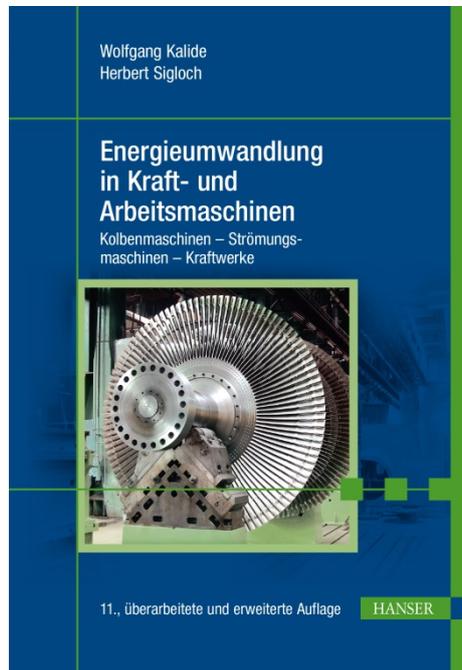


HANSER



Leseprobe

zu

„Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen“

von Wolfgang Kalide und Herbert Sigloch

Print-ISBN: 978-3-446-46121-5

E-Book-ISBN: 978-3-446-46122-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46121-5>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Aufgabe dieses Buches ist es, den Studierenden der Ingenieurwissenschaften eine leicht verständliche und doch grundlegende Einführung in das komplexe Gebiet der Energieumwandlungen zu geben, die sie befähigt, sich bei Bedarf mit den zahlreich vorhandenen Spezialwerken weiterzubilden. Diese Aufgabenstellung erhält durch die Betonung der Grundlagen in der Ingenieurausbildung ihre Berechtigung, sie bedingt jedoch eine Straffung des Stoffes, ohne dass jedoch Wesentliches unterschlagen wird.

Das Buch gibt in einfacher Form zunächst einen Einblick in die physikalischen Grundlagen der Wärme- und Strömungslehre. Danach werden die technischen Vorgänge in Kolben- und Strömungsmaschinen erläutert, wobei weniger auf eine katalogmäßige Beschreibung als vielmehr auf die Verständlichkeit und physikalisch richtige Wiedergabe der Energieumwandlungsvorgänge Wert gelegt wurde. Den Kraftanlagen ist ein weiteres Kapitel gewidmet, weil im Zeitalter der Energiekrisen die Kenntnis der Umwandlungen von Primär- in Sekundärenergie mit den dabei auftretenden Verlusten zur technischen Grundausbildung gehören muss.

Im Vordergrund stand, den einzelnen Maschinen entsprechend ihrer heutigen Bedeutung gerecht zu werden. Dennoch wird es nicht ausbleiben, dass Hochschullehrer und Fachleute aus der Industrie gerade in ihrem Fachgebiet oder bei der von ihnen hergestellten oder betriebenen Maschine diesen oder jenen Hinweis vermissen werden. Die Interessenten dieses Buches mögen bitte berücksichtigen, dass ein Kompendium anderen Regeln unterliegt als ein ausführliches Fachbuch. Und wenn bei der einen oder anderen Maschine die Abbildungen nicht den allerletzten Stand der Technik widerspiegeln, dann ist das nicht ein fehlerhaftes Versäumnis des Verfassers, sondern vielmehr gewollt, weil solche Abbildungen die technischen Zusammenhänge meist übersichtlicher veranschaulichen als allermodernste, bei denen oft nur noch der Fachmann in der Fülle des Dargestellten das ursprüngliche Konzept erkennt.

Das früher von Prof. Wolfgang Kalide betreute Buch wurde weitgehend sowie sinnvoll aktualisiert und ergänzt. Auch wurden Unklarheiten beseitigt.

Dem Carl Hanser Verlag und der zuständigen Lektorin, Frau Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg, gebührt großer Dank für die Herausgabe des Buches.

Herbert Sigloch

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
Formelzeichen und Einheiten	11
1 Einleitung	13
1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung	13
1.2 Energieumwandlung in der Technik	14
2 Theoretische Grundlagen	17
2.1 Allgemeine physikalische Größen	17
2.2 Hydromechanik	19
2.2.1 Hydrostatik	19
2.2.2 Kontinuitätsgleichung	20
2.2.3 Bernoullische Gleichung	21
2.2.3.1 Düse und Diffusor	22
2.2.3.2 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten	24
2.2.4 Strömung in Rohrleitungen	25
2.2.5 Druckenergieverlust in Rohrleitungen	27
2.2.6 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	28
2.2.7 Kavitation und Verdichtungsstoß	30
2.3 Wärmetechnik	32
2.3.1 Thermische Zustandsgrößen	32
2.3.2 Erster Hauptsatz	33
2.3.3 Spezifische Wärmekapazität	35
2.3.4 Enthalpie	37
2.3.5 Zustandsgleichungen des idealen Gases	40
2.3.5.1 Thermische Zustandsgleichung	40
2.3.5.2 Kalorische Zustandsgleichung	42
2.3.6 Zweiter Hauptsatz	43
2.3.6.1 Entropie	43
2.3.6.2 Darstellung der Entropie durch thermische Zustandsgrößen	44
2.3.6.3 Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	44
2.3.6.4 Exergie	45
2.3.6.5 T, s- oder Wärmediagramm	45
2.3.7 Technisch wichtige Zustandsänderungen	47
2.3.8 Gasgemische	51
2.3.9 Normalatmosphäre (Aerostatik)	51
2.3.10 Feuchte Gase	52
2.3.11 Strömung mit großen Druckänderungen	52
2.3.11.1 Dynamische Temperatur	52
2.3.11.2 Totalzustand (Gesamtzustand, Ruhezustand)	53
2.3.12 Kreisprozesse	53
2.3.13 Laval-Düse	54
2.3.14 Zustandsänderungen des Wasserdampfes	60
2.3.15 Arbeitsvermögen des Wasserdampfes	62
2.3.15.1 Nutzarbeit im T,s-Diagramm	62
2.3.15.2 Nutzarbeit im h,s-Diagramm	63
2.3.15.3 Nutzarbeit im p,v-Diagramm	64

2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	65
2.3.16.1	h,T-Diagramm	69
2.3.17	Wärmedurchgang	70
2.3.17.1	Wärmeübergang durch Berührung	71
2.3.17.2	Wärmeübergang durch Strahlung	73
2.4	Wirkungsgrade der Maschinen	74
2.5	Vergleich der Kolben- und Strömungsmaschinen	76
2.6	Regelung	77
3	Kolbenmaschinen	86
3.1	Ventilsteuerung	86
3.2	Kurbeltrieb	86
3.2.1	Kräfte am Kurbeltrieb	86
3.2.2	Tangentialkraftdiagramm	89
3.2.2.1	Ableitung der Bewegungsverhältnisse beim Kurbeltrieb	89
3.2.2.2	Gesamttangentialkraft	90
3.2.3	Schwungradberechnung	93
3.2.4	Massenausgleich	95
3.2.5	Kräfteausgleich bei der Mehrzylindermaschine	98
3.2.6	Momentenausgleich bei Mehrzylindermaschinen	99
3.3	Kolbenpumpen (Verdrängerpumpen)	102
3.3.1	Kolbenpumpen mit hin- und hergehendem Kolben	102
3.3.1.1	Wirkungsweise	102
3.3.1.2	Fördervolumen	104
3.3.1.3	Saughub	106
3.3.1.4	Druckhub	109
3.3.1.5	Pumpenventile	109
3.3.1.6	Wirkungsgrade	110
3.3.1.7	Sonderformen	111
3.3.2	Drehkolbenpumpen	112
3.3.3	Flüssigkeitsringpumpen	113
3.4	Verdrängungsverdichter	114
3.4.1	Kolbenverdichter	115
3.4.1.1	Thermodynamik der Kolbenverdichter	115
3.4.1.2	Schädlicher Raum	117
3.4.1.3	Wirkliche Verdichtung	120
3.4.1.4	Volumetrischer Wirkungsgrad	120
3.4.1.5	Indizierter Wirkungsgrad; indizierte Leistung	122
3.4.1.6	Mechanischer Wirkungsgrad; Antriebsleistung	123
3.4.1.7	Mehrstufige Kolbenverdichter	123
3.4.1.8	Regelung	125
3.4.2	Rotationsverdichter	127
3.4.2.1	Roots-Gebläse	127
3.4.2.2	Drehkolbenverdichter	129
3.4.2.3	Flüssigkeitsringpumpen als Verdichter	130
3.5	Kolbenmotoren	131
3.5.1	Arbeitsverfahren	132
3.5.2	Aufbau der Kolbenmotoren	132
3.5.3	Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade	133
3.5.4	Ottomotor (Viertakt)	135
3.5.4.1	Gemischbildung	139

3.5.4.2	Zündung	145
3.5.4.3	Abgasbehandlung	147
3.5.5	Dieselmotor (Viertakt)	148
3.5.5.1	Vergleich Ottomotor – Dieselmotor	150
3.5.5.2	Einspritzung und Gemischbildung	151
3.5.6	Steuerung des Gaswechsels bei Viertaktmotoren	165
3.5.7	Zweitaktverfahren	166
3.5.7.1	Nachladung beim Zweitaktverfahren	169
3.5.8	Gegenüberstellung von Zweitakt und Viertakt	171
3.5.8.1	Wärmebelastung und Kühlung	171
3.5.8.2	Mechanische Belastung und Schmierung	171
3.5.9	Kreiskolbenmotor (Wankelmotor)	173
3.5.10	Freikolbenmotoren	175
3.5.11	Aufladung	176
3.5.12	Stirlingmotor	181
3.5.13	Kraftstoffe	184
3.5.14	Kühlung	186
3.5.15	Mehrzylinder-Anordnungen	187
3.5.16	Ausführungsbeispiele von Kolbenmotoren	189
3.5.17	Betriebsverhalten der Motoren	197
3.5.18	Alternative Antriebe	200
4	Strömungsmaschinen	201
4.1	Arbeitsverfahren der Strömungsmaschinen	201
4.2	Geschwindigkeitsplan	203
4.2.1	Geschwindigkeiten am radialen Laufrad	206
4.2.2	Geschwindigkeiten am axialen Laufrad	206
4.3	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	206
4.4	Strömungsarbeitsmaschinen	207
4.4.1	Gemeinsame Grundlagen der Strömungsarbeitsmaschinen	207
4.4.1.1	Radial durchströmte Maschinen	207
4.4.1.2	Axial durchströmte Maschinen	231
4.4.2	Festlegung der Schaufelzahl	241
4.4.3	Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen	242
4.4.3.1	Betriebspunkt	242
4.4.3.2	Kennliniendiagramm	243
4.4.3.3	Drehzahlregelung	244
4.4.3.4	Labiler Zweig der Kennlinie	245
4.4.3.5	Parallelförderung von Kreiselpumpen	245
4.4.3.6	Pumpen bei Kreiselerdichtern	246
4.4.3.7	Betriebsverhalten der Radialverdichter	247
4.4.3.8	Betriebsverhalten der Axialverdichter	248
4.4.4	Vergleich der Kolben- und Strömungsmaschinen	249
4.4.5	Kreiselpumpen	249
4.4.5.1	Leistung und spezifische Förderarbeit	249
4.4.5.2	Saughöhe und Kavitation	250
4.4.5.3	Spezifische Drehzahl und Bauarten	252
4.4.5.4	Ausgleich des Achsschubes	253
4.4.5.5	Sonderformen der Kreiselpumpe	256
4.4.6	Wasserstrahlpumpen (Ejektoren)	259
4.4.7	Turboverdichter	260
4.4.7.1	Thermodynamik der Turboverdichter	260

4.4.7.2	Radialverdichter	270
4.4.7.3	Axialverdichter	273
4.4.8	Propeller	274
4.4.8.1	Luftschrauben	275
4.4.8.2	Schiffsschrauben	277
4.5	Strömungskraftmaschinen	277
4.5.1	Energieumwandlung im Leitapparat	279
4.5.2	Energieumwandlung im Laufrad	280
4.5.2.1	Energieumwandlung im radialen Laufrad	280
4.5.2.2	Energieumwandlung im axialen Laufrad	282
4.5.3	Verluste, Wirkungsgrade, Leistungsbegriffe	283
4.5.4	Kenngrößen von Strömungskraftmaschinen	287
4.5.5	Wasserturbinen	291
4.5.5.1	Francis-Turbine	291
4.5.5.2	Kaplan-Turbine	293
4.5.5.3	Laufradformen	296
4.5.5.4	Saugrohr	298
4.5.5.5	Freistrah-(Pelton-)Turbine	300
4.5.5.6	Wirkungsgrade von Wasserturbinen	303
4.5.5.7	Durchströmturbine	304
4.5.6	Dampfturbinen	304
4.5.6.1	Leitapparate	306
4.5.6.2	Gleichdruckstufe	309
4.5.6.3	Überdruckstufe	309
4.5.6.4	Geschwindigkeitsstufung	312
4.5.6.5	Druckstufung	315
4.5.6.6	Regelung der Dampfturbinen	317
4.5.6.7	Mehrstufige Großturbinen	320
4.5.6.8	Gegendruck- und Entnahmeturbinen	323
4.5.7	Gasturbinen	324
4.5.7.1	Offene Gasturbinenanlagen	324
4.5.7.2	Geschlossene Gasturbinenanlagen	329
4.5.7.3	Kombianlagen	330
5	Grundlagen der Energiewirtschaft	331
5.1	Energiespeicherung	335
5.2	Bedarfsdeckung	338
5.3	Energieverteilung	339
5.4	Deckung von Bedarfsabweichungen	340
5.5	Energieentstehungskosten	341
5.5.1	Feste Kosten	341
5.5.2	Veränderliche Kosten	343
5.6	Einteilung der Kraftwerke (Energieanlagen)	344
6	Wasserkraftwerke	345
6.1	Pumpspeicherkraftwerke	347
6.2	Gezeitenkraftwerke	348
6.2.1	Doppelt wirkende Einbeckenanlage	349
6.2.2	Zweibeckenanlage	350
7	Dampfkraftwerke	352
7.1	Kondensationskraftwerke	352
7.2	Kraft-Wärme-Kopplung	358

7.3	Regelung in Dampfkraftwerken	361
7.3.1	Festdruck- oder Gleitdruckbetrieb	364
7.3.1.1	Festdruckbetrieb	364
7.3.1.2	Gleitdruckbetrieb	365
7.3.1.3	Modifizierter Gleitdruckbetrieb	366
7.4	Dampferzeugung	366
7.4.1	Wärmeumsatz	367
7.4.2	Prinzip der technischen Dampferzeugung	368
7.4.3	Dampferzeuger	370
7.4.3.1	Wasserrohrkessel mit Naturumlauf	372
7.4.3.2	Wasserrohrkessel mit Zwangsumlauf	372
7.4.3.3	Wasserrohrkessel mit Zwangsdurchlauf	372
7.4.3.4	Schiffskessel	375
7.4.3.5	Kessel mit Druckfeuerung	375
7.4.4	Feuerungen	375
7.4.4.1	Schmelzfeuerungen	379
7.4.5	Luftvorwärmer	381
7.4.6	Zugerzeugung	382
7.4.6.1	Schornsteinzug	383
7.4.6.2	Saugzug	384
7.4.7	Speisewasseraufbereitung	385
8	Gasturbinen-Kraftanlagen	386
8.1	Einsatz von Gasturbinen-Kraftanlagen	386
8.2	Gasturbinen-Anlagen als Speicherkraftwerke	388
9	Nutzung der Windenergie	390
9.1	Vorbemerkungen	390
9.2	Windangebot	391
9.3	Aerodynamische Grundlagen	392
9.3.1	Einführung	392
9.3.2	Windenergie und Windleistung	393
9.3.3	Windturbinenleistung	393
9.3.4	Axialkraft	395
9.3.5	Kennwerte	396
9.3.6	Ausführungshinweise	396
9.3.7	Vereinfachte Propellertheorie	397
9.3.8	Kennzahlen	400
9.3.9	Zusammenfassung der Einflüsse bei Windturbinen	400
10	Geothermische Kraftanlagen und Meereswellenkraftwerke	402
10.1	Geothermische Kraftanlagen	402
10.2	Meereswellenkraftwerke	404
11	Verwertung von Abfallenergie	405
11.1	Abhitzeessel	405
11.2	Wärmepumpen	406
11.3	Müllverbrennung	406
	Weiterführendes Schrifttum (Auswahl)	409
	Stichwortverzeichnis	410

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemeine physikalische Größen

Masse

Die Masse ist eine physikalische Größe, allgemein durch die Gewichtskraft F_G (auch mit G bezeichnet) und Trägheit eines Körpers gekennzeichnet.

$$m = F_G/g \quad (2.1)$$

Die Massebestimmung eines Körpers erfolgt durch Vergleichen mit Wägestücken bekannter Masse auf Waagen.

Bei beschleunigten Körpern ist

$$m = F/a \quad (2.2)$$

Dichte

Die Dichte ρ eines Stoffes ist das Verhältnis seiner Masse m zu seinem Volumen V .

$$\rho = m/V \quad (2.3)$$

Das spezifische Volumen ist der Kehrwert der Dichte.

$$v = 1/\rho = V/m \quad (2.4)$$

Druck

Druck entsteht durch Wirkung einer Kraft auf eine Fläche, Dehnung (Erhöhung der kinetischen Molekularenergie) im geschlossenen Gefäß oder Verkleinerung des Volumens einer Masse, z. B. durch Kolben in einem Zylinder.

$$p = F_n/A \quad F_n = \text{Normalkraft} \perp \text{Fläche} \quad (2.5)$$

Druck ist auch eine spezifische Energiegröße.

$$p = E/V \quad (2.6)$$

Die Druckmessmethoden, die es im Allgemeinen nur erlauben, Druckdifferenzen zu messen (Ausnahme: Barometer), zwingen zur Unterscheidung in

Absolutdruck $p, p = 0$ bedeutet 100 % Vakuum

Differenzdrücke

Überdruck $p_{\bar{u}} = p - p_B$ mit p_B barometrischer Luftdruck (Atmosphärendruck)

Unterdruck $p_u = p_B - p = -p_{\bar{u}}$ (Bild 2.1).

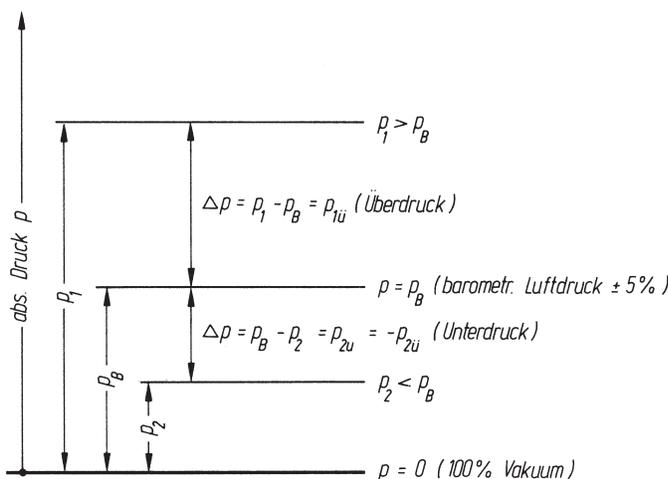


Bild 2.1 Absoluter Druck, Über- und Unterdruck

Fallbeschleunigung

Die Fallbeschleunigung ist die Beschleunigung, die einem Körper durch die Schwerkraft einer Masse erteilt wird, wenn der Körper in freiem, ungebremstem Fall auf die Masse zufällt.

Die Fallbeschleunigung bzw. Schwerebeschleunigung, die durch eine große Masse wie z. B. die Erde verursacht wird, lässt sich mit Hilfe der Gesetze von *Newton* ermitteln.

Die Fallbeschleunigung g der Erde ist nicht an allen Punkten der Erde gleich groß, sondern abhängig von der geografischen Breite. Aus diesem Grunde wurde international die Normalfallbeschleunigung $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2 \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ vereinbart und Index n meist weggelassen.

Kraft

Eine Kraft F ist nur an ihrer Wirkung erkennbar. Man unterscheidet Kraftwirkung, die eine Änderung der Geschwindigkeit (Beschleunigung) einer Masse verursacht

$$F = m \cdot a \quad (2.7)$$

und Kraftwirkung, die eine Änderung der äußeren Form eines Körpers verursacht

$$F = p \cdot A \quad (2.8)$$

Drehmoment

Ein Drehmoment M (auch mit T bezeichnet) wird ausgeübt durch eine Kraft, die an einem Hebelarm r angreift

$$M = F \cdot r \quad \text{mit} \quad r \perp F \quad (2.9)$$

Arbeit

Arbeit ist eine Energieform, die der Energieübertragung dient als Druck- oder Zugarbeit

$$W = F \cdot s \quad (2.10)$$

oder als Hubarbeit

$$W = G \cdot z \quad (2.11)$$

bei Rotation mit konstantem Drehmoment

$$W = M \cdot \alpha \quad (2.12)$$

Spezifische technische Arbeit (Index t) bei Kolbenmaschinen (KoM)

$$w_t = W/m$$

jedoch bei Strömungsmaschinen (StM)

$$Y = w_t = W/m$$

Y bei hydraulischen, w_t bei thermischen Maschinen (KoM und StM)

um Verwehlungen mit der Relativgeschwindigkeit w auszuschließen.

Leistung

Unter Leistung versteht man die auf die Zeiteinheit bezogene Arbeit bzw. die Stärke eines gleichbleibenden Energiestromes bei Umwandlungsvorgängen, also da zeitlinear gilt

$$dW/dt = \Delta W/\Delta t = W/t:$$

$$P = W/t = F \cdot c = E/t = Q/t \quad (2.13)$$

Energie

Energie ist eine messbare Größe in verschiedenen Erscheinungsformen, deren Gesamtbetrag sich nicht ändert. Sie befähigt ein System, äußere Wirkungen hervorzubringen. Sie kann gespeichert, an ein System gebunden oder systemgrenzenüberschreitend auftreten. Ein Teilbetrag der Energie, die Exergie, ist ihr größtmöglicher, in technische Arbeit oder jede andere Energieform umwandelbarer Anteil. Den verbleibenden, nicht mechanisch nutzbaren Energierest nennt man Anergie.

Energieformen

- Mechanische Energie, bestehend aus potentieller Energie (Energie der Lage und Energie der Spannung) und kinetischer Energie.
- Thermische Energie (innere Energie, Enthalpie, Wärme).
- Elektrische Energie, einschließlich magnetischer Energie und Strahlungsenergie.
- Chemische Energie, d. h. molekulare und atomare Bindungsenergie.
- Massenenergie, also Kernspaltung (Fission) und Kernverschmelzung (Fusion).

2.2 Hydromechanik

2.2.1 Hydrostatik

Eine ruhende Flüssigkeit (tropfbares Fluid) kann nur Normalkräfte und von diesen wiederum nur Druckkräfte aufnehmen.

Die Oberfläche einer ruhenden Flüssigkeit ist bestrebt, ein Minimum anzunehmen. Sie stellt sich in jedem Punkt senkrecht zur Resultierenden aller auf diesen Punkt wirkenden Kräfte, da gemäß *Newton-Fluidreibungsgesetz* keine Scherkräfte vorhanden.

Der hydrostatische Druck im Innern von Flüssigkeiten wirkt gleichmäßig nach allen Richtungen, *Druckfortpflanzungsgesetz* nach *Pascal*.

Der hydrostatische Druck nimmt linear proportional zur Tiefe der Flüssigkeit zu, sog. *hydrostatisches Grundgesetz*. Er ist nur abhängig von der Höhe z der Flüssigkeitssäule über dem Messpunkt und von der Dichte ρ der Flüssigkeit.

$$p = p_B + g \cdot \rho \cdot z \quad (2.14)$$

p_B barometrischer Luftdruck (Umgebungsdruck)

Wenn die Flüssigkeit in einem abgeschlossenen Behälter unter dem Überdruck $p_{\bar{u}}$ steht oder wenn auf die eingeschlossene Flüssigkeit an irgendeiner Stelle der Überdruck $p_{\bar{u}}$ ausgeübt wird, pflanzt sich dieser durch die Flüssigkeit gleichmäßig fort und addiert sich deshalb an jeder Stelle dem vorhandenen Schweredruck nach Gl. 2.14.

$$p = p_B + p_{\bar{u}} + g \cdot \rho \cdot z \quad (2.15)$$

Auf einen in ein Fluid getauchten Körper wirkt eine Auftriebskraft F_A , die gleich der Gewichtskraft F_G des vom Körper verdrängten Fluidvolumens V_{F1} ist.

$$F_A = \rho_{F1} \cdot g \cdot V_{F1} = g \cdot m_{F1} \quad (V_{F1} = V_K \text{ bei vollständigem Eintauchen}) \quad (2.16)$$

Die Auftriebskraft greift im Massenschwerpunkt des verdrängten Fluidkörpers an.

Im Schwimmgleichgewicht ist die Auftriebskraft F_A gleich der Schwere- oder Gewichtskraft F_G oder G des schwimmenden Körpers mit Volumen V_K , also wenn $F_A = F_G = V_K \cdot \rho_K \cdot g$.

2.2.2 Kontinuitätsgleichung

Der einfachste Fall einer eindimensionalen Strömung besteht in einer geraden Rohrleitung mit wechselndem Querschnitt (Bild 2.2). Die Strömung soll **stationär** sein, d. h. in jedem Punkt des Feldes soll die zugeordnete Geschwindigkeit nach Größe und Richtung sowie Zeit unveränderlich bleiben c_1 an Stelle 1 und c_2 an Stelle 2.

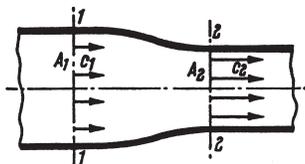


Bild 2.2 Rohrleitung mit wechselndem Querschnitt

Wenn die Flüssigkeit, besser das Fluid, kontinuierlich strömen soll, so muss in jedem Querschnitt, z. B. 1–1 oder 2–2, die sekundlich durchströmende Menge, d. h. der **Durchsatz**

$$dm/dt = \dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot A \cdot c \quad (2.17a)$$

sog. *Durchflussgleichung*

Gemäß Massenerhaltung muss $\dot{m} = \text{konst.}$ sein, also

$$\dot{m} = A_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1 = A_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2 \quad (2.17b)$$

Kontinuitätsgleichung für kompressible Fluide

Für einen beliebigen Querschnitt gilt somit allgemein die Kontinuitätsgleichung, kurz Kontigleichung

$$\dot{m} = A \cdot c \cdot \rho = \text{konst.} \quad (2.18)$$

Der Ausdruck $\frac{\dot{m}}{A}$ ist die **Stromdichte** $= c \cdot \rho$ oder $= \frac{c}{v}$ mit $v = \frac{1}{\rho}$ spezifisches Volumen.

In Differenzialform geschrieben (über Produktregel) lautet die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (2.19)$$

Wegen $\rho = 1/v$ ist $\rho \cdot v = 1$ und differenziert $\rho \cdot dv + v \cdot d\rho = 0$.

Daraus $d\rho/\rho = -dv/v$ und die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{dv}{v} = \frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} \quad (2.20)$$

Für inkompressible, d.h. raumbeständige Flüssigkeiten ist, da die Dichte ρ konstant,

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho$$

und damit

$$A_1 \cdot c_1 = A_2 \cdot c_2 \quad (2.21)$$

Kontinuitätsgleichung für inkompressible Fluide

oder

$$\dot{V} = A \cdot c = \text{konst.} \quad (2.22)$$

2.2.3 Bernoullische Gleichung

Wenn die beiden Strömungsquerschnitte A_1 und A_2 in Bild 2.2 nicht auf gleicher Höhe z liegen, sondern auf z_1 und z_2 über einer beliebig gewählten Bezugsebene, gilt nach *Bernoulli*

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + \frac{c_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{c_2^2}{2g} \quad (2.23)$$

Man bezeichnet

$$\left. \begin{array}{l} z \quad \text{als Ortshöhe} \\ \frac{p}{\rho \cdot g} \quad \text{als Druckhöhe} \end{array} \right\} z_1 + \frac{p}{\rho \cdot g} \quad \text{als statische oder potenzielle Druckhöhe}$$

und $\frac{c^2}{2g}$ als Geschwindigkeitshöhe = kinetische oder dyn. Druckhöhe

$$z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{c^2}{2g} = z_g \quad \text{Gesamthöhe.} \quad (2.24)$$

Die Bernoullische Gleichung ist nichts weiter als eine besondere Form des allgemeinen Gesetzes von der Erhaltung der Energie (Energiegleichung) und besagt, dass in jedem

Querschnitt einer Stromröhre die Summe aller mechanischen Energien gleich groß ist (Gesamthöhe $z_g = \text{konst.}$), solange keine mechanische Energie, z. B. in Turbinen oder Pumpen, abgegeben oder zugeführt wird und solange die mechanischen Energieverluste, z. B. Reibungsverluste, d. h. Umsetzung von mechanischer Energie in Wärme, vernachlässigbar sind.

In Wärmekraftmaschinen sind die geringen Unterschiede der Ortshöhen ohne Einfluss. Dagegen darf bei thermodynamischen Vorgängen in Gleichung 2.24 bei Gasen/Dämpfen die Änderung der inneren Energie nicht mehr außer Acht gelassen werden.

$$z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{c^2}{2g} + \frac{u}{g} = \text{konst.} \quad \text{Höhengleichung}$$

kann auch geschrieben werden (2.25)

$$g \cdot z + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + u = \text{konst.} \quad \text{Energiegleichung}$$

Dann bleibt unter Vernachlässigung der Energie der Lage für Wärmekraftmaschinen

$$\frac{p}{\rho} + u + \frac{c^2}{2} = \text{konst.} = h + \frac{c^2}{2} \quad (2.26)$$

u spezifische innere Energie

h spezifische Enthalpie ($h = p \cdot v + u = p/\rho + u$)

Im Gegensatz dazu sind bei Wasserkraftmaschinen die Unterschiede des Luftdruckes zwischen Wasser-Ein- und -Auslaufstelle und die Änderung der inneren Energie vernachlässigbar klein. Sie betragen z. B. zwischen 0 und 1000 m Höhe über dem Meeresspiegel rd. 0,1 bar \approx 1 m WS (Meter Wassersäule), d. h. 1‰. Die Bernoullische Gleichung für *Wasserkraftmaschinen* lautet also vereinfacht

$$z + \frac{c^2}{2g} = \text{konst.} \quad (2.27)$$

Ein in Stromrichtung verjüngtes Rohrstück wird als **Düse** bezeichnet. In einer Düse nimmt die Geschwindigkeit laut Gl. 2.21 zu und der statische Druck nach Gl. 2.23 bzw. 2.25 ab. Umwandlung von Druck-Energie (statische) in Geschwindigkeits-Energie (kinetische).

Ein in Stromrichtung erweitertes Rohrstück nennt man **Diffusor**. In einem Diffusor nimmt die Geschwindigkeit gemäß Gl. 2.21 ab und der statische Druck nach Gl. 2.23 bzw. 2.26 zu. Umwandlung von Geschwindigkeits-Energie in Druck-Energie. Kurz und unscharf: **Geschwindigkeit und Druck**.

2.2.3.1 Düse und Diffusor

Die Bernoullische Gleichung gilt in Reinform nur für verlustlose, also reibungsfreie Strömungen, d. h. für einen Wirkungsgrad $\eta = 1$. Tatsächlich ist der Wirkungsgrad einer Düsenströmung sehr gut, $\eta = 0,95$ bis $0,99$, und die Strömung stabil. Die Querschnittsverjüngung kann auf kurzer Wegstrecke erfolgen, sofern nur die axialen und radialen Beschleunigungen der Flüssigkeitsteilchen in tragbaren Grenzen bleiben. Bei raumbeständigen Flüssigkeiten genügt meist eine gut gerundete Mündung (Bild 2.3).