

Klaus Menny

Strömungs- maschinen

Hydraulische und thermische
Kraft- und Arbeitsmaschinen

5. Auflage

mit
h,s-(Mollier)-
Diagramm



Teubner

Klaus Menny

Strömungsmaschinen

**Hydraulische und thermische
Kraft- und Arbeitsmaschinen**

Klaus Menny

Strömungsmaschinen

Hydraulische und thermische Kraft- und Arbeitsmaschinen

5., überarbeitete Auflage

Mit 227 Abbildungen, 36 Tabellen und 47 Beispielen



Teubner

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Prof. Dipl.-Ing Klaus Menny lehrte an der Fachhochschule Hannover.

1. Auflage 1985
2. Auflage 1995
3. Auflage 2000
4. Auflage 2003
- 5., überarbeitete Auflage Mai 2006

Alle Rechte vorbehalten

© B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

Der B.G. Teubner Verlag ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.

www.teubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Strauss Offsetdruck, Mörlenbach

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Printed in Germany

ISBN-10 3-519-46317-2

ISBN-13 978-3-519-46317-7

Aus dem Vorwort der ersten bis vierten Auflage

Dieses Buch wendet sich vor allem an Studenten des Maschinenbaus. Die wichtigsten Grundlagen aus der Hydrodynamik und Thermodynamik werden in einem einleitenden Kapitel hergeleitet, das die Strömungsmaschinen in ihrer Gesamtheit behandelt. Die weiteren Kapitel behandeln die einzelnen Maschinenarten. Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten werden beschrieben und durch Abbildungen und Kennlinien verdeutlicht. Es war dabei mein Bestreben, dem Verständnis des Lesers dadurch entgegenzukommen, dass die Ergebnisse, wo immer das möglich war, aus bekannten Grundtatsachen hergeleitet werden. Denn die Beschäftigung mit den Strömungsmaschinen ist in der Ingenieurausbildung nicht nur um ihrer selbst willen wertvoll, sondern auch dadurch, dass hier Anwendungen des Grundlagenwissens deutlich werden. Durch die gemeinsame Behandlung aller Strömungsmaschinen soll dem Leser verständlich werden, dass sie alle trotz ihrer äußeren Unterschiede nur verschiedene Anwendungen und Ausführungsformen eines gemeinsamen Grundprinzips sind. Die einzelnen Kapitel sind aber so abgefasst, dass sie je für sich lesbar sind. Wer meint, mit den Grundlagen vertraut zu sein, und sich sogleich einem der spezielleren Themen zuwendet, wird vielleicht doch gelegentlich im einleitenden Kapitel nachschlagen wollen. Eine Fülle von Querverweisen und ein umfangreiches Sachverzeichnis kommen einer solchen Arbeitsweise entgegen. Gleichwohl ist es nicht verkehrt, das Buch von vorn an systematisch durcharbeiten.

Der Zielsetzung des Buches als Lehr- und Übungsbuch konnte es nicht entsprechen, die modernsten Berechnungsverfahren zu vermitteln, wie sie heute in der Industrie mit Hilfe leistungsfähiger Computer angewendet werden, um die zum Teil sehr komplexen Strömungsverhältnisse zu erfassen. Stattdessen werden dem Leser konventionelle Rechenverfahren und solche Konstruktionsunterlagen an die Hand gegeben, die es ihm erlauben, Entwurfs- und Berechnungsaufgaben im Rahmen des Studiums zu bewältigen.

Gleichungen sind ausnahmslos als Größengleichungen geschrieben worden, sodass die Wahl der Einheiten frei ist. In den Beispielen wurde das Internationale System verwendet, nämlich die Grundeinheiten m, kg, s, K und sonst nur solche, die sich aus ihnen ohne andere Faktoren als ganze Zehnerpotenzen herleiten lassen. Insbesondere wurden die nicht kohärenten Zeiteinheiten min und h vermieden.

Vorwort zur 5. Auflage

Auch in der vorliegenden Auflage wurde das bewährte Grundkonzept des Buches beibehalten. Einige Verbesserungen und Anpassungen an neuere Entwicklungen wurden aber auch jetzt wieder eingefügt, wobei ich oft Anregungen von Lesern und von Fachkollegen aufgreifen konnte, denen an dieser Stelle zu danken ist. Außerdem habe ich die bisher benutzte Druckeinheit bar durch MPa ersetzt, wodurch nicht nur die ungebräuchliche Zehnerpotenz 10^5 vermieden sondern auch die bisher bestehende Diskrepanz zwischen dem Buchtext und dem beigefügten h,s -(Mollier)-Diagramm beseitigt wurde. Die Umrechnung ist denkbar einfach $1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$. Außerdem wurden alle Beispiele im Kapitel über Dampfturbinen neu berechnet, um sie an den gültigen Industrie-Standard IAPWS-FS97 (Zustandsgrößen von Wasser und Wasserdampf) anzupassen.

Ronnenberg bei Hannover im November 2005

Klaus Menny

Inhalt

1 Gemeinsame Grundlagen der Strömungsmaschinen	1
1.1 Einleitung	1
1.1.1 Definition	1
1.1.2 Einteilung	2
1.1.3 Vergleich mit Kolbenmaschinen	3
1.2 Hydromechanische und thermodynamische Grundlagen	4
1.2.1 Kontinuitätssatz	4
1.2.2 Bernoullische Gleichung	5
1.2.3 Erster Hauptsatz der Thermodynamik	6
1.2.4 Ideales Gas	7
1.2.5 Idealer Dampf	10
1.2.6 Theorie der Düsenströmung	12
1.2.7 Carnotscher Kreisprozess	16
1.3 Energieumsetzung im Laufrad	19
1.3.1 Absolut- und Relativgeschwindigkeit, Geschwindigkeitspläne	19
1.3.2 Spezifische Stutzenarbeit und Wirkungsgrade	21
1.3.3 Impulssätze der stationären Strömung	25
1.3.4 Die Eulersche Hauptgleichung	26
1.3.5 Anwendung des Energieerhaltungssatzes auf Strömungen in rotierenden Kanälen	27
1.3.6 Gleichdruck- und Überdruckprinzip	28
1.3.7 Reaktionsgrad, Beaufschlagungsgrad	30
1.4 Ähnlichkeitsbeziehungen und Kennzahlen	33
1.4.1 Ähnlichkeitsbeziehungen	33
1.4.2 Kennzahlen	35
1.5 Mehrstufigkeit und Mehrflutigkeit	39
1.6 Kavitation	39
2 Wasserturbinen	43
2.1 Einleitung	43
2.2 Typenübersicht und Einsatzgebiete	45
2.3 Pelton-Turbinen	46
2.3.1 Wirkungsweise und Bauformen	46
2.3.2 Betriebsverhalten	50
2.3.3 Festlegung der Hauptabmessungen	54

2.4 Francis-Turbinen	56
2.4.1 Allgemeine Übersicht	56
2.4.2 Zusammenhang zwischen Radform und Schnellläufigkeit	59
2.4.3 Laufradberechnung	61
2.4.4 Betriebsverhalten	64
2.5 Kaplan-Turbinen	66
2.5.1 Bauformen	66
2.5.2 Laufradberechnung	71
3 Dampfturbinen und Dampfkraftanlagen	77
3.1 Einleitung	77
3.2 Der Dampfkraftprozess	81
3.2.1 Der einfache Clausius-Rankine-Prozess	81
3.2.2 Speisewasservorwärmung	83
3.2.3 Zwischenüberhitzung	86
3.2.4 Der wirkliche Prozess	88
3.2.5 Der Satttdampfprozess	91
3.3 Übersicht über Turbinenbauarten	93
3.3.1 Kammerturbinen und Trommelturbinen	93
3.3.2 Kraftwerksturbinen	95
3.3.3 Industrieturbinen	98
3.3.4 Schiffsturbinen	102
3.3.5 Kleinturbinen	104
3.4 Theorie der Einzelstufe	106
3.4.1 Einleitung	106
3.4.2 Eindimensionale Stufentheorie	107
3.4.3 Kenngrößen von Turbinenstufen	110
3.4.4 Curtis-Stufen	115
3.4.5 Das radiale Gleichgewicht der Strömung	120
3.4.6 Nassdampfstufen	124
3.4.7 Gitterwirkungsgrade	126
3.4.8 Weitere Stufenverluste	130
3.5 Auslegung mehrstufiger Turbinen	138
3.5.1 Rückgewinn	138
3.5.2 Stufeneinteilung	141
3.5.3 Verluste und Wirkungsgrade	145
3.5.4 Labyrinthdichtungen	147
3.5.5 Axialschub und Schubausgleich	151
3.5.6 Betrieb	154
4 Gasturbinen	161
4.1 Einleitung	161
4.2 Kreisprozesse	162
4.2.1 Idealprozesse	162
4.2.2 Offener und geschlossener Prozess	167

4.2.3	Verbrennung und Verbrennungsgas	168
4.2.4	Reale Prozesse	171
4.2.5	Kombinierte Gas-Dampf-Prozesse	176
4.3	Baugruppen	181
4.3.1	Turbinen	181
4.3.2	Verdichter	184
4.3.3	Brennkammern	185
4.4	Anwendungen	186
4.4.1	Elektrische Energieerzeugung	186
4.4.2	Pumpen- und Verdichterantrieb	187
4.4.3	Abgasturbolader	187
4.4.4	Fahrzeigturbinen	189
4.4.5	Schiffsantriebe	189
4.4.6	Flugzeugtriebwerke	190
5	Kreiselpumpen	193
5.1	Einleitung	193
5.2	Bauformen	194
5.2.1	Schnellläufigkeit und Laufradform	194
5.2.2	Mehrstufige und mehrflutige Pumpen	195
5.2.3	Weitere Konstruktionsformen	198
5.3	Berechnung radialer und halbaxialer Laufräder	201
5.3.1	Meridianform	201
5.3.2	Geschwindigkeitsdreiecke	204
5.3.3	Relativer Kanalwirbel	206
5.3.4	Minderleistung	207
5.3.5	Festlegen des Schaufelverlaufs	210
5.3.6	Doppelt gekrümmte Laufschaufeln	213
5.4	Berechnung weiterer Einzelteile	217
5.4.1	Radiale Leitapparate	217
5.4.2	Spiralgehäuse	219
5.4.3	Axiale Schaufelgitter	222
5.4.4	Axialschub und Schubausgleich	226
5.5	Betriebsverhalten	230
5.5.1	Theoretisch berechnete Kennlinie	230
5.5.2	Das tatsächliche Verhalten der Pumpe	234
5.5.3	Haltdruckhöhe und Kavitation	236
5.5.4	Zusammenarbeit von Pumpe und Rohrleitung	240
5.5.5	Änderung des Betriebspunktes	242
5.5.6	Verhalten der Pumpe außerhalb des normalen Betriebspunktes	246
5.5.7	Pumpspeicherkraftwerke, Pumpenturbinen	249

- 6 Ventilatoren und Verdichter** 253
 - 6.1 Einleitung 253
 - 6.2 Ventilatoren 254
 - 6.2.1 Radialventilatoren 254
 - 6.2.2 Axialventilatoren 259
 - 6.2.3 Querstromventilatoren 263
 - 6.3 Verdichter 264
 - 6.3.1 Zwischenkühlung 264
 - 6.3.2 Bauformen von Verdichtern 267
 - 6.3.3 Wellendichtungen 271
 - 6.3.4 Elementare Theorie der Verdichterstufe 272
 - 6.3.5 Kennlinien 277
- 7 Hydrodynamische Kupplungen und Wandler** 281
 - 7.1 Einleitung 281
 - 7.2 Föttinger-Kupplungen 282
 - 7.2.1 Funktionsweise und Kennlinien 282
 - 7.2.2 Zusammenarbeit mit der Antriebsmaschine 284
 - 7.2.3 Maßnahmen zur Beeinflussung der Kennlinie 285
 - 7.2.4 Kupplungen mit veränderlicher Füllung 286
 - 7.3 Föttinger-Drehmomentwandler 288
 - 7.3.1 Aufbau und Wirkungsweise 288
 - 7.3.2 Kennlinien 290
 - 7.3.3 Stellwandler 292
 - 7.3.4 Hydrodynamische Getriebe 296
- 8 Windräder und Propeller** 301
 - 8.1 Einleitung 301
 - 8.2 Windräder 301
 - 8.2.1 Vorbemerkung 301
 - 8.2.2 Windradtheorie 303
 - 8.2.3 Bauformen 306
 - 8.3 Propeller 311
 - 8.3.1 Strahltheorie des Propellers 311
 - 8.3.2 Schraubenpropeller 312
 - 8.3.3 Voith-Schneider-Propeller 314
- 9 Anhang** 315
 - Literaturverzeichnis 322
 - Sachverzeichnis 324

Formelzeichen (Auswahl)

A	Fläche	v	spezifisches Volumen
a	Lichtweite	W	Arbeit
b	Breite	w	spezifische Arbeit
C	Konstante	w	Relativgeschwindigkeit
c	Absolutgeschwindigkeit	Y	spezifische Stutzenarbeit
c_p	spezifische Wärmekapazität	z	Anzahl
D, d	Durchmesser	z	Ortshöhe
\dot{E}	Energiestrom	α	Winkel zwischen \vec{c} und \vec{u}
e	Exzentrizität	β	Winkel zwischen \vec{w} und \vec{u}
F	Kraft	δ	Durchmesserzahl
f	Rückgewinnziffer	δ	Spaltweite
H	Fallhöhe, Förderhöhe	ϵ	Beaufschlagungsgrad
h	Höhe	ϵ	Gleitwinkel
h	Enthalpie	ζ	Verlustbeiwert
K	Drallkonstante	ζ_A	Auftriebsbeiwert
L, l	Länge	ζ_W	Widerstandsbeiwert
M	Moment	η	Wirkungsgrad
\dot{m}	Massenstrom	ϑ	Winkel zwischen Radius und Meridianstromlinie
n	Drehzahl	κ	Isentropenexponent
P	Leistung	λ	Leistungszahl
p	Druck	λ^*	Minderleistungskoeffizient
Q	Wärme	μ	Massenanteil
\dot{Q}	Wärmestrom	μ	Momentenwandlung
q	spezifische Wärme	μ	Schluckzahl
R	Gaskonstante	ν	Drehzahlverhältnis
R, r	Radius	ν	Laufzahl
r	Reaktionsgrad, in Bildern auch handschriftlich verwendet.	Π	Druckverhältnis
s	Weg	ρ	Dichte
s	Entropie	ρ	Radius
s	Profilsehnenlänge	σ	Schnellläufigkeit
s	Schlupf	τ	Verengungsfaktor
T	absolute Temperatur	φ	Durchflusszahl
t	Temperatur	φ	Zentriwinkel
t	Zeit	Ψ	Durchflussfunktion
t	Teilung	ψ	Druckzahl
u	Umfangsgeschwindigkeit	ω	Winkelgeschwindigkeit
V	Volumen		
\dot{V}	Volumenstrom		

1 Gemeinsame Grundlagen der Strömungsmaschinen

1.1 Einleitung

1.1.1 Definition

Aufgabenstellung. Unter der Sammelbezeichnung Strömungsmaschinen werden Wasserturbinen, Dampf- und Gasturbinen, Windräder, Kreiselpumpen und Kreiselerdichter sowie Propeller zusammengefasst. Allen diesen Maschinen ist gemeinsam, dass sie dem Zweck dienen, einem Fluid¹ Energie zu entziehen, um damit eine andere Maschine anzutreiben oder umgekehrt einem Fluid Energie zuzuführen, um dessen Druck zu erhöhen. Die hydrodynamischen Kupplungen und Drehmomentwandler, die gleichfalls zur Gruppe der Strömungsmaschinen gehören, sind Kombinationen von Kreiselpumpen und Flüssigkeitsturbinen.

Arbeitsprinzip. Kolbenmaschinen und Strömungsmaschinen, die die soeben beschriebene Aufgabe gemeinsam haben, unterscheiden sich durch die Art der Energieumsetzung.

Die Wirkungsweise einer Kolbenmaschine ist unmittelbar anschaulich zu verstehen. Bezeichnet $F_K = pA$ die auf den Kolben wirkende Kraft, A die Kolbenfläche und p den im Zylinder vorhandenen Druck, so ist die bei einer Kolbenbewegung um das Weegelement ds geleistete Arbeit

$$dW = F_K ds = pA ds = p dV.$$

Bei der Kolbenmaschine ist also die Arbeit ursächlich mit einer Volumenänderung verbunden.

Dieses Merkmal trifft gleichfalls für Flügelzellen- und ähnliche Apparate mit rotierenden Bauteilen zu, die man deshalb mit den Kolbenmaschinen zur Gruppe der Verdrängungsmaschinen zusammenfasst.

In der Strömungsmaschine ist die Energieumsetzung indirekt und nimmt stets den Weg über die kinetische Energie des Fluids. Am Beispiel einer einfachen Turbine (Bild 1.1 a) lässt sich das verfolgen. Das Fluid tritt am Druckstutzen in die Maschine ein und fließt zunächst durch einen Kranz feststehender Leitschaufeln. Dabei erhöht sich die Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie des Fluids auf Kosten seines Druckes oder exakter seiner potentiellen Energie. Zugleich entsteht durch die Form der Leitschaufeln eine Geschwindigkeitskomponente in der Umfangsrichtung des Laufrades. Im Laufrad gibt das Fluid seine kinetische Energie an den Läufer ab, indem die Richtung und oft auch der Betrag der Geschwindigkeit beim Durchströmen der von den Laufschaufeln gebildeten Kanäle verändert wird. Die dabei entstehenden Kräfte treiben das Laufrad an. Mit vermindertem Energiegehalt tritt das Fluid aus dem Saugstutzen der Maschine aus.

In einer Strömungsarbeitsmaschine (Bild 1.1 c) sind die Vorgänge umgekehrt. Hier wird dem Fluid im Laufrad Energie zugeführt. Die Leitschaufeln sind hinter dem Laufrad

1 Dieses aus dem Englischen übernommene Wort lateinischer Herkunft bezeichnet Flüssigkeiten und Gase, also die Gesamtheit der Körper, die strömende Bewegungen ausführen können.

angeordnet und haben den Zweck, einen Teil der kinetischen Energie durch Verzögerung der Strömung in eine Druckerhöhung umzusetzen. Der gleichen Aufgabe dient hier auch das Gehäuse, dessen Querschnitte deshalb in der Strömungsrichtung zunehmen.

Die beschriebene Art der Energieumsetzung ist für alle Strömungsmaschinen typisch, sie arbeiten nach dem Prinzip der Geschwindigkeitsänderung.

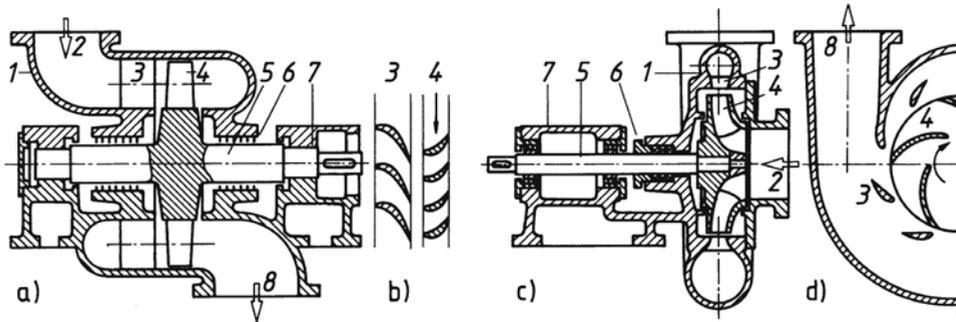


Bild 1.1 Prinzipbilder von Strömungsmaschinen

axiale Turbine

a) Längsschnitt

b) zylindrischer Schnitt durch die Beschauflung

radiale Pumpe

c) Längsschnitt

d) Querschnitt

Konstruktiver Aufbau. Alle Strömungsmaschinen sind prinzipiell so aufgebaut, wie in Bild 1.1. Je nach dem Verwendungszweck sind aber zahlreiche Varianten möglich. Insbesondere ist oft die Hintereinanderanordnung von einem Leitrad und einem Laufrad, die als eine Stufe bezeichnet wird, mehrfach vorhanden (Abschn. 1.5). In anderen Fällen, etwa bei Propellern, kann auf ein Leitrad auch verzichtet werden, aber stets ist das mit Schaufeln besetzte Laufrad (Bild 1.1 Pos. 4) das wesentliche Bauelement aller Strömungsmaschinen. Dazu kommen in den meisten Fällen ein Gehäuse (1) mit den Ein- und Austrittsstutzen (2 und 8), in das die Leitschaufeln (3) eingesetzt sind. An den Stellen, wo die Welle (5) durch das Gehäuse durchgeführt ist, liegen Dichtungen (6). Die Lagerung (7) liegt außerhalb des vom Arbeitsfluid erfüllten Raumes, falls nicht besondere konstruktive Gründe dagegen sprechen.

1.1.2 Einteilung

Strömungsmaschinen können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten eingeteilt werden (Bild 1.2).

Hydraulische und thermische Maschinen. Ein mögliches Unterscheidungskriterium ist die Kompressibilität des Fluids. Die hydraulischen Maschinen wie Wasserturbinen und Kreiselpumpen arbeiten mit inkompressiblen Flüssigkeiten. Dampfturbinen, Gasturbinen und Verdichter sind Beispiele thermischer Strömungsmaschinen, deren Arbeitsfluide kompressibel sind.

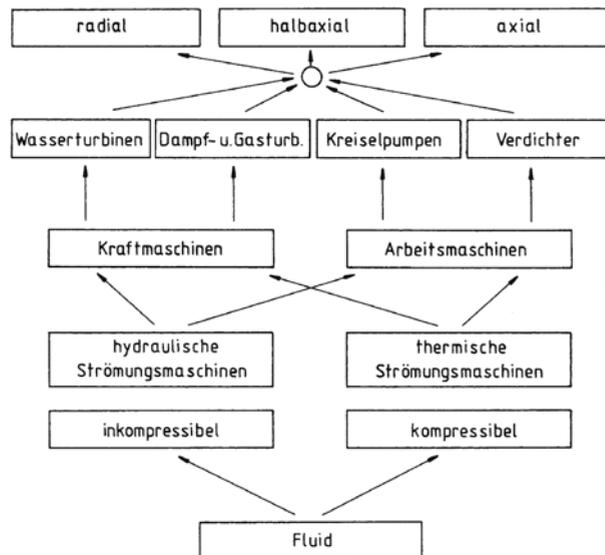


Bild 1.2
Einteilung der
Strömungsmaschinen

Kraft- und Arbeitsmaschinen. Strömungskraftmaschinen² oder Turbinen entziehen, wie bereits im vorigen Abschnitt gesagt, einem Fluid Energie und geben sie an eine andere Maschine z. B. einen Generator ab. Die Arbeitsmaschinen wie Pumpen und Verdichter erhöhen die Fluidenergie.

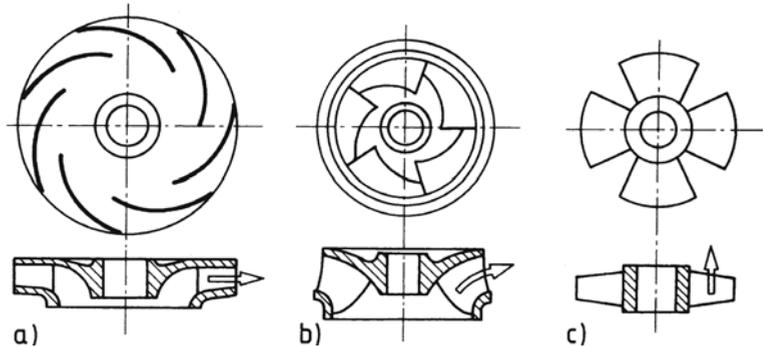
Aktions- und Reaktionsmaschinen. Nach der Art der Energieumsetzung unterscheidet man das Gleichdruck- oder Aktionsprinzip, bei dem sich die Geschwindigkeit im Laufrad nur der Richtung nach ändert, sowie das Überdruck- oder Reaktionsprinzip, bei dem auch der Betrag der Geschwindigkeit verändert wird (Abschn. 1.3.6).

Radial- und Axialmaschinen. Die Hauptströmungsrichtung im Laufrad bildet ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Neben radialen und axialen gibt es als Zwischenform halbaxiale oder diagonale Maschinen (Bild 1.3).

1.1.3 Vergleich mit Kolbenmaschinen

Aufbau. Die konstruktive Einfachheit einer Strömungsmaschine ist ein wesentlicher Vorteil. Als einziges Bauteil bewegt sich der Läufer in der einfachen, in der Technik bevorzugten rotierenden Bewegung, während eine Kolbenmaschine eine mehr oder weniger große Zahl von Teilen hat, die in komplizierter Weise hin- und herlaufen und immer wieder beschleunigt und verzögert werden, was sich auf die Laufruhe und den Verschleiß nachteilig auswirken kann.

2 Die Worte Kraftmaschine, Kraftwerk, Kraft-Wärme-Kopplung sind sprachlich nicht korrekt. Sie sind Überbleibsel einer Zeit, die die Begriffe Energie und Kraft noch nicht klar unterschieden hat.

**Bild 1.3**

Laufradformen

- a) radial
- b) halbaxial
- c) axial

Drehmoment und Drehzahl. Aus den unterschiedlichen Arbeitsprinzipien ergibt sich, dass das Drehmoment der Kolbenmaschine periodisch veränderlich, dasjenige der Strömungsmaschine dagegen zeitlich gleichförmig ist. Bei manchen Anwendungen bedeutet das einen zusätzlichen Vorteil.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die höhere Drehzahl der Strömungsmaschine. Dadurch bedingt, kommt diese bei gleicher Leistung mit geringeren Abmessungen und kleinerem Gewicht aus.

Verluste. Wegen der stets notwendigen Umsetzung von Druckenergie in kinetische Energie und umgekehrt treten in der Strömungsmaschine zusätzliche Verluste auf, sodass die inneren Wirkungsgrade meist kleiner sind als bei der Kolbenmaschine. Mindestens zum Teil wird dieser Nachteil durch die wegen des einfachen Aufbaus besseren mechanischen Wirkungsgrade ausgeglichen.

Anwendungsgebiete. Mitunter stehen Kolben- und Strömungsmaschinen einander gleichwertig gegenüber. Im Allgemeinen sind jedoch die Strömungsmaschinen dann überlegen, wenn es um die Verarbeitung großer Volumenströme geht. Das liegt daran, dass durch die Querschnitte der Strömungsmaschine das Fluid durch keine Ein- und Auslassventile behindert mit verhältnismäßig großer Geschwindigkeit strömen kann. Die Kolbenmaschinen dagegen haben ihr Anwendungsgebiet dort, wo große Druckunterschiede zu überwinden sind. So stehen Kolben- und Strömungsmaschinen gewöhnlich nicht in Konkurrenz zu einander, sondern beide haben ihre bevorzugten Anwendungsfelder.

1.2 Hydromechanische und thermodynamische Grundlagen

1.2.1 Kontinuitätssatz

Eine Stromröhre (Bild 1.4 a) sei von einem beliebigen Fluid stationär durchflossen. Damit ist gemeint, dass die Flüssigkeitsbewegung zeitlich unveränderlich ist, also die Geschwindigkeit an der gleichen Stelle der Stromröhre zu jeder Zeit den gleichen Wert hat, aber auch, dass sich die Mantelfläche der Stromröhre wie eine starre, unbewegliche und undurchdringliche Wand verhält, auch in solchen Fällen, wo sie nur eine gedachte Begrenzungsfläche innerhalb des Fluids ist.

In dem schraffierten Querschnitt habe die Geschwindigkeit den mittleren Wert c . A sei die senkrecht zur Strömungsrichtung gemessene Fläche des Querschnitts, durch den im Zeitelement dt das Volumen $dV = A ds = A c dt$ fließt. Der Volumenstrom ist $\dot{V} = dV/dt = A c$ und der Massenstrom $\dot{m} = \rho A c$, wobei ρ die Fluidichte ist.

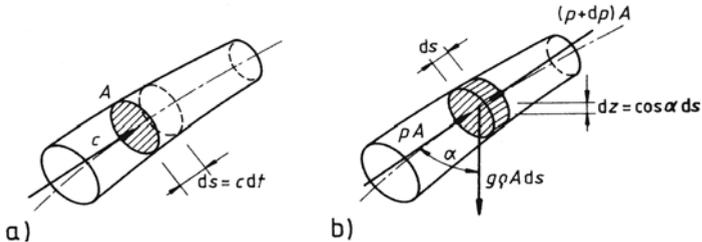


Bild 1.4
Stationäre Strömung
a) Kontinuitätssatz
b) Bernoulli-Gleichung

Der Kontinuitätssatz sagt nun aus, dass der Massenstrom für jeden Querschnitt derselben Stromröhre den gleichen Wert hat

$$\dot{m} = \rho c A = \text{konst.} \quad (1.1)$$

Während also die Werte von ρ , c und A sich ändern können, bleibt deren Produkt konstant. Im Falle einer inkompressiblen Flüssigkeit vereinfacht sich wegen $\rho = \text{konst}$ Gl. (1.1) zu

$$\dot{V} = c A = \text{konst.} \quad (1.2)$$

1.2.2 Bernoullische Gleichung

In einer Stromröhre (Bild 1.4 b) sei die Strömung reibungsfrei. Auf das hervorgehobene zylindrische Fluidelement wirken dann nur die Gewichtskraft und die Druckkräfte. Die auf die Mantelfläche wirkenden Druckkräfte können unberücksichtigt bleiben, da sie keine Komponente in der Bewegungsrichtung haben, auf die es allein ankommen soll. Die Bewegung sei stationär und das Fluid inkompressibel.

Das Newtonsche Grundgesetz der Mechanik, Kraft = Masse · Beschleunigung, lautet für die Bewegungsrichtung mit dem Druck p , der Zeit t , dem Weg s und dem Winkel α der Stromlinie gegenüber der Senkrechten

$$-dpA - g\rho A ds \cos \alpha = \rho A ds \frac{dc}{dt}$$

oder anders geordnet mit dem Höhenelement $dz = ds \cos \alpha$

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + c dc = 0$$

und nach Integration

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{c^2}{2} = \text{konst.} \quad (1.3)$$

Diese nach Daniel Bernoulli (1700–1782) benannte Gleichung stellt für die stationäre Bewegung einer reibungsfreien, inkompressiblen Flüssigkeit den Erhaltungssatz der Energie