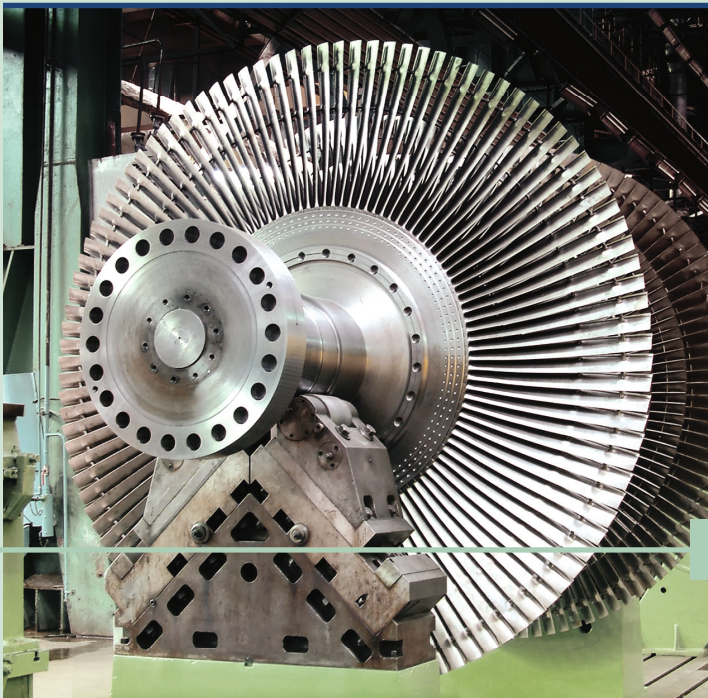


Wolfgang Kalide
Herbert Sigloch
Volker Gehrke

Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

Kolbenmaschinen – Strömungs-
maschinen – Kraftwerke



12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

Kalide/Sigloch/Gehrke
Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Wolfgang Kalide †
Herbert Sigloch
Volker Gehrke

Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

Kolbenmaschinen – Strömungsmaschinen – Kraftwerke

12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

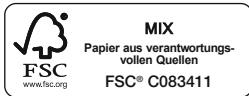
HANSER

Bearbeiter:

Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Kalide (†)
ehemals Fachhochschule Dortmund

Prof. Dipl.-Ing. Herbert Sigloch
früher Hochschule Reutlingen und jetzt Duale Hochschule Baden-Württemberg

Volker Gehrke, M. Eng.
Dozent an der Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. 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.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Der Buchmacher, Arthur Lenner, Windach

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelbild: © shutterstock.com/Kmannn

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47569-4

E-Book-ISBN 978-3-446-47727-8

Vorwort

■ Vorwort zur 11. Auflage

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

■ Vorwort zur 12. Auflage

In der vorliegenden 12. Auflage wurden die Ausführungen zur Energiewirtschaft, insbesondere zur Stromerzeugung, den aktuellen Fragen angepasst und die Darstellungen zu den thermischen Kraftwerken neu bearbeitet und vertieft dargestellt. So sind die Beschreibungen und Wärmeschaltbilder der für die Versorgungssicherheit wichtigsten konventionellen Kraftwerkstypen auf dem heutigen Stand der Technik. Die grundsätzliche Arbeitsweise der Kernkraftwerke wird in einem eigenen Kapitel kurz behandelt, weil die Kernkraftwerke außerhalb Deutschlands an Bedeutung zunehmen.

Die Aspekte der deutschen Energiewende werden in der Öffentlichkeit kontrovers und oft emotional diskutiert. Die neutrale, faktenbasierte Darstellung der Probleme und des Handlungsbedarfs bei der Umsetzung der Energiewende und Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit ist ein Hauptanliegen der Autoren.

Den kombinierten Gas- und Dampfturbinenkraftwerken ist ein eigenes an den heutigen Stand der Technik angepasstes Kapitel gewidmet.

Die Wasserstoffherstellung durch die Wasserelektrolyse, die Speicherung, das Brennverhalten und die Rückverstromung des Wasserstoffs wurde neu aufgenommen und energetisch bewertet.

Die Behandlung der Kraft-Wärmekopplung wurde nochmals vertieft und in mehreren aktuellen Anwendungsformen dargestellt.

Aus den neu aufgenommenen Themen lassen sich die neuen Anwendungsbereiche der Kraft- und Arbeitsmaschinen erkennen.

Die bewährte und im Umfang und in der Tiefe stimmende Darstellung der theoretischen Grundlagen wurde beibehalten. Bei den Themen Brennstoffe und Verbrennung wurden die Darstellungen vertieft und erweitert, um die chemischen Umsetzungen verständlich zu machen und um die Heizwerte, den Brennstoffverbrauch und die Zusammensetzung der Verbrennungsgase auf dieser Basis berechnen zu können.

An dem bewährten Konzept des Buches, eine verständliche und praxisorientierte Einführung für Studierende und die im Bereich der Kraft- und Arbeitsmaschinen tätigen Ingenieurinnen und Ingenieure auf einer soliden theoretischen Basis zu liefern, wurde nichts geändert.

Anregungen zu möglichen Verbesserungen und konstruktive Kritik sind dem Verlag und den Autoren willkommen.

Unser Dank gilt dem Carl Hanser Verlag und der Lektorin, Frau Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg, für die konstruktive Zusammenarbeit und die Herausgabe der neuen Auflage des Buches.

Herbert Sigloch und Volker Gehrke

Inhalt

Vorwort	V
Formelzeichen und Einheiten	XIX
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung	1
1.2 Energieumwandlung in der Technik	3
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Allgemeine physikalische Größen	7
2.2 Hydromechanik	10
2.2.1 Hydrostatik	10
2.2.2 Kontinuitätsgleichung	11
2.2.3 Bernoullische Gleichung	13
2.2.3.1 Düse und Diffusor	14
2.2.3.2 Messung von Strömungsgeschwindigkeiten	16
2.2.4 Strömung in Rohrleitungen	17
2.2.5 Druckenergieverlust in Rohrleitungen	19
2.2.6 Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	21
2.2.7 Kavitation und Verdichtungsstoß	23
2.3 Wärmetechnik	25
2.3.1 Thermische Zustandsgrößen	25
2.3.2 Erster Hauptsatz	27
2.3.3 Spezifische Wärmekapazität	30
2.3.4 Enthalpie	32
2.3.5 Zustandsgleichungen des idealen Gases	36

2.3.5.1	Thermische Zustandsgleichung	36
2.3.5.2	Kalorische Zustandsgleichung	38
2.3.6	Zweiter Hauptsatz	40
2.3.6.1	Entropie	40
2.3.6.2	Darstellung der Entropie durch thermische Zustandsgrößen	41
2.3.6.3	Formulierungen des zweiten Hauptsatzes	42
2.3.6.4	Exergie	42
2.3.6.5	T,s - oder Wärmediagramm	43
2.3.7	Technisch wichtige Zustandsänderungen	45
2.3.8	Gasgemische	49
2.3.9	Normalatmosphäre (Aerostatik)	50
2.3.10	Feuchte Gase	50
2.3.11	Strömung mit großen Druckänderungen	51
2.3.11.1	Dynamische Temperatur	51
2.3.11.2	Totalzustand (Gesamtzustand, Ruhezustand)	51
2.3.12	Kreisprozesse	52
2.3.13	Laval-Düse	53
2.3.14	Zustandsänderungen des Wasserdampfes	60
2.3.15	Arbeitsvermögen des Wasserdampfes	63
2.3.15.1	Nutzarbeit im T,s -Diagramm	63
2.3.15.2	Nutzarbeit im h,s -Diagramm	64
2.3.15.3	Nutzarbeit im p,v -Diagramm	65
2.3.16	Brennstoffe und Verbrennung	67
2.3.16.1	h,T -Diagramm	72
2.3.17	Wärmedurchgang	74
2.3.17.1	Wärmeübergang durch Berührung	75
2.3.17.2	Wärmeübergang durch Strahlung	78
2.4	Wirkungsgrade der Maschinen	78
2.5	Vergleich von Kolben- und Strömungsmaschinen	81
2.6	Regelung	81

3	Kolbenmaschinen	93
3.1	Ventilsteuerung	93
3.2	Kurbeltrieb	93
3.2.1	Kräfte am Kurbeltrieb	94
3.2.2	Tangentialkraftdiagramm	96
3.2.2.1	Ableitung der Bewegungsverhältnisse beim Kurbeltrieb	97
3.2.2.2	Gesamttangentialkraft	99
3.2.3	Schwungradberechnung	102
3.2.4	Massenausgleich	105
3.2.5	Kräfteausgleich bei der Mehrzylindermaschine	108
3.2.6	Momentenausgleich bei Mehrzylindermaschinen	109
3.3	Kolbenpumpen (Verdrängerpumpen)	112
3.3.1	Kolbenpumpen mit hin- und hergehendem Kolben	113
3.3.1.1	Wirkungsweise	113
3.3.1.2	Fördervolumen	114
3.3.1.3	Saughub	117
3.3.1.4	Druckhub	120
3.3.1.5	Pumpenventile	120
3.3.1.6	Wirkungsgrade	122
3.3.1.7	Sonderformen	122
3.3.2	Drehkolbenpumpen	123
3.3.3	Flüssigkeitsringpumpen	125
3.4	Verdrängungsverdichter	126
3.4.1	Kolbenverdichter	127
3.4.1.1	Thermodynamik der Kolbenverdichter	127
3.4.1.2	Schädlicher Raum	129
3.4.1.3	Wirkliche Verdichtung	133
3.4.1.4	Volumetrischer Wirkungsgrad	133
3.4.1.5	Indizierter Wirkungsgrad; indizierte Leistung	135
3.4.1.6	Mechanischer Wirkungsgrad; Antriebsleistung	136
3.4.1.7	Mehrstufige Kolbenverdichter	137
3.4.1.8	Regelung	139

3.4.2	Rotationsverdichter	141
3.4.2.1	Roots-Gebläse	141
3.4.2.2	Drehkolbenverdichter	144
3.4.2.3	Flüssigkeitsringpumpen als Verdichter	146
3.5	Kolbenmotoren	147
3.5.1	Arbeitsverfahren	147
3.5.2	Aufbau der Kolbenmotoren	148
3.5.3	Verluste, Leistungen, Wirkungsgrade	149
3.5.4	Ottomotor (Viertakt)	152
3.5.4.1	Gemischbildung	156
3.5.4.2	Zündung	163
3.5.4.3	Abgasbehandlung	165
3.5.5	Dieselmotor (Viertakt)	167
3.5.5.1	Vergleich Ottomotor – Dieselmotor	168
3.5.5.2	Einspritzung und Gemischbildung	170
3.5.6	Steuerung des Gaswechsels bei Viertaktmotoren	185
3.5.7	Zweitaktverfahren	187
3.5.7.1	Nachladung beim Zweitaktverfahren	190
3.5.8	Gegenüberstellung von Zweitakt und Viertakt	191
3.5.8.1	Wärmebelastung und Kühlung	192
3.5.8.2	Mechanische Belastung und Schmierung	192
3.5.9	Kreiskolbenmotor (Wankelmotor)	194
3.5.10	Freikolbenmotoren	196
3.5.11	Aufladung	197
3.5.12	Stirlingmotor	203
3.5.13	Kraftstoffe	206
3.5.14	Kühlung	209
3.5.15	Mehrzylinder-Anordnungen	210
3.5.16	Ausführungsbeispiele von Kolbenmotoren	213
3.5.17	Betriebsverhalten der Motoren	221
3.5.18	Alternative Antriebe	224

4	Strömungsmaschinen	225
4.1	Arbeitsverfahren der Strömungsmaschinen	225
4.2	Geschwindigkeitsplan	227
4.2.1	Geschwindigkeiten am radialen Laufrad	228
4.2.2	Geschwindigkeiten am axialen Laufrad	231
4.3	Hauptgleichung der Strömungsmaschinen	231
4.4	Strömungsarbeitsmaschinen	232
4.4.1	Gemeinsame Grundlagen der Strömungsarbeitsmaschinen	232
4.4.1.1	Radial durchströmte Maschinen	232
4.4.1.2	Axial durchströmte Maschinen	262
4.4.2	Festlegung der Schaufelzahl	273
4.4.3	Betriebsverhalten der Strömungsarbeitsmaschinen	274
4.4.3.1	Betriebspunkt	274
4.4.3.2	Kennliniendiagramm	275
4.4.3.3	Drehzahlregelung	276
4.4.3.4	Labiler Zweig der Kennlinie	277
4.4.3.5	Parallelförderung von Kreiselpumpen	279
4.4.3.6	Pumpen bei Kreiselerdichtern	279
4.4.3.7	Betriebsverhalten der Radialverdichter	280
4.4.3.8	Betriebsverhalten der Axialverdichter	281
4.4.4	Vergleich von Kolben- und Strömungsmaschinen	283
4.4.5	Kreiselpumpen	283
4.4.5.1	Leistung und spezifische Förderarbeit	283
4.4.5.2	Saughöhe und Kavitation	284
4.4.5.3	Spezifische Drehzahl und Bauarten	287
4.4.5.4	Ausgleich des Achsschubes	288
4.4.5.5	Sonderformen der Kreiselpumpe	291
4.4.6	Wasserstrahlpumpen (Ejektoren)	295
4.4.7	Turboverdichter	296
4.4.7.1	Thermodynamik der Turboverdichter	296
4.4.7.2	Radialverdichter	308
4.4.7.3	Axialverdichter	311

4.4.8	Propeller	312
4.4.8.1	Luftschrauben	314
4.4.8.2	Schiffsschrauben	316
4.5	Strömungskraftmaschinen	316
4.5.1	Energieumwandlung im Leitapparat	318
4.5.2	Energieumwandlung im Laufrad	319
4.5.2.1	Energieumwandlung im radialen Laufrad	319
4.5.2.2	Energieumwandlung im axialen Laufrad	322
4.5.3	Verluste, Wirkungsgrade, Leistungsbegriffe	323
4.5.4	Kenngrößen von Strömungskraftmaschinen	328
4.5.5	Wasserturbinen	332
4.5.5.1	Francis-Turbine	333
4.5.5.2	Kaplan-Turbine	335
4.5.5.3	Laufradformen	339
4.5.5.4	Saugrohr	341
4.5.5.5	Freistrah-(Pelton-)Turbine	343
4.5.5.6	Wirkungsgrade von Wasserturbinen	348
4.5.5.7	Durchströmturbine	349
4.5.6	Dampfturbinen	349
4.5.6.1	Leitapparate	351
4.5.6.2	Gleichdruckstufe	355
4.5.6.3	Überdruckstufe	355
4.5.6.4	Geschwindigkeitsstufung	359
4.5.6.5	Druckstufung	362
4.5.6.6	Regelung der Dampfturbinen	365
4.5.6.7	Mehrstufige Großturbinen	369
4.5.6.8	Gegendruck- und Entnahmeturbinen	373
4.5.7	Gasturbinen	374
4.5.7.1	Offene Gasturbinenanlagen	375
4.5.7.2	Geschlossene Gasturbinenanlagen	381
4.5.7.3	Kombianlagen	382

5	Grundlagen der Energiewirtschaft	383
5.1	Historischer Rückblick	383
5.2	Europäische Verbundnetze	384
5.3	Strom- und Wärmebedarf	387
5.4	Strommarkt und Strommix	389
5.5	Energiewende	391
5.5.1	Ziele der Energiewende für die Stromerzeugung	392
5.5.2	Erneuerbare-Energie-Anlagen (EEA)	393
5.5.3	Volatilität der Windkraft und der Photovoltaik	394
5.5.4	Netzstabilität	396
5.6	Eigenschaften der Primärenergieträger	398
5.6.1	Feste und flüssige Kraftwerksbrennstoffe	399
5.6.2	Gasförmige Kraftwerksbrennstoffe	401
5.6.3	Biomasse, Abfall	404
5.6.4	Kernbrennstoff	405
5.7	Energiekosten	407
5.7.1	Feste Kosten	408
5.7.2	Veränderliche Kosten	410
5.7.3	Stromgestehungskosten	412
6	Wasserkraftwerke	415
6.1	Einsatzbedingungen der Wasserkraftwerke	416
6.2	Pumpspeicherkraftwerke	418
6.2.1	Hauptkomponenten	419
6.2.2	Energiebilanz	420
7	Dampfkraftwerke	421
7.1	Hauptkomponenten	422
7.1.1	Dampferzeuger	423
7.1.1.1	Brennstoff, Luft, Rauchgas	423
7.1.1.2	Feuerung, Brenner, Kohlemühlen	425
7.1.1.3	Technische Dampferzeugung	428
7.1.1.4	Verdampfersysteme	431
7.1.1.5	Druckteil	432

7.1.2	Turbosatz, Wasser-/Dampfkreislauf und Wärmeschaltplan . . .	434
7.1.3	Rauchgasreinigung	437
7.1.3.1	Rauchgasentstickung	438
7.1.3.2	Rauchgasentstaubung	439
7.1.3.3	Rauchgasentschwefelung	440
7.1.4	Speisewasseraufbereitung	442
7.2	Berechnung der Hauptgrößen	443
7.2.1	Maßnahmen zur Wirkungsgradverbesserung	447
7.3	Regelung in Dampfkraftwerken	450
7.3.1	Betriebsarten	452
7.3.2	Schutzfunktionen	456
8	Kernkraftwerke	457
8.1	Kontrollierte nukleare Kettenreaktion	458
8.2	Hauptkomponenten	459
8.3	Reaktortypen	462
8.3.1	Druckwasserreaktor	462
8.3.2	Siedewasserreaktor	463
8.4	Sicherheitskonzept	465
8.5	Wärmeschaltplan	465
9	Kombinierte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke	469
9.1	Hauptkomponenten	470
9.2	Wärmeschaltplan	471
9.3	Berechnung der Hauptgrößen	475
9.4	Effizienz und Umweltbilanz	476
10	Kraft-Wärmekopplung	479
10.1	Begriffe und Kennzahlen	480
10.2	Wärmeschaltplan	481
10.3	Industriekraftwerke	483
10.4	Heizkraftwerke, Blockheizkraftwerke (BHKW)	484

11 Nutzung der Windenergie	487
11.1 Vorbemerkungen	487
11.2 Windangebot	488
11.3 Aerodynamische Grundlagen	490
11.3.1 Einführung	490
11.3.2 Windenergie und Windleistung	491
11.3.3 Windturbinenleistung	491
11.3.4 Axialkraft	493
11.3.5 Kennwerte	494
11.3.6 Ausführungshinweise	495
11.3.7 Vereinfachte Propellertheorie	496
11.3.8 Kennzahlen	499
11.3.9 Zusammenfassung der Einflüsse bei Windturbinen	500
12 Energiespeicherung	503
12.1 Fluidspeicherung	504
12.2 Stromspeicheranlagen	507
12.2.1 Anforderungen an Stromspeicher	510
12.2.2 Wasserstoff als Speichermedium	511
12.2.3 Wasserstoffgewinnung, Speicherung, Rückverstromung	512
Weiterführendes Schrifttum (Auswahl)	517
Index	519

Formelzeichen und Einheiten

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
A	m^2	Fläche, Querschnitt
a	m/s	Schallgeschwindigkeit
a	m/s^2	Beschleunigung
a	l	variable Zahl
b	m	Breite
c	m/s	absolute Geschwindigkeit
\bar{c}	m/s	mittlere Geschwindigkeit
C_a	l	Auftriebsbeiwert
c_p	$kJ/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
c_u	$kJ/(kg \cdot K)$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
C_w	l	Widerstandsbeiwert
C_s	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Strahlungszahl des schwarzen Körpers, Zahlenwert 5,7685
d	m	Durchmesser
D	$Nms = kg \cdot m^2/s$	Drall, Impulsmoment
E	$J = Nm$	Energiemenge
\dot{E}	$W = J/s$	Energiestrom, Energieleistung
e	m	Längenmaß
F	N	Kraft
G	N	Gewichtskraft
g	m/s^2	Fallbeschleunigung
H	kJ	Enthalpie
H_u	kJ/kg	Heizwert
h	$kJ/kg = 10^3 m^2/s^2$	spezifische Enthalpie
h	m^2/s^2	spezifische Energie
h_v	m^2/s^2	spezifische Verlustenergie
I	$Ns = kg \cdot m/s$	Impuls

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
J	kg m ²	Massenträgheitsmoment
k	mm	Rauigkeit
k	W/(m ² · K)	Wärmedurchgangszahl
$l; L$	m	Länge
M	Nm	Moment
M	kg/kmol	Molmasse
Ma	l	Mach-Zahl
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/s	Massenstrom, Mengenstrom
n	s ⁻¹	Drehzahl, Drehfrequenz
n	l	Polytropen-Exponent
n	l	Luftzahl
n	mol; kmol	Stoffmenge
P	W	Leistung
p	Pa = N/m ² ; bar	absoluter Druck
p_B	mbar = hPa	Barometerdruck
p_L	mbar = hPa	Luftdruck
$p_{\bar{u}}$	Pa = N/m ² ; bar	Überdruck = absoluter Druck abzüglich Luftdruck
Q	kJ	Wärmemenge
\dot{Q}	kW	Wärmestrom, Wärmeleistung
q	J/kg = m ² /s ²	bezogene Wärmemenge
R	J/(kg · K)	Gaskonstante
Re	l	Reynolds-Zahl
r	m	Radius
r	kJ/kg	Verdampfungswärme
r	l	Reaktionsgrad
S	kJ/K	Entropie
s	kJ/(kg · K)	spezifische Entropie
s	m	Strecke, Weg, Wandstärke
T	K	absolute Temperatur
t	°C	Temperatur über dem Gefrierpunkt des Wassers bei 1013,25 mbar
t	s	Zeit, Zeitpunkt, Zeitspanne
t	m	Teilung
t	m	Körpertiefe
U	m	Umfang
U	kJ	innere Energie
u	kJ/kg = 10 ³ m ² /s ²	spezifische innere Energie

Zeichen	Maßeinheit	Bedeutung
u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
V	m ³	Rauminhalt, Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom, Durchsatz
v	m ³ /kg	spezifisches Volumen
v	kmol/kg Brennstoff	spezifische Verbrennungsgasstoffmenge
W	kJ	Arbeit
w	kJ/kg = 10 ³ m ² /s ²	spezifische Arbeit bei thermischen Maschinen
w	m/s	relative Geschwindigkeit
x	1 oder %	Dampfanteil des Nassdampfes
x	g/kg	Wasseranteil der feuchten Luft
Y	Nm/kg = m ² /s ²	spezifische Arbeit bei hydraulischen Maschinen
z	l	Schaufelzahl
z	m	Höhe
α	W/(m ² · K)	Wärmeübergangszahl
α	l	Kontraktionszahl
α	Bogengrad rad	Winkel zwischen c und u
β	Bogengrad rad	Winkel zwischen w und u
δ	l	Ungleichförmigkeitsgrad
ε	l	Verdichtungsverhältnis
ε	l	Kälteleistungszahl
ε	l	Emissionsverhältnis
η	l	Wirkungsgrad
η	Pa · s = kg/(m · s)	dynamische Viskosität
ζ	l	Widerstandszahl
κ	l	Isentropen-Exponent
λ	l	Rohrreibungszahl
λ	l	Luftüberschusszahl, Luftverhältnis
λ	l	Schubstangenverhältnis
λ	W/(m · K)	Wärmeleitzahl
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
ϱ	kg/m ³	Dichte
σ	l	Radformzahl
φ	l	relative Luftfeuchtigkeit
φ	l	Lieferzahl; Geschwindigkeitszahl
ψ	l	Nusseltsche Ausflussfunktion
ψ	l	Druckzahl
ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

■ 1.1 Allgemeine Betrachtungen zur Energieumwandlung

Energieumwandlung und Wirkungsgrad sind zwei untrennbare Begriffe. Bei allen Energieumwandlungen treten unvermeidbare Verluste auf. Diese Verluste so klein wie möglich zu halten, ist eine Daueraufgabe aller Beteiligten in der Planung, der Konstruktion und bei dem Betrieb der technischen Anlagen. Wenn heute bei der Umwandlung von Primärenergie in mechanische Energie oder in Elektrizität in thermischen Kraftwerken mit fossilen Brennstoffen Wirkungsgrade von maximal ca. 60% erreicht werden, so ist dies ein Ergebnis jahrzehntelanger beharrlicher Entwicklungsarbeit. Dennoch ist der verbleibende Verlust entlang der Umwandlungskette relativ groß.

Umwandlungsverluste in den Kraft- und Arbeitsmaschinen und in den zugehörigen Rohrleitungen und Apparaten verursachen einen erhöhten Verbrauch von nicht unbegrenzt zur Verfügung stehenden Ressourcen und damit auch eine Erhöhung der Umweltbelastung durch Abgase, Reststoffe und Treibhausgasemissionen.

Die Umsetzung der deutschen Energiewende mit dem Ausstieg aus der Kernenergie und dem Hauptziel, die Nutzung von fossilen Energieträgern soweit wie möglich zu reduzieren und durch eine ökologische und nachhaltige Energieversorgung zu ersetzen, betrifft nahezu alle Bereiche des wirtschaftlichen Handelns. Industrielle Prozesse, Energiewirtschaft, öffentlicher Verkehr, Landwirtschaft und die Gebäudeheizung sind bereits von gesetzlichen Vorschriften zur Begrenzung von Abgasbelastungen allgemein und insbesondere zu der Begrenzung von Treibhausgasemissionen betroffen und werden es in der Zukunft noch stärker sein.

Die erneuerbare Energie aus Windkraft, Sonnenenergie, Biomasse und Wasserkraft soll in Deutschland die Abkehr von der Nutzung der Kernenergie und von den fossilen Brennstoffen ermöglichen, dennoch werden die konventionellen Kraftwerke auf der Basis fossiler Brennstoffe noch lange die Hauptlast der gesicherten Stromerzeugung tragen müssen.

Der Stromerzeugung in Kernkraftwerken kommt weltweit eine große und weiter zunehmende Rolle zu, u. a., weil die Energieumwandlung in Kernkraftwerken ohne das Entstehen von Treibhausgasen möglich ist.

Das Hauptproblem der Gewinnung von nutzbarer Energie aus Windkraft und Sonnenenergie ist das jahreszeitlich, tageszeitlich und wetterabhängig volatile Auftreten dieser Energieträger. Ein sehr großes Aufgabenfeld der nächsten Jahre zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit ist daher die Entwicklung von leistungsfähigen Anlagen zur Energiespeicherung, insbesondere zur Stromspeicherung.

Die Umwandlung der in Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen gewonnenen Elektrizität in speicherbaren Wasserstoff steht aktuell im Zentrum dieser notwendigen Entwicklung. Der gespeicherte Wasserstoff kann ohne das Entstehen des Treibhausgases CO_2 in Fahrzeugen, in Kraftwerken, zu Heizzwecken und auch stofflich in der chemischen Industrie eingesetzt werden. Auch bei dieser Kette der Energieumwandlungen ist der Wirkungsgrad mäßig, bei der Rückumwandlung in Elektrizität sogar enttäuschend gering.

Eine gewisse Hoffnung für die fernere Zukunft verbindet sich mit der weiteren Entwicklung des Fusionsreaktors, eine Entwicklung, die noch im Bereich der experimentellen Plasmaphysik liegt und von der sicheren Stromerzeugung noch sehr weit entfernt ist. Es wird von dem Fusionsreaktor eine im Vergleich mit den heutigen Reaktoren problemlosere Betriebsweise erwartet, was die Maßnahmen zur Reaktorsicherheit und den Anfall von Reststoffen betrifft.

Bei allen thermischen Kraftanlagen sind in Deutschland die Umweltauswirkungen bei der Genehmigung zur Errichtung und zum Betrieb gemäß des Bundesimmissionsschutzgesetzes zentrale Aspekte. Die Entnahme und Rückführung von Wasser aus Flüssen, meistens verbunden auch mit Wärmeeinleitung in die Flüsse, Geräuschemissionen, Fahrzeugverkehr zur Versorgung der Anlage werden in der Planungsphase detailliert und sorgfältig von den zuständigen Genehmigungsbehörden geprüft. Der für die Planung und den Betrieb der Anlage wichtigste Aspekt ist jedoch die Begrenzung der Konzentration von Schwefeldioxid SO_2 , Stickoxiden NO_x , Kohlenmonoxid CO und Staub in dem Rauchgas aus der Verbrennung fossiler Energieträger.

■ 1.2 Energieumwandlung in der Technik

Maschinen sind technische Geräte mit beweglichen Teilen, die Arbeitsgänge selbstständig verrichten und damit Muskelkraft einsparen. Innerhalb der Maschinen spielen die *Kraftmaschinen* eine wichtige Rolle, weil es erst mit ihrer Hilfe möglich ist, die Kräfte der Natur in eine für den Menschen nutzbare Form umzuwandeln (Bild 1.1). Alle anderen Maschinen sind im Prinzip *Arbeitsmaschinen* und werden von Kraftmaschinen, aber auch von menschlicher oder tierischer Muskelarbeit angetrieben. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass in jeder Kraft- und Arbeitsmaschine eine Umwandlung von Energie aus einer Form in eine andere Form stattfindet.

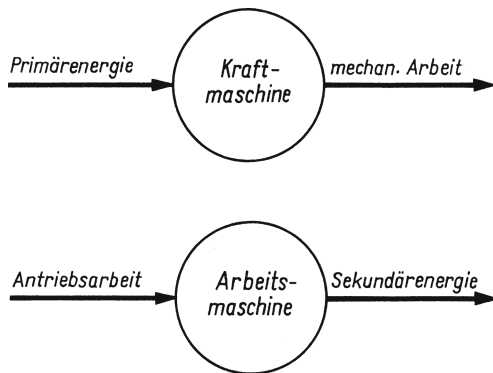


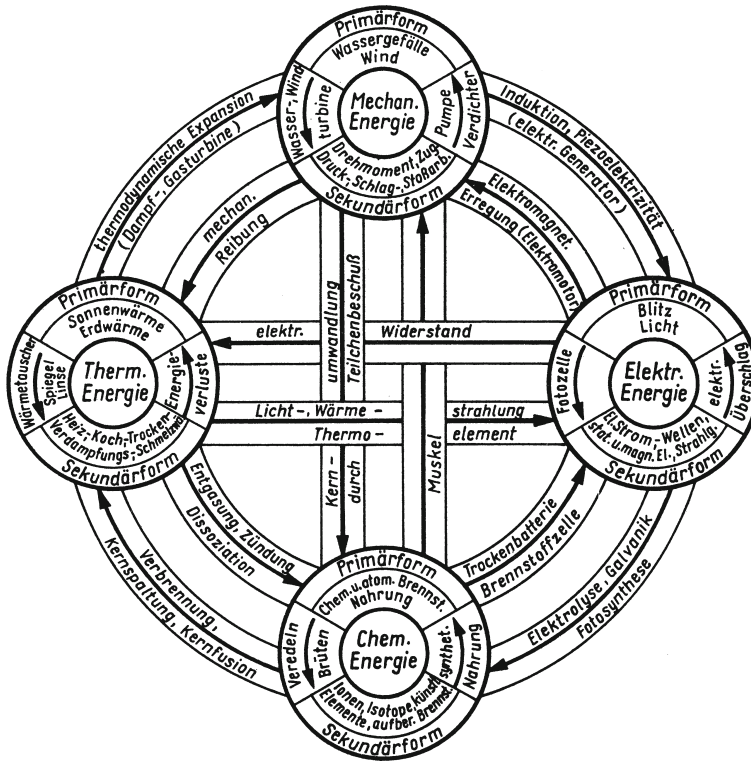
Bild 1.1

Energieumsetzung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

Die im Sprachgebrauch übliche Bezeichnung **Kraftmaschine** ist dimensionsfalsch. Zur Erzeugung von **Kräften** dienen beispielsweise Pressen und Schraubstöcke. Die sogenannten **Kraftmaschinen** liefern jedoch nicht Kräfte, sondern **Arbeit** (mechanische Energie). **Kraftmaschinen** entnehmen dem Arbeitsmedium Energie und geben sie in Form von mechanischer Arbeit an den Verbraucher ab. Ihre Umkehrung sind die sogenannten **Arbeitsmaschinen** (Pumpen, Verdichter, Kältemaschinen). Sie geben die ihnen zugeführte mechanische Arbeit an das Arbeitsmedium weiter und erhöhen dessen Energiegehalt.

Die Energie kann man bei großzügiger Auslegung in vier Formbereiche einordnen, wie in Bild 1.2 dargestellt. Mit Primärform sind die natürlichen Energievorkommen bezeichnet, Sekundärformen sind erst durch Umwandlung aus Primärformen entstanden. Bild 1.2 gibt ohne Anspruch auf Vollständigkeit einen Überblick über die Aussage des *Energiegesetzes*, das lautet:

Energie kann nicht aus dem Nichts entstehen und nicht vernichtet werden (*Robert Mayer*). Jede Energieform kann mehr oder weniger weitgehend in eine andere Erscheinungsform umgewandelt werden, wobei in einem abgeschlossenen System die Summe der Energiebeträge konstant bleibt.



Ausnutzung:

Chemisch - Thermisch	80 - 92 %
Thermisch - Mechanisch	20 - 60 %
Mechanisch - Elektrisch	90 - 98 %
Chemisch - Elektrisch	50 - 70 %

Bild 1.2 Schematische Verdeutlichung der technischen Möglichkeiten von Energieumwandlungen (Derzeitiger Stand der Technik)

Im Einzelnen versteht man unter Kraftmaschinen: Verbrennungsmotor, Gasturbine, Kolbendampfmaschine, Dampfturbine, Wasserturbine, Windrad. Selbstverständlich ist auch der Elektromotor eine Kraftmaschine, ebenso wie der elektrische Generator eine Arbeitsmaschine ist. Arbeitsmaschinen sind im Prinzip alle Maschinen, die von einer Kraftmaschine angetrieben werden. In unserem speziellen Falle versteht man darunter jedoch nur: Kolbenpumpe, Kreiselpumpe, Kolbenverdichter, Turboverdichter.

Unterschiedskennzeichen somit:

- Kraftmaschinen liefern mechanische Energie.
- Arbeitsmaschinen benötigen mechanische Energie.

Die Einordnung der genannten Maschinen in das Energieumwandlungsschema von Bild 1.2 zeigt Bild 1.3.

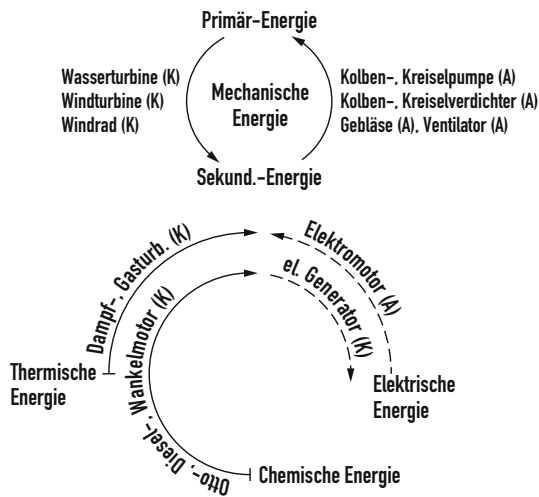


Bild 1.3

Einordnung der Kraftmaschinen (K) und Arbeitsmaschinen (A) in das Energieschema von Bild 1.2

