematische Behandlung des jeweiligen Problems abgeleitet.

Bei den Herleitungen der Berechnungsvorschriften wird das Augenmerk besonders auf nachvollziehbare Erklärungen für die Art und die Abfolge der mathematischen Rechenschritte gerichtet.

Sekundär – sozusagen als Nebeneffekt – werden mit den vielfältigen Berechnungen Beispiele vermittelt, wie technische Probleme mit den Mitteln der Ingenieurmathematik behandelt werden können.

Die gewählte Darstellungsform fördert die Entwicklung einer nachhaltigen Wissensbasis, die im Wesentlichen ohne das Auswendiglernen von Formeln erreicht wird und die es gestattet, die Berechnungsmethoden in ihrer Anwendbarkeit und Zuverlässigkeit einzuschätzen.

Neben der Behandlung von Rohrströmungen werden die Bewegungsgleichungen für Strömungen und die Grundzüge der Potenzialtheorie für Strömungen dargelegt. Die wesentlichen strömungstechnischen Ansätze für das Verständnis und die optimale Auslegung von Strömungsmaschinen werden dargestellt.

Wegen der ausführlichen Analysen eignet sich das Buch auch gut als Hilfestellung bei vertiefenden Betrachtungen im Masterstudium und zum Nachschlagen im Berufsleben.

Dem Verlag möchte ich für die gute Zusammenarbeit bei der Entstehung des Buches danken. Das betrifft insbesondere Herrn Dipl. Phys. Jochen Horn, der mit vielen Hinweisen die Gestaltung des Buches wesentlich beeinflusst hat. Frau Dipl.-Min. Ute Eckardt hat mit großer Geduld meine zahlreichen Änderungswünsche in die zweite Auflage eingearbeitet und Frau Katrin Wulst sorgte für die ansprechende Gestaltung des Buches.

Potsdam, Mai 2015

Gerd Junge

Inhalt

Vorwort	5
1 Dichte, Druck und Kräfte	11
1.1 Dichte von Flüssigkeiten	11
1.2 Dichte von Gasen	13
1.3 Schweredruck in Flüssigkeiten	15
1.4 Dimension des Druckes	17
1.5 Kommunizierende Gefäße	17
1.6 Kräfte auf die Gefäßwände	18
1.7 Auftrieb (Archimedisches Prinzip)	19
1.8 Druck und Energie	21
1.9 Wandkräfte in Rohren	23
1.10 Luftdruck	25
1.11 Barometrische Höhenformel	26
1.12 Kamin	28
1.13 Übungsaufgaben	32
2 Idealisierte Strömung	33
2.1 Kontinuitätsgleichung	33
2.2 Bernoulli-Gleichung	34
2.3 Anwendungen	35
2.3.1 Hydrodynamisches Paradoxon	35
2.3.2 Venturi-Düse	35
2.3.3 Staurohr nach Prandtl	37
2.4 Rohrströmung aus einem Hochbehälter	38
2.4.1 Geschwindigkeit und Druckverlauf	38
2.4.2 Kavitation	39
2.5 Kavitation an Maschinenteilen	41
2.6 Energiegewinnung mit Fluiden	42
2.6.1 Nutzung der potentiellen Energie des Fluids	42
2.6.2 Nutzung der kinetischen Energie des Fluids	43
2.7 Gasströmung und Bernoulli-Gleichung	44
2.8 Übungsaufgaben	46
3 Reale Strömung	48
3.1 Newtons Reibungsgesetz	48
3.2 Viskosität von Gasen	49
3.3 Viskosität von Flüssigkeiten	51
3.4 Abweichungen vom Newton-Reibungsgesetz	52
3.5 Laminare und turbulente Strömungsformen	52
3.6 Reynolds-Zahl	56
3.7 Kinematische Viskosität	57

3.8	Übergang zur Turbulenz	58
3.9	Ähnlichkeit bei Strömungen	61
3.10	Übungsaufgaben	63
4	Rohrströmung	64
4.1	Druckverlust	64
4.2	Laminare Rohrströmung (Gesetz von Hagen-Poiseuille)	65
4.3	Turbulente Strömung	69
4.3.1	Druckverlust bei Vorgabe des Volumenstroms	70
4.3.2	Druckverlust bei Vorgabe der Druckdifferenz	73
4.4	Leistungsbedarf	75
4.5	Strömungen in Rohren von Solaranlagen	77
4.6	Druckverlust durch Einbauteile	78
4.7	Druckhöhe und Druckhöhenverlust	81
4.7.1	Druckhöhenverlust für waagerechte Rohrleitungen	81
4.7.2	Druckhöhenverlust bei Wasserkraftanlagen	82
4.8	Strömungswiderstand bei isothermer Gasströmung	86
4.9	Übungsaufgaben	92
5	Bewegungsgleichungen für Fluide	95
5.1	Lokale und konvektive Beschleunigungen	95
5.2	Druckkräfte	98
5.3	Euler-Gleichung	99
5.4	Zusammenhang mit der Gleichung von Bernoulli	100
5.5	Allgemeine Kontinuitätsgleichung	106
5.6	Impulssatz für Strömungen	109
5.7	Reaktionskraft	111
5.7.1	Kräfte auf die Rohrwand	112
5.7.2	Rückstoß	114
5.7.3	Rückstoß bei Torricelli-Ausströmung	115
5.7.4	Strahldruck auf eine Platte	116
5.7.5	Stoßverlust	117
5.8	Drall (Drehimpuls)	119
5.9	Übungsaufgaben	122
6	Strömungen kompressibler Fluide	124
6.1	Bernoulli-Gleichung für stationäre adiabatische Gasströmung	124
6.2	Schall und Schallgeschwindigkeit in Gasen	125
6.3	Strömungen durch eine konvergente Düse	128
6.4	Laval-Düse	133
6.5	Mach-Zahl	138
6.6	Geschwindigkeit und Düsenquerschnitt	139
6.7	Übungsaufgaben	141

7	Umströmung von Körpern	143
7.1	Grenzschicht	143
7.2	c_w -Wert	146
7.3	Laminare Umströmung	147
7.3.1	Sinken einer Kugel bei laminarer Umströmung	148
7.3.2	Entstaubung mit Wirbelsenke	149
7.4	Turbulente Umströmung	151
7.4.1	Sinken einer Kugel bei turbulenter Umströmung	153
7.4.2	Leistungsbedarf bei Bewegung im Fluid	154
7.5	Überschall-Umströmung	155
7.6	Widerstandsläufer	156
7.6.1	Schalenkreuz als Messgerät	156
7.6.2	Schalenkreuz als Antrieb	159
7.6.3	Tiefschlächtiges Wasserrad	160
7.7	Übungsaufgaben	162
8	Strömungsmaschinen	164
8.1	Funktionsprinzip von Strömungsmaschinen	164
8.2	Kreiselpumpe	166
8.3	Euler-Gleichungen für Strömungsmaschinen	168
8.4	Pelton-Turbine	170
8.5	Energie und Leistung bei freier Umströmung	175
8.5.1	Vereinfachter Propeller	175
8.5.2	Vereinfachte Windkraftanlage – Betz-Gesetz	177
8.6	Übungsaufgaben	181
9	Potenzialströmung	183
9.1	Strömungspotenzial	183
9.2	Ebene Parallelströmung	185
9.3	Zirkulation	185
9.4	Radialströmung	186
9.5	Zirkulationsströmung	188
9.6	Wirbelquelle (Radial- plus Zirkulationsströmung)	191
9.7	Dipolströmung (Quelle – Senke)	193
9.8	Virtuelle Doppelquelle	197
9.9	Reale Zylinderumströmung	198
9.10	Konforme Abbildung	201
9.10.1	Lineare Funktion $\zeta = az + b$	202
9.10.2	Inversion $\zeta = 1/z$	202
9.10.3	Logarithmus $\zeta = \text{Ln } z$	204
9.11	Anwendung: Halbkörper	205
9.12	Joukowski-Transformation	208
9.13	Strömungsvergleich Platte – Zylinder	211
9.14	Übungsaufgaben	214

10	Tragflügel	215
10.1	Magnus-Effekt	215
10.2	Schräg angeströmte Platte	219
10.3	Strömungskräfte auf eine kreisbogenförmige Platte	225
10.4	Tragflügel	227
10.4.1	Profile	227
10.4.2	Kennzahlen für Tragflügel	228
10.4.3	Kraftrichtungen am Tragflügel	230
10.4.4	Winkelverhältnisse am Tragflügel	231
10.4.5	Randeinflüsse	233
10.5	Übungsaufgaben	236
11	Windkraftanlagen	238
11.1	Schnelllaufzahl	238
11.2	Winkelbeziehungen am Rotor	240
11.3	Die Kräfte am Rotorblatt	242
11.4	Optimale Rotorblattauslegung	243
11.5	Biegemoment am Rotorblatt	245
11.6	Schubkraft auf die Rotorebene	246
11.7	Drehmoment an der Rotorwelle	248
11.8	Leistungsregelung	250
11.9	Übungsaufgaben	251
12	Lösungen	252
13	Literatur	309
	Quellenverzeichnis	309
	Weiterführende Literatur	309
	Sachwortverzeichnis	311
	Formelzeichen	318

11 Windkraftanlagen

Für den Betrieb von Windkraftanlagen erweist es sich als vorteilhaft, die Rotoren mit möglichst hohen Drehzahlen bei relativ geringer Drehmomentenbelastung zu betreiben. Das kann über Getriebe technisch realisiert werden. Die hier entscheidende Kennzahl wird als **Schnelllaufzahl** bezeichnet.

Für die optimale Leistungsausbeute bei einer frei umströmten Windkraftanlage muss die geometrische Gestaltung der Rotorblätter auf die theoretisch erreichbare Obergrenze abgestimmt werden.

11.1 Schnelllaufzahl

Windkraftanlagen nutzen den aerodynamischen Auftrieb für die Bewegung der Rotorblätter. Die Verhältnisse sind ähnlich wie bei der Funktionsweise eines Tragflügels. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass in der Längsausdehnung des Tragflügels die Strömungsverhältnisse (Geschwindigkeit, Anströmwinkel) konstant bleiben, während diese sich bei einem Rotor in Abhängigkeit vom Radius verändern.

Wenn die Luftströmung eine Auftriebskraft ausübt, die zur Rotorbewegung beiträgt, dann muss die Strömung unabhängig von der Ursache für den Auftrieb aufgrund des Impulserhaltungssatzes entgegengesetzt zur Rotorbewegung abströmen. Diese Querablenkung wird an allen Flächenabschnitten der Rotoranordnung auftreten, d. h., hinter dem Rotor ist die Strömung nicht mehr nur linear, sondern mit einer Rotationsbewegung, dem Drall, überlagert.

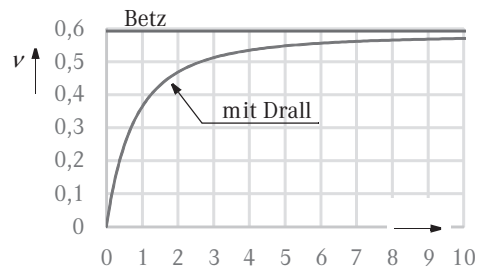
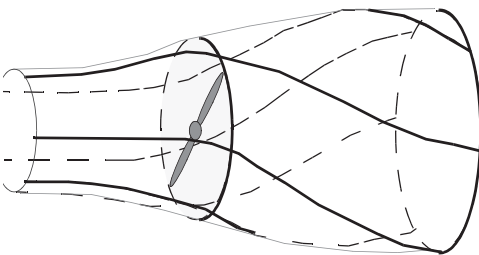


Bild 11.1 Drall hinter Windrad und Wirkungsgrad als Funktion der Schnelllaufzahl

In diesem Drall steckt eine erhebliche kinetische Energie, die bei der Leistungsübertragung auf den Rotor technisch verloren geht. Je größer das geforderte Drehmoment ist, umso größer fallen die Kräfte an den einzelnen Flächenabschnitten aus, sodass der Drall proportional mit dem geforderten Drehmoment anwächst.

Dieser Leistungsverlust wird auch als **Nachlaufeffekt** bezeichnet.

Die bei einer Rotation entnehmbare Leistung P_{rot} berechnet sich als Produkt aus dem wirkenden Drehmoment M und der Winkelgeschwindigkeit ω :

$$P_{\text{rot}} = M \cdot \omega \quad (11.1)$$

Um die Drallverluste möglichst klein zu halten, sollte das Drehmoment M möglichst klein gewählt werden, und die Winkelgeschwindigkeit der Rotation sollte entsprechend groß ausfallen, um die gewünschte Leistung zu erhalten. Die technische Realisierung kann durch ein entsprechendes Getriebe zwischen Rotor und angetriebenem Generator erfolgen, sodass der Rotor nur geringfügig abgebremst wird und so hohe Drehzahlen erreichen kann.

Als technischer Parameter für die weiteren Überlegungen wird die **Schnelllaufzahl** λ eingeführt. Sie wird als Quotient aus der Rotorspitzenengeschwindigkeit u_{max} und der ungestörten Windgeschwindigkeit v_1 weit vor dem Rotor definiert. Mit dem maximalen Radius R des Rotors ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\lambda = \frac{u_{\text{max}}}{v_1} = \frac{R \cdot \omega}{v_1} \quad (11.2)$$

Die Überlegungen von BETZ (vgl. Abschn. 8.5) zeigten, dass maximal 59 % der verfügbaren Windenergie am Rotor in mechanische Energie umgewandelt werden kann.

Für diese Überlegungen wurden nur lineare Strömungsverhältnisse angenommen und vorausgesetzt. Weil aber die technische Realisierung mit Drallverlusten behaftet ist, muss das BETZsche Gesetz für kleine Schnelllaufzahlen korrigiert werden, wie im Bild 11.1 dargestellt. Wenn die Schnelllaufzahl gegen unendlich (M gegen null) strebt, verschwinden die Drallverluste, und das BETZ-Gesetz ist ohne Abstriche gültig.

Es wird deutlich, dass eine gute Annäherung an den theoretisch möglichen Grenzwert ab Schnelllaufzahlen $\lambda > 5$ möglich wird. Moderne Anlagen haben Schnelllaufzahlen von $\lambda \approx 5 \dots 12$, die Wirkungsgrade liegen bei ca. 0,55.

Zusätzlich zu den Drallverlusten bewirken die Randeinflüsse an den Rotorspitzen einen induzierten Widerstand, so wie er durch die Wirbelschleppen an den Tragflügelenden erzeugt wird. Der Drall und die Randwirbel müssen für die unmittelbare Nähe der Anlagen berücksichtigt werden, z. B. dürfen Hochspannungsleitungen nicht zu dicht neben Windkraftanlagen verlaufen.

Die Theorie der Strömung macht keine zwingenden Vorgaben zur Anzahl der Rotorblätter, d. h., die Wahl der Blattzahl erfolgt nach technischen Gesichtspunkten, wie mechanische Festigkeit, Laufruhe und Herstellungskosten.

Da die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über dem Boden teilweise stark variieren kann, haben sich die dreiblättrigen Rotoren durchgesetzt, weil sie eine wesentlich größere Laufruhe aufweisen im Vergleich zu 2-Blatt- bzw. 1-Blatt-Rotoren.

11.2 Winkelbeziehungen am Rotor

Für die Untersuchung der Verhältnisse am Rotor einer Windkraftanlage setzen wir voraus, dass die Anlage hinsichtlich der Strömungsgeschwindigkeiten nach den Überlegungen von BETZ optimiert ist. Die dafür notwendigen konstruktiven Merkmale werden wir im Anschluss diskutieren.

Bei der optimalen Auslegung wird die anströmende Luft bereits vor der Rotorebene von der Geschwindigkeit v_1 im ungestörten Raum auf die Geschwindigkeit v_2 in der Rotorebene abgebremst, es gilt die Beziehung von BETZ Gl. (8.47)

$$v_2 = \frac{2}{3} \cdot v_1 \quad (11.3)$$

Mit dieser verringerten Geschwindigkeit strömt der Wind senkrecht in die Rotorebene.

Weil sich die Rotorblätter quer zur Windströmung bewegen, haben die einzelnen Flächenabschnitte senkrecht zur Windströmung die Umlaufgeschwindigkeit u . Der Vektor der Relativgeschwindigkeit w ergibt sich als Differenz:

$$\vec{w} = \vec{v}_2 - \vec{u} \quad (11.4)$$

Der Vektor der Relativgeschwindigkeit w schließt mit der Rotorebene den Winkel β ein.

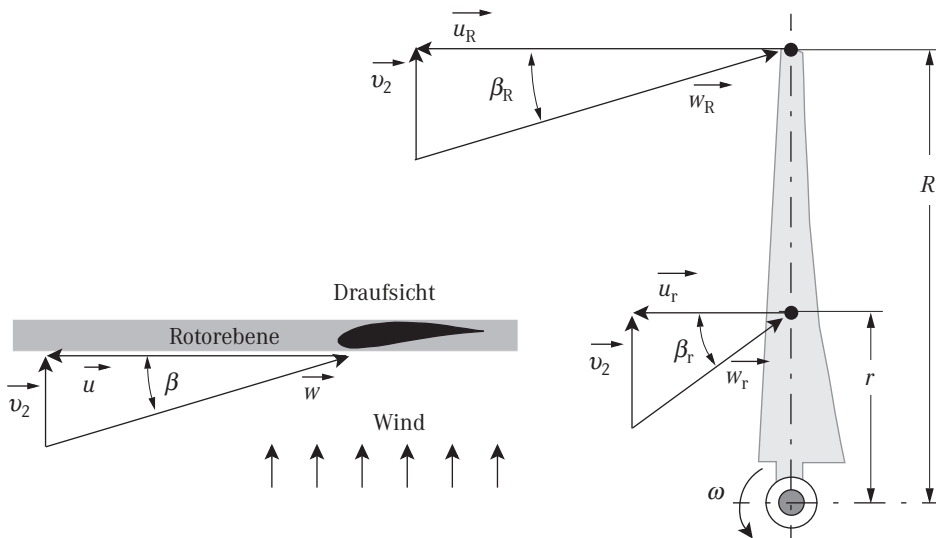


Bild 11.2 Winkelbeziehungen am Rotorblatt

Die Umlaufgeschwindigkeit der einzelnen Flächenabschnitte ändert sich mit dem Radius, daher ändert sich auch der Winkel β . Mit der Schnelllaufzahl erhalten wir:

$$u = \frac{r}{R} \cdot u_{\max} = \frac{r}{R} \cdot \lambda \cdot v_1 \quad (11.5)$$

Mit der Beziehung Gl. (11.3) wird

$$\frac{u}{v_2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \lambda \quad (11.6)$$

Somit können wir den Winkel in Abhängigkeit vom Radius unabhängig von der tatsächlichen Strömung angeben:

$$\tan \beta_r = \frac{v_2}{u} = \frac{2}{3} \cdot \frac{R}{r} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (11.7)$$

Der Anströmwinkel β verändert sich entlang des Rotorblattes, er ist innen am größten und er verringert sich in Richtung zur Blattspitze.

Da für die Erzielung des Auftriebes ein optimaler Anströmwinkel erforderlich ist, muss das Profil des Rotorblattes in Längsrichtung verdreht werden.

Beispiel:

Für die Schnelllaufzahl 7 soll der Anströmwinkel an der Spitze des Rotorblattes ermittelt werden und mit dem Anströmwinkel im Innenbereich des Blattes bei dem Radius $r = R/10$ verglichen werden.

An der Spitze

$$\tan \beta_R = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{7} \approx 0,095 \quad \Rightarrow \quad \beta_R \approx 5,4^\circ$$

innen, bei $r = R/10$

$$\tan \beta_r = \frac{2}{3} \cdot \frac{R}{r} \cdot \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{3} \cdot 10 \cdot \frac{1}{7} \approx 0,95 \quad \Rightarrow \quad \beta_r \approx 43,6^\circ$$

Der Winkel hat sich auf das 8fache vergrößert, ein Umstand, der technisch unbedingt berücksichtigt werden muss.

Für die spätere Berechnung der Auftriebskräfte werden der Sinus des Anströmwinkels und die Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Radius benötigt.

$$\sin \beta_r = \frac{\tan \beta_r}{\sqrt{1 + (\tan \beta_r)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \beta_r)^{-2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \lambda\right)^2}} \quad (11.8)$$

Die Relativgeschwindigkeit wird damit:

$$w_r = \frac{v_2}{\sin \beta_r} = \frac{2}{3} \cdot v_1 \cdot \frac{1}{\sin \beta_r} \quad (11.9)$$

11.3 Die Kräfte am Rotorblatt

Wir betrachten einen kleinen Ausschnitt Δr aus dem Rotorflügel mit dem Flächenanteil ΔA . Für diesen kleinen Bereich können wir die Umfangsgeschwindigkeit als konstant ansehen. Der Anstellwinkel α soll optimal eingestellt sein.

Die Richtung der Auftriebskraft F_a ist senkrecht zur Richtung der Relativgeschwindigkeit w , und die Widerstandskraft F_w schließt mit der Rotorebene den Winkel β ein. Für die Bewegung des Rotorblattes sind die Kraftkomponenten von Auftrieb F_{au} und Widerstand F_{wu} in Richtung der Rotorebene entscheidend.

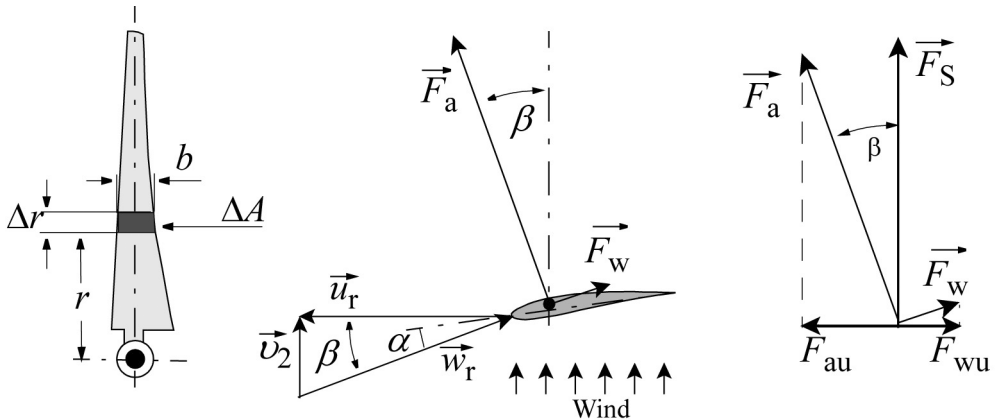


Bild 11.3 Kraftkomponenten am Rotorblattabschnitt

Die beiden Kraftkomponenten in der Rotorebene berechnen sich mit dem Winkel β :

$$F_{au} = F_a \cdot \sin \beta \quad \text{und} \quad F_{wu} = -F_w \cdot \cos \beta \quad (11.10)$$

Wir erhalten als antreibende Kraft F_u für den betrachteten Abschnitt des Rotorblattes:

$$F_u = F_a \cdot \sin\beta - F_w \cdot \cos\beta \quad (11.11)$$

Der betrachtete Abschnitt des Rotorblattes soll den Flächenanteil $\Delta A = b \cdot \Delta r$ aufweisen, wobei b die Tiefe des Rotorblattes am betrachteten Ort darstellt. Mit den Kennzahlen für Auftrieb und Widerstand berechnet sich die Kraft F_u mit dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit.

$$F_u = (C_a \cdot \sin\beta - C_w \cdot \cos\beta) \cdot \Delta A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w_r^2 \quad (11.12)$$

Die Widerstandszahl C_w ist ca. 20–30-mal kleiner als die Auftriebszahl C_a , sodass der Vorfaktor in der Klammer positiv bleibt. Dieser Vorfaktor kann durch die Wahl einer geeigneten Schnelllaufzahl optimiert werden.

Mit der erwünschten Auftriebskraft verbunden ist eine Schubkraft F_s auf den Rotor, das ist verständlich, weil für die Gewinnung der Arbeitsleistung die Strömung letztendlich gestaut werden muss. Die Grafik im Bild 11.3 zeigt, dass die Schubkraft deutlich große Werte annehmen wird.

11.4 Optimale Rotorblattauslegung

Abschließend muss die Frage geklärt werden, welche Tiefe b das Rotorblatt am betrachteten Radius für einen optimalen Betrieb aufweisen muss. Für die Abschätzung der optimalen Blattiefe in Abhängigkeit vom Radius soll nur die Auftriebskraft berücksichtigt werden, der relativ kleine Widerstand wird vernachlässigt. Für das anteilige Drehmoment eines Flächenelementes erhalten wir aus Gl. (11.12)

$$\Delta M = r \cdot F_u \approx r \cdot C_a \cdot \sin\beta \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot w_r^2 \right) \cdot b \cdot \Delta r \quad (11.13)$$

Mit der Gleichung Gl. (11.9) für die Relativgeschwindigkeit wird das Drehmoment auf die Anströmgeschwindigkeit v_1 zurückgeführt:

$$\Delta M = \frac{4}{9} \cdot C_a \cdot \frac{r}{\sin\beta} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \right) \cdot b \cdot \Delta r \quad (11.14)$$

Die Winkelgeschwindigkeit des Rotors beträgt:

$$\omega = \lambda \cdot \frac{v_1}{R} \quad (11.15)$$

Die Anzahl der Blätter im Rotor wird mit z bezeichnet. Alle Flächenelemente im Bereich von r bis $r + \Delta r$ liefern den Leistungsanteil:

$$\Delta P = z \cdot \omega \cdot \Delta M = \frac{4}{9} \cdot z \cdot C_a \cdot \lambda \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{\sin \beta} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \right) \cdot b \cdot \Delta r \quad (11.16)$$

Nach den Überlegungen von BETZ kann aus dem Kreisring, den die betrachteten Flächenelemente bei der Rotation überstreichen, ein maximaler Leistungsanteil ΔP_{Betz} gewonnen werden.

Dieser hängt zunächst nicht von der Konstruktion der Maschine ab, sondern nur von der Kreisringfläche und der dritten Potenz der ungestörten Windgeschwindigkeit v_1 :

$$\Delta P_{\text{Betz}} = \frac{16}{27} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \right) \cdot (2\pi r \cdot \Delta r) \quad (11.17)$$

Die Blatttiefe der Rotorblätter muss nun so gewählt werden, dass die betrachteten Flächenelemente der Rotorblätter bei der gewählten Schnelllaufzahl und der daraus resultierenden Drehzahl gerade diese Leistungsausbeute erbringen.

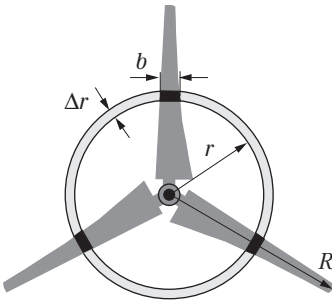


Bild 11.4 Zur Berechnung der Blatttiefe

Die Gleichheit beider Leistungsanteile liefert im ersten Schritt:

$$\frac{4}{9} \cdot z \cdot C_a \cdot \lambda \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{1}{\sin \beta} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \right) \cdot b \cdot \Delta r = \frac{16}{27} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \right) \cdot (2\pi r \cdot \Delta r) \quad (11.18)$$

Die Umstellung liefert mit dem Ausdruck für die Sinusfunktion nach Gl. (11.8) die Blatttiefe:

$$b = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{1}{z \cdot C_a} \cdot \frac{R}{\lambda} \cdot \sin \beta = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{1}{z \cdot C_a} \cdot \frac{R}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \lambda \right)^2}} \quad (11.19)$$

Für große Schnelllaufzahlen kann in der Wurzel die Eins vernachlässigt werden, sodass die unhandliche Wurzel verschwindet:

$$b \approx \frac{16\pi}{9} \cdot \frac{1}{z \cdot C_a} \cdot \frac{R^2}{\lambda^2} \cdot \frac{1}{r} \quad (11.20)$$

Diese Gleichung macht deutlich, dass die Blatttiefe nahezu umgekehrt proportional zum jeweiligen Radius gewählt werden muss. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Rotorblätter umso schlanker konstruiert werden können, je größer die Schnelllaufzahlen gewählt werden.

Die Widerstandszahl C_w in Gl. (11.12) berücksichtigt die Verluste, die durch die Umströmung des Profils auftreten, und die Verluste durch den induzierten Widerstand, der durch die Wirbelbildung an den Blattspitzen hervorgerufen wird.

Da der Anteil des induzierten Widerstandes mit wachsender Länge des Rotorblattes abnimmt, geht der Entwicklungstrend zu immer größeren Rotorradien, wobei gleichzeitig immer größere Nennleistungen erreicht werden.

Entlang des Rotorblattes ändern sich die Strömungsverhältnisse.

Für eine optimale Energieausnutzung müssen die Profile der einzelnen Flächenabschnitte der jeweiligen Strömungsgeschwindigkeit angepasst werden. Bei langsamen Geschwindigkeiten erzeugen dickbauchige Profile das beste Verhältnis zwischen Auftrieb und Widerstand. Bei hohen Geschwindigkeiten sind schlanke Profile vorteilhaft.

Das Rotorblatt ist daher aus vielen Profilabschnitten zusammengesetzt, die stetig ineinander übergehen und entsprechend der Strömungsrichtung verdreht sind.

11.5 Biegemoment am Rotorblatt

Jeder Blattabschnitt erfährt durch den aerodynamischen Auftrieb auch eine biegende Kraft. Aus der Grafik Bild 11.3 kann unter Vernachlässigung der Widerstandskraft eine Näherung entnommen werden:

$$\Delta F_S = C_A \cdot \Delta A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w_r^2 \cdot \cos \beta \quad (11.21)$$

Mit der optimalen Blatttiefe nach Gl. (11.19) wird das Flächenelement:

$$\Delta A = \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{1}{z \cdot C_a} \cdot \frac{R}{\lambda} \cdot \sin \beta \cdot \Delta r \quad (11.22)$$

Mit dem Ausdruck für die Relativgeschwindigkeit w_r nach Gl. (11.9) wird der Kraftanteil als Zwischenergebnis:

$$\Delta F_S = \frac{4}{9} \cdot \frac{8\pi}{3} \cdot \frac{\cos\beta}{\sin\beta} \cdot \frac{R}{z \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2\right) \cdot \Delta r \quad (11.23)$$

Mit der Formel für den Tangens des Anströmwinkels nach Gl. (11.7) erhalten wir den Kraftanteil in Abhängigkeit vom Radius:

$$\Delta F_S = \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{9} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2\right) \cdot r \cdot \Delta r \quad (11.24)$$

Dieser Kraftanteil liefert einen Beitrag zum Biegemoment am Fußpunkt des Rotorblattes:

$$\Delta M_B = r \cdot \Delta F_S = \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{9} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2\right) \cdot r^2 \cdot \Delta r \quad (11.25)$$

Das gesamte Biegemoment am Fußpunkt des Rotorblattes erhalten wir durch Integration:

$$M_B = \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{9} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2\right) \cdot \int_0^R r^2 dr = \frac{1}{z} \cdot \frac{16\pi}{27} \cdot R_R^3 \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2\right) \quad (11.26)$$

$$M_B = \frac{1}{z} \cdot \frac{16}{27} \cdot A_R \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2\right) \cdot R_R \quad (11.27)$$

11.6 Schubkraft auf die Rotorebene

Die Kraftanteile, die auf die Flächenelemente der Rotorblätter einwirken, summieren sich zu einer Gesamtkraft, die als Schubkraft F_S die Rotorwelle wirkt.

$$F_S = z \cdot \sum \Delta F_S \quad (11.28)$$

Der Übergang zu infinitesimalen Radienabschnitten liefert ein Integral:

$$F_S = \frac{16\pi}{9} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \cdot \int_0^R r dr = \frac{8\pi}{9} \cdot R^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \quad \text{mit} \quad A_R = \pi \cdot R^2 \quad (11.29)$$

Mit der gesamten vom Rotor überstrichenen Fläche A_R ergibt sich die Schubkraft:

$$F_S = \frac{8}{9} \cdot A_R \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \right) \quad (11.30)$$

Diese Schubkraft ist die Folge der im Kapitel 8.5.2 beschriebenen Druckdifferenz, die sich zwischen der Luv- und Leeseite des Rotorblattes aufbaut. Für den optimalen Betrieb gilt $v_3 = v_1/3$, somit wird die Druckdifferenz:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{F_S}{A_R} = \frac{8}{9} \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot v_1^2 \right) \quad (11.31)$$

Das Biegemoment am Fußpunkt des einzelnen Rotorblattes kann selbstverständlich mit der Schubkraft dargestellt werden. Der Vergleich von Gl. (11.27) mit Gl. (11.30) liefert das Biegemoment in Abhängigkeit von der Schubkraft:

$$M_B = \frac{1}{z} \cdot \frac{2}{3} \cdot F_S \cdot R_R = \frac{1}{z} \cdot F_S \cdot \frac{d_R}{3} \quad (11.32)$$

Die technischen Daten von Windkraftanlagen weisen oft nur die Nennleistung P_N und den Rotordurchmesser d_R aus. In diesen Daten ist implizit die notwendige Windgeschwindigkeit enthalten.

$$P_N = \frac{16}{27} \cdot A_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \quad \Rightarrow \quad v_1 = \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_N}{A_R \cdot \rho}} \quad (11.33)$$

Mit dem Ausdruck für die Strömungsgeschwindigkeit berechnet sich die Schubkraft nach Gl. (11.30) zu

$$F_S = \frac{8}{9} \cdot A_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{9}{4} \cdot \sqrt[3]{\frac{P_N^2}{A_R^2 \cdot \rho^2}} = \sqrt[3]{\rho \cdot A_R \cdot P_N^2} \quad (11.34)$$

Mit dem Rotordurchmesser erhalten wir die Schubkraft:

$$F_S = \sqrt[3]{\frac{\pi}{4} \cdot d_R^2 \cdot \rho \cdot P_N^2} \quad (11.35)$$

Sachwortverzeichnis

A

Abbildungsmaßstab 212
Absinken 143
Achse 164
Achse der virtuellen Doppelquelle 197
aerodynamische Auftriebskräfte 208, 215
aerodynamischer Auftrieb 238
Ähnlichkeit bei Strömungen 61
aktive Stall-Regelung 250
allgemeine EULER-Gleichung 100
allgemeine Gaskonstante 13
allgemeine Kontinuitätsgleichung 106
allgemeine Zustandsgleichung 13
angeströmte Platten 211
Anstellwinkel 220, 227, 228, 229
Anströmwinkel 241
Anzahl der Rotorblätter 239
äquidistant 185
Äquipotenzialflächen 184
Äquipotenziallinien 184, 194, 201
Arbeitsmaschinen 143, 159
Archimedisches Prinzip 19
Atmosphäre 26
Auftrieb 19, 20, 153
Auftriebsbeiwert 228
Auftriebskraft 21, 227, 230
Auftriebspunkt 21
Auftriebszahl 215, 228, 229, 238
Aufwindkraftwerke
 (Thermikkraftwerke) 11
Ausflussgeschwindigkeit 22
Ausflussgesetz 22
Ausweichbewegung 200
axiale Zugbelastung 25

B

Bahnkurven 61
Bar 17
barometrische Höhenformel 26, 27

Becherturbine 170
BERNOULLI-Gleichung 33, 34, 36, 100
Beschleunigung 95
BETZ 179, 239, 240, 244
BETZ-Gesetz 177, 179
Bewegungsgleichungen 95
Bezugsradius 188
Blattspitzen 245
Blatttiefe 243, 244, 245
Blende 37, 78, 79
B-Rohr 123

C

CrMo-Stahl 24
C-Rohr 115
 c_w -Werte 146

D

Dampfdruck 14, 40
Dampfdruck des Wassers 15
Dichte der feuchten Luft 14
Dichte von Flüssigkeiten 11
Dichte von Gasen 13
Dipolströmung 193
Divergenz 109
Doppelquellenströmung 199
Drall 119, 175, 179, 238
Drallverluste 239
Drehimpuls 119, 120
Drehmoment 55, 120, 164, 166, 238
Drehmomentenbelastung 252
Drei-Schluchten-Staudamm 23
Driftbewegung 49
Druck 16, 17
Druckdifferenz 98
Druckgasflaschen 32
Druckgefälle 54
Druckgradienten 184

Druckhöhe 81
Druckhöhenverlust 81, 82, 83
Druckkraft 24, 95, 98
Druckpunkt 224, 225
Druckseite 222
Druckverlust 71, 78, 82
 bei turbulenter Strömung 69
Druckverlustzahl 78
Druckwelle 155
Düse 114
dynamische Viskosität 48, 49, 57

E

Einbauteile 78
Energiebilanz 101, 102
Energieerhaltungssatz 33
Energieumwandlung 164
Energieversorgung 42
Entstaubung 149, 193
Erdgas 63
Erdgastrasse 24
Ergiebigkeit 187, 194, 205
Erhaltung der Masse 95
EULER 95
EULER-Gleichung 99, 101
EULER-Gleichung
 für Strömungsmaschinen 168
EULER-Momentensatz 168, 172
EULER-Strömungsmaschinenhauptgleichung
 erster Form 169
 zweiter Form 170

F

Fallhöhe 39, 42, 82
Fallschirmspringer 162
Feldgröße 100, 101
Feldkräfte (Gravitation) 95
Feuerwehr-Schlauch 72, 115
Flettner 219
Flügelstreckung 233
Flugzeuge 215

Flugzeugpropeller 175
Flugzeugtragfläche 35
Fluidgeschwindigkeit 58
Fluidstrahl 116
Fördermenge 87

G

Gasversorgung 63
GAUSSsche Zahlenebenen 201
Geschwindigkeitsabminderung 118
Geschwindigkeitsdreieck 169
Geschwindigkeitsgefälle 144
Geschwindigkeitskomponenten 96
Geschwindigkeitsvektor 96
Gesetz von HAGEN-POISEUILLE 65
Gleitflug 231
Gleitzahl 230
Golfbälle 153
Göttinger Profile 228
Gradient 99, 101, 143, 183
Gravitation 99
Grenzdurchmesser 149
Grenzschicht 143, 215, 238
Grenzschichtdicke 144

H

HAGEN 67
HAGEN-POISEUILLE-Gesetz 67
Halbkörper 205, 208
Heißluftballon 14
Hektopascal (hPa) 17
Hochbehälter 38, 81
Hochspannungsleitungen 239
hochviskose Fluide 59, 65, 143
Höhenkonstante 28
Horizontalebene 232
hydraulische Antriebe 18
hydrodynamisches Paradoxon 35
hydrostatisches Paradoxon 19

I

imaginäre Achse 203
Impuls 109
Impulsbilanz 117
Impulserhaltungssatz 95, 176
Impulssatz 109, 115
induzierter Widerstand 233, 239, 245
inkompressibel 12, 106
Inkompressibilität 175
inkompressible Medien 33
innere Reibung 52, 95, 151
instationäre Phase 111
instationäre Strömung 121
Internationales Einheitensystem (SI) 17
Inversion 202, 203
isotherme Gasströmung 91

J

JOUKOWSKI 208, 218
JOUKOWSKI-Funktion 208, 212
JOUKOWSKI-Profil 210
JOUKOWSKI-Transformation 183, 208, 209, 211, 215, 226, 228

K

Kamin 28
kartesische Koordinaten 205
kartesisches Koordinatensystem 209
Kavitation 39
Kennzahlen 228
kinematische Viskosität 48, 57, 87
kinetische Energie 22
kommunizierende Gefäße 17
komplexe Exponentialfunktion 209
komplexe Zahlen 183, 201
Kompressibilität 11, 87
Komprimierbarkeit 86
konforme Abbildung 183, 201, 202, 212
Kontinuitätsgleichung 33, 36, 86, 106, 109, 114, 175
Kontrollflächen 112, 114

konvektive Beschleunigung 96, 101, 144
Korrosion 40
Kräfte am Rotorblatt 242
Kräfte auf die Rohrwand 112
Kraftkomponenten 230
Kraftrichtungen 230
Kraftvektoren 98
kreisbogenförmige Platte 225
Kreispumpe 166, 167, 168, 181
Kreiskrümmung 79
kritische Höhe 40
kritische REYNOLDS-Zahl 59, 153
Kurvenform 61
KUTTA 218
KUTTA-JOUKOWSKI-Auftriebsformel 218

L

laminare Grenzschicht 152
laminare Rohrströmung 58, 65
laminare Strömung 52, 53
laminare Umströmung 147
lange Zylinder 184
Lastdrehmomente 250
Laufräder 164
Leerlaufdrehzahl 158
Leistungsausbeute 179
Leistungsbedarf 61, 75, 154
 bei Bewegung im Fluid 154
Leistungsselektronik 180
Leistungsregelung 250
LILIENTHAL 230
lineare Funktion 202
Logarithmus 204
lokale Beschleunigung 95
Luftdruck 17, 18, 25
Luftsäule 26

M

MACH-Kegel 156
MACH-Winkel 156
MACH-Zahl 155

MAGNUS 218
MAGNUS-Effekt 191, 215
Maschinenabmessungen 165
Maschinenquerschnitt 82
Massendichte 11
Massenstrom 116, 168
Massenträgheit 56
Maßstabsänderung 202
Maßstabsfaktor 61
Materialbelastbarkeit 227
maximale Schnelllaufzahl 159
Millibar (mbar) 17
mittlere freie Weglänge 49
mittlere Rautiefe 69
mm Quecksilbersäule 25
molare Masse 13
molekulare Kräfte 143
MOODY 69
MOODY-Diagramm 69, 70

N

Nachlaufeffekt 238
Nenndrehzahl 165
Nennleistung 42, 82
NEWTON 48
NEWTON-Reibungsgesetz 48, 65, 143
NEWTONsche Flüssigkeit 65
NEWTONsches Modell 49
nicht stationäre Strömungen 100
nicht-NEWTONsche Flüssigkeiten 52
Normalenvektor 18
normaler Luftdruck 13
Normalkraft 24
Normbedingungen 88
Normdichte 13
Normdruck 87

O

Oberflächenbeschaffenheit 56
Oberflächenprofil 69
optimale Relativgeschwindigkeit 172

optimale Schnelllaufzahl 159
orthogonale Kurvenscharen 202
orthogonale Stromlinien 201
ortsabhängige Druckdifferenzen 223
Ortsabhängigkeiten von Geschwindigkeiten
und Druckdifferenz 223
Ostsee-Pipeline 89

P

Parallelströmung 185, 198, 199
Parallelverschiebung 202
PASCAL 17
PELTON 170
PELTON-Rad 172
PELTON-Turbine 123, 170, 171
Pipeline 86
PITCH-Regelung 250
Plattentiefe 145
POISEUILLE 67
Polardiagramm 230
Polardiagramm, verzerrtes 231
Polarkoordinaten 202, 205
Potenzial 183, 184
Potenzialfunktion 184
Potenzialströmung 183, 215, 238
potenzielle Energie 22
Potenzreihe 83
PRANDTL 233
PRANDTL-Staurohr 37, 46
Profilabschnitte 245
Profile 227, 228
Propeller 176
Propellerebene 175
psi 17
Pumpen 21, 61, 121, 164
Pumpenaufwand 73
Pumpenlaufrad 169
Pumpleistung 76
Pumpspeicherwerke 42

Q

Quecksilberbarometer 25
Quelle 193
Quelle-Senke-Feld 194
Querschnittsveränderung 118

R

Radialströmung 186, 205
Randeinflüsse 233, 239
Reaktionskraft 25, 111, 114, 117, 118
reale Zylinderumströmung 198, 208
reibungsfreie Umströmung 175
Reibungskraft 53, 143, 149, 153, 229
Reibungsverlust 232
Reisegeschwindigkeit 234
relative Luftfeuchte 14
relative Rautiefe 70
relative Volumenänderung 107
relativer Druckhöhenverlust 83
relativer Leistungsverlust 83
Relativgeschwindigkeit 164, 166, 240
REYNOLDS 56
REYNOLDS-Zahl 48, 56
Richtungsänderung 164
Rohrdurchmesser 83
Rohrkrümmer 78
Rohrleitung 75
Rohrreibungskoeffizient 71
Rohrströmung 64
Rotation 190, 216
Rotor 240
Rotorachse 180
Rotorblattauslegung 243
Rotorblätter 186, 208, 240
Rotorblattspitzen 180
Rotordurchmesser 180
Rotorebene 177, 240
Rotorspitzen 239
Rotorspitzen Geschwindigkeit 239
Rückstoß 114
Rückstoßkraft 115, 173

S

Saugseite 222
Schalenkreuz 156
Schalenkreuz-Anemometer 156, 157
Schallausbreitung 109
Schallgeschwindigkeit 155
Schaufel 164
Schaufelbewegung 164
Schaufelflächen 121
Schaufelform 165
Schaufelgeschwindigkeit 165
schaufelkongruente Bahnen 166
Schaufelneigung 165
Schichtenströmung 53
Schnelllaufzahl 157, 238, 239, 244, 250, 252
Schornstein 28
schräg angeströmte Platte 220
Schubkraft 176
Schweredruck 15, 16
Schwerkraft 99
Schwimmen 21
Segelflugzeug 46, 231
Senke 193
Sinken einer Kugel
 bei laminarer Umströmung 148
 bei turbulenter Umströmung 153
Sinkgeschwindigkeit 143, 153
Sinusfunktion 203
skalare Funktion 183
Sperrkreisradius 150
spezifische Gaskonstante 13
spezifische Leistung 169
Standardwert 180
Startgeschwindigkeit 234
stationäre Sinkgeschwindigkeit 148, 154
stationäre Strömung 110, 184
Staubpartikel 149
Staudruck 146
Staupunkt 198, 216, 221, 226
Staupunktverschiebung 221
Stausee 42

Stoffkonstanten 11
 einiger Flüssigkeiten 11
 einiger Gase 14
Stoffmenge 13
STOKES 147
STOKES-Gesetz 149
STOKES-Reibungsgesetz 147
Stoßverlust 117
Strahldruck 116
Stromfaden 111
Stromlinien 100, 112, 183, 184, 194, 205
Stromröhre 110, 120
Strömungen in Rohrsystemen 61
Strömungsbeginn 103, 105
Strömungsfeld 95, 184
Strömungsgeschwindigkeit 33, 78, 144, 164, 227
Strömungsmaschinen 164
Strömungspotenzial 183
Strömungsquerschnitte 33
Strömungsverhältnisse 165
Strömungswiderstand 31, 160, 207
 bei isothermer Gasströmung 86
Strömungszustände 228
SUTHERLAND-Konstante 50

T

tangentiale Zugspannung 25
TAYLOR-Reihe 30
Temperaturabhängigkeit
 der Viskosität von Flüssigkeiten 51
 der Viskosität von Gasen 50
theoretischer Wirkungsgrad 179
Tischtennisball 162
TORR 25
TORRICELLI 22, 82
TORRICELLI-Ausströmung 115
TORRICELLI-Problem 23
TORRICELLI-Vakuum 26
Tragflächen 184, 186, 208, 222, 223
Tragflügel 215, 227, 229
Tragflügelprofile 209

Trägheitskräfte 95, 110, 111
Transformation 201
 mit Logarithmus 205
Transformation durch Inversion 204
Turbinen 42, 82, 121, 164, 169
Turbinenlaufrad 169
Turbinenwelle 173
turbulente Grenzschicht 152
turbulente Rohrströmungen 59
turbulente Strömung 53, 56, 76
turbulente Umströmung 151
Turbulenzen 58, 76, 221

U

Überdruck 29, 112
überkritische Strömung 153
Überschallgeschwindigkeit 156
Überschall-Umströmung 155
Umfangsgeschwindigkeit 164, 165
Umgebungsdruck 176
Umlaufgeschwindigkeit 240
Umlaufintegral 186
Umschlaggeschwindigkeit 59
Umströmung 61, 143, 183
untere Grenzkurve 70
unterkritische Strömung 152

V

Vakuum 26
VENTURI-Düse 35, 46, 79
vereinfachter Propeller 175
vertikale Strömung 233
Verwirbelungen 118
virtuelle Doppelquelle 197, 198, 204
Viskosität 48, 149
Viskosität von Flüssigkeiten 51
Viskosität von Gasen 49
Viskosität, geringe 143
vollständig turbulente Strömung 152
Volumenausdehnungskoeffizient 11
Volumenelement 53, 54, 108

Volumenmesstechnik 37
Volumenstrom 37, 42, 75, 83
volumetrischer Mittelwert 57, 67

W

waagerechte Rohrleitungen 81
Wandkräfte in Rohren 23
Wandstärke 24
Wasserdampf 14, 50
Wasserkraftanlagen 82
Wasserkraftwerk 181
Wasserkühlung 63
Wechselwirkungen 112
Widerstandsbeiwert 228
Widerstandskraft 143, 145, 215, 230, 238
Widerstandszahl 146, 215, 228, 229, 238
Windgeschwindigkeit 44, 157, 158, 180, 181, 239
Windkanal 63, 162
Windkraftanlage 177, 215, 240
Windmühlen 164
Windrad 44, 178
Windströmung 157, 240
Winkelbereich 229
Winkelbeziehungen am Rotor 240
Winkelgeschwindigkeit 169, 190
Winkelverhältnisse am Tragflügel 231
Wirbel 221
Wirbelablösung 221, 227

Wirbelbildung 151, 180, 215, 238, 245
wirbelfreie Strömung 190
Wirbelquelle 191
Wirbelschleppe 233, 234
Wirbelsenke 149
Wirbelströmung 150
Wirbelzöpfe 233
Wirkungsgrad 42, 159, 178, 239
Wölbung 227

Z

Zähigkeit 48
Zahlenebene 206
Zeitkonstante 104
Zentrifugalkraft 149
Zirkulation 185, 186, 188, 190, 215, 216
Zirkulationsströmung 188, 205, 216, 226, 227
Zugkraft 24
Zugluft 34
Zugspannung 24
Zulaufgeschwindigkeit 173
zusätzliche Zirkulationsströmung 221
Zustandsgleichung 87
zweidimensionale Potenzialströmungen 184
zweidimensionale Strömungsfelder 184
zylindrische Dipolströmung 193
zylindrische Radialströmung 187