

HANSER



Leseprobe

zu

Energieumwandlung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

von Wolfgang Kalide †, Herbert Sigloch und Volker Gehrke

Print-ISBN: 978-3-446-47569-4
E-Book-ISBN: 978-3-446-47727-8

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446475694>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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

■ 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.

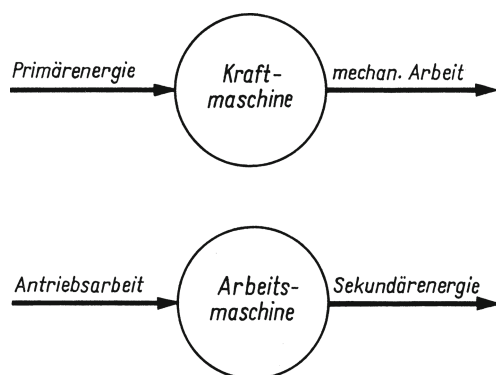


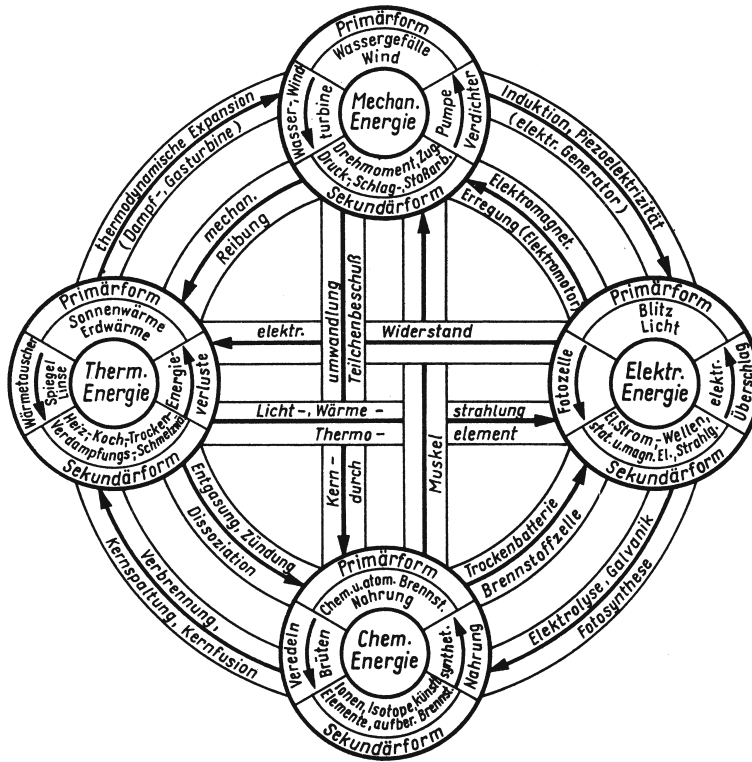
Bild 1.1

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.

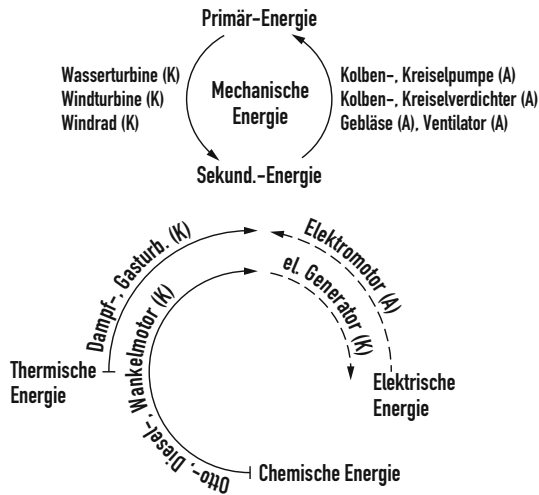


Bild 1.3

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

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.

$$p = F_n / A \quad (2.5)$$

$F_n = \text{Normalkraft} \perp \text{Fläche}$

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 $p_{\text{ü}} = p - p_{\text{B}}$ mit p_{B} barometrischer Luftdruck (Atmosphärendruck)
- Unterdruck $p_{\text{u}} = p_{\text{B}} - p = -p_{\text{ü}}$ (Bild 2.1).

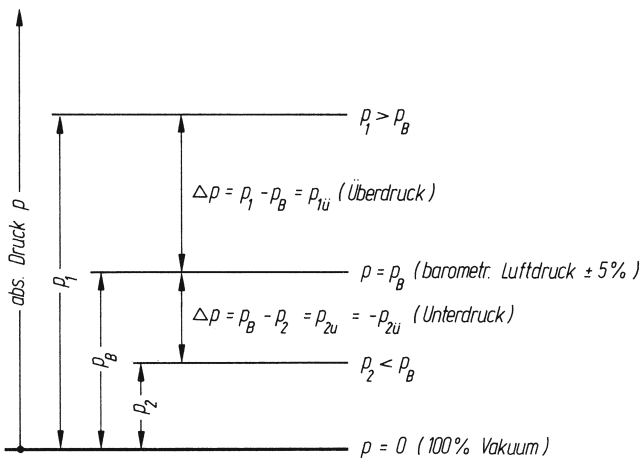


Bild 2.1 Absoluter Druck, Über- und Unterdruck

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 mithilfe 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 $g_n = 9,806\ 65\ \text{m/s}^2 \approx 9,81\ \text{m/s}^2$ 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 Verwechslungen 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 zeit-linear gilt

$$\begin{aligned} dW/dt &= \Delta W/\Delta t = W/t : \\ P &= W/t = F \cdot c = E/t = Q/t \end{aligned} \quad (2.13)$$

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 potenzieller Energie (Energie der Lage und Energie der Spannung) und kinetischer Energie.
- Thermische Energie (innere Energie, Enthalpie, Wärme).
- Elektrische Energie, magnetische 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 sind.

Index

Symbole

2-C-Turbinen 361

A

Abgasturbolader 199 f., 203
Abhitzedampferzeuger 470
Abhitzekessel 470
Ablenkungswinkel 20
Abscheidegefäße 431
Absolutdruck 8
Achsschub 259, 288, 312
Adiabate 46, 306
adiabates System 27
Aerostatik 50
Affinitätsgesetze 249, 329
Alternative Antriebe 224
Amortisation 413
Anergie 42
Anfahrbetrieb 455
Anlagekosten 408
– spezifische 409
Anstellwinkel 262 f., 271, 314, 500
Antriebsleistung 116, 136, 199, 242 f.,
250
Arbeit 3, 9
– indizierte 135
– technische 32, 36, 132
Arbeitsaufwand 298
Arbeitsdiagramm 35, 43, 129
Arbeitshub 152
Arbeitsmaschinen 3
Ascheschmelzverhalten 426

Aufheizungsgrad 150
Aufladung 189, 193, 197
Auftriebskraft 11
Ausfluss-Form 343
Ausflusszahl 159, 321
Ausgleichkolben 357
Auslass-Drehschieber 191
Ausschubhub 153
Außenkühlung 128, 301
Austrittsdrall 343
Avogadro-Zahl 406
Axialgitter 231
Axialmaschine 232
Axialüberdruckgebläse 312
Axialverdichter 126, 281, 311

B

Bahnstromnetz 386
Beaufschlagungsgrad 319, 326
Becher 345
Behälterstandsregelung 85
Belastung
– mechanische 192
Belastungsgrad 273, 316, 498
Belastungszahl 273
Benzin 206
Bernoullische Gleichung 13 f.
Beschleunigungspumpe 161
Betriebspunkt 274
Betriebsverhalten 274
Betz-Effizienz 493
Bindungsenergie 405

- biogener Anteil 405
- Biomasse 393, 398, 404
- Blindleistungsbereitstellung 398
- Blockheizkraftwerk (BHKW) 484
- Blockregelung 450
- Bohrlochpumpen 294
- Borsäure 458
- Boxermotor 211
- Braunkohle 398 f.
 - Heizwert 399
- Brennelement 461
- Brenner 427
- Brennerfeuerung 426
- Brenngas 67
- Brenngasfeuchte 71
- Brennkammer 424
- Brennstab 460
- Brennstoff 67, 172
- Brennstoff-NO_x 438
- Brennstoffpreise 411
- Brennstoffregelung 175, 451
- Brennwert 68
- Bruttostromerzeugung 389
- Bundesnetzagentur 384

- C**
- Carnotisierung 448
- Carnot-Prozess 53, 167, 205
- Cetanzahl 208
- chemische Energie 10
- Clausius-Rankine-Prozess 434
- CO₂-Zertifikate 411
- Colebrook-Diagramm 20
- Curtis-Turbinen 361

- D**
- Dampferzeuger 423
- Dampferzeugung 428
- Dampffilm 75
- Dampfkraftwerk 421
 - Berechnung der Hauptgrößen 443
 - Regelung 450
 - Schutzfunktionen 456
 - Wirkungsgradverbesserung 447
- Dampfturbine
 - mehrstufige 358
 - Regelung 365
- Dampfturbinen 349
- Deionat 437
- DeNO_x-Anlage 439
- Denox-Katalysator 425
- D-Glieder 89
- Diaphragma-Pumpe 114
- Dichte 7
- Diesel-Klopfen 174
- Dieselmotor 167
 - Vergleich Ottomotor 168
- Differentialpumpe 113
- Diffusor 14
- Diffusorwirkungsgrad 309, 341
- Doppelkolbenmaschine 189
- Doppelkolbenmotor 213
- Drallsatz 22, 237
- Drehkolbenpumpe 123
- Drehkolbenverdichter 126, 144 f.
- Drehmoment 9
- Drehmomentenzahl 315
- Drehzahl
 - spezifische 252, 258, 266, 287
- Drehzahlregelung 85, 87
- Drosselklappe 157
- Druck 7, 25
 - mittlerer 155, 189
- Druckbehälter 505
- Druckenergieverlust 122
 - Rohrleitungen 19
- Druckhub 120
- Druckpumpe 114
- Druckregelung 84 f.
- Druckstufung 362
- Druckteil 432
- Druckverhältnis
 - kritisches 362
- Druckwasserreaktor 457, 462
- Druckwelle 176
- Druckzahl 254 f., 328, 331

Durchflussgleichung 12, 272
Durchflussstromregelung 86
Durchmesser 256
Durchmesser, spezifischer 256
Durchsatz 12
Durchsatzgrad 149
Durchsatzzahl 331
Durchströmturbine 349
Düse 14
Düsenausflusszahl 160

E

Economiser 436
Eigenbedarf, elektrischer 389
Einheitsdrehzahl 329
Einlochdüse 171
Einspritzpumpe 214
Einspritzung 170
Einspritzventil 170, 177
Einwellenanlage 470
Einzylinder-Kleinverdichter 128
elektrische Energie 10
Elektroantriebe 224
Elektronenvolt 406
Elementaranalyse 70
Elmo-Pumpen 146
Energie 10
– Formen 10
– innere 10, 27
Energieflussbild 446
Energiefluss-Schaubild 79
Energiegleichung 13, 33, 53
Energiekette 374
Energiekosten 407
– fix 408
– variabel 410
Energierücklaufzeit 500
Energiespeicherung 503
Energieumsetzung 263
Energieumwandlung 1
– Laufrad 319
– Leitapparat 318
Energiewende 391
Energiewirtschaft 383

Enthalpie 32
Enthitzer 436
Entnahme-Kondensationsturbine 481
Entnahmeturbine 373
Entropie 40
ENTSO-E 386
Erdgas 399, 401
– Heizwert 402
Erdöl 206, 398
Erneuerbare, Energie, Anlagen (EAA) 393
Erstarrungstemperatur 60
Euler-Gleichung 22
europäische Verbundnetze 384
Exergie 30, 42

F

Fahrturbine 375
Fallbeschleunigung 8
Fallstromvergaser 160
Fällverfahren 442
Festdruckbetrieb 453
Feuerraum 424
Feuerraumtrichter 425
Feuerungsanlage 425
Flammenstabilität 426
Flugasche 439
Flügelpumpe 113
Flugmotor 212
Flugtriebwerke 377
Fluidspeicherung 504
Fluidvolumen 11
Flüssigkeitsringpumpe 125, 146
Flüssigkeitswärme 61
Flusskraftwerk 420 f.
Förderarbeit
– spezifische 115, 242, 249, 283
Förderregelung 141
Förderstrom 141, 143, 145, 249
Förderstrom-Querschnitt 237
Fördervolumen 114, 142
fossile Brennstoffe 391
Francis-Turbine 333, 420
Freihang 344, 422
Freikolbenmotoren 196

Freistrahlturbine 422
 Frequenzgang 88
 Frischluftgebläse 425
 Froude-Theorem 490
 fuelswitch 389
 Füllungsgrad 130 f., 150

G

Gase
 – feuchte 50
 Gasgemisch 49
 Gasgleichung 26, 37
 Gaskonstante 37
 Gaspedal 161
 Gasturbine 167
 Gasturbinenanlage 374, 381
 – offene 375
 Gaswechsel 185
 Gegendruckregelung 86
 Gegendruckturbine 373, 481
 Gegenkolbenmotor 211
 Gegenmasse 105
 Gehäusekühlung 133
 Gemischbildung 152, 156, 170
 Gesamtgradientalkraft 99
 Gesamtwirkungsgrad 122
 Gesamtzustand 51
 gesättigter Dampf 61
 Geschwindigkeitsplan 227, 320
 Geschwindigkeitsstufung 359
 Geschwindigkeitszahl 318
 gestufte Verbrennung 426
 Gewichtskraft 11
 Gezeitenkraftwerk 419
 Gleichdruck-Druckstufung 364
 Gleichdruckstufe 332, 355
 Gleichdruckturbinen 331
 Gleichdruckverbrennung 170, 374
 Gleichdruckverfahren 226, 351, 355
 Gleichraumprozess 154
 Gleichraumverbrennung 374
 Gleichstromspülung 188 f.
 Gleitdruckbetrieb 452
 Grad Celsius 26

Grenzschicht 15
 Großdampfkessel 294
 Größen
 – allgemeine physikalische 7
 Großhandelsstrompreis 389
 Großturbine
 – mehrstufig 369
 GUD-Kraftwerk 469
 – Berechnung der Hauptgrößen 475
 – Dreidruckprozess 473
 – Eindruckprozess 471
 – Mehrdruckprozess 472
 – Umweltbilanz 476

H

Halteenergie
 – spezifische 285
 Handregelung 83
 Hauptfeuerung 425
 Hauptgleichung 317
 – Strömungsmaschine 231
 Hauptkondensatpumpe 437
 Hauptkühlwassersystem 437
 Hauptsatz
 – erster, der Thermodynamik 27, 29
 – zweiter, der Thermodynamik 40
 HD-Vorwärmer 436, 449
 Heizkraftwerk 484
 Heizöl
 – Heizwert 400
 Heizwert 68
 Hermetic-Pumpe 293
 Hochdruck-(Gebirgs-)Kraftwerk 421
 Hochdruckkraftwerk 420
 Höchstdruckpumpe 290
 Höhen-Aufladung 199
 Höhengleichung 13
 Hohlzug 23
 Holz
 – Heizwert 404
 h,s-Diagramm 64
 h,T-Diagramm 72
 Hubkolbenpumpe 113
 Hubraumleistung 151

Hydromechanik 10
Hydrostatik 10
hydrostatisches Grundgesetz 11
Hydrostößel 186

I

I-Glieder 89
Indikatordiagramm 150
indizierte 136
Industriekraftwerk 365
Inselbetrieb 455
Investitionskosten 408
Isentrope 43, 46
Isobare 44, 46
Isochore 44, 46
Isotherme 45 ff.

K

Kanalradpumpen 292
Kaplan-Turbine 335, 420
Kaverne 513
Kavitation 23, 284, 343
Kegelventil 121
Kelvin 26
Kenngrößen 265
Kennliniendiagramm 275 f.
Kernbrennstoff 405, 457, 460
Kernenergie 398
Kernkraftwerk 457
– Reaktortypen 462
– Sicherheitskonzept 465
Kernladungszahl 406
Kernspaltung 405
Kerosin 208
Kippmoment 109
Klappe 121
Klopfen 207
Klopfestigkeit 207
Kohlenstaubbrenner 424
Kolbenkraftmaschine 93
Kolbenmotor 147
– Aufbau 148
Kolbenmotoren 213

Kolbenpumpe 93
Kolbenpumpen 112
Kolbenverdichter 126 f., 137
– mehrstufiger 137
– zweistufiger 129
kombinierte Gas- und Dampfturbinen-
kraftwerke. *Siehe* GUD-Kraftwerk
Kompressorventil 139
Kondensatormaschinen 64
Kondensatstopp 453
Kontinuitätsgleichung 11 f.
Kontraktionszahl 158
Konvektion, freie 74
Körper
– feste 26
– flüssige 26
– gasförmige 26
Kraft 9
Kräfteausgleich 108
Kraftmaschinen 3
Kraftstoffdurchsatz 158
Kraftstoffe 206
– Energieinhalt 209
Kraftstoffverbrauch 155
– spezifischer 150, 224
Kraft-Wärmekopplung 479
– Berechnung der Hauptgrößen 480
– Industriekraftwerke 483
– Verbrennungsmotor 482
Kraftwerksblock 421
Kraftwerksbrennstoffe 399
– fest 399
– flüssig 400
– gasförmig 401
Kreiselpumpe
– Sonderformen 291
Kreiselpumpen
– säurefeste 293
– selbstansaugende 291
Kreiselverdichter 279
Kreiskolbenmotor 194, 220
Kreisprozesse 44, 52, 56
Krümmerverlust 20
Kühlmittelpumpe 461
Kühlturm 437

Kühlung 192, 209
 Kurbelbetrieb 93
 Kurbelkreis 187
 Kurbelverhältnis 94

L

Labyrinthdichtung 369
 Ladeluftkühlung 200
 Lader 200
 Längendehnung 26
 Laufrad
 – axiales 322
 – radiales 228, 251, 319
 Laufradformen 287, 308, 339
 Laufrad-Schaufelformen 247
 Laufwasserkraftwerk 420
 Laufzahl 325, 328
 Laval-Druckverhältnis 353
 Laval-Düse 53, 318, 351
 Leerlaufregelung 139 f.
 Leichtwasser 458
 Leidenfrostsches Phänomen 75
 Leistung 10, 304
 – effektive 151
 – indizierte 142
 – indizierte 135, 151
 Leistungsbegriff 323
 Leistungskurve 223
 Leistungsregelung 175
 Leistungszahl 316
 Leitapparat 318, 324, 351
 Leitapparatverlust 323
 Leittechnikanlage 450
 Liefergrad 198
 Lieferzahl 254 f., 265
 Ljungström 503
 LNG, Liquefied Natural Gas 401
 Ionenaustauscher 442
 Luftaufwand 149
 Luftkühlung 209
 Luftpumpe 292
 Luftschaube 314
 Luftspeichermaschinen 172
 Luftspülung 189

Luftturbine 487
 – Leistung 491
 Luftüberschusszahl 150
 Luftverdichter 126
 Luftverhältnis 150
 Luftverhältnis (Luftüberschuss) 70
 Luftvorwärmer 375, 378, 424 f.
 Luvo 425

M

Masse 7
 Massenausgleich 105
 Massendefekt 405
 Massenergie 10
 Massenträgheitsmoment 103 f.
 Massenzahl 406
 mechanische Energie 10
 Mehrarbeitsbedarf 297
 Mehrlochdüse 182
 Mehrzylinder-Anordnungen 210 f.
 Mehrzylindermaschine 102, 105, 108,
 110, 112
 Mehrzylindermotor 201
 Membranwände 433
 Mengenregelung 366
 Messfühler 82 f.
 Methan 401
 Minderarbeit 238
 Mischungsverhältnis 156, 165, 168
 Mitteldruckkraftwerk 420
 mittlere Geschwindigkeit 18
 Moderator 458
 molare Normvolumen 38
 molarer Heizwert 68
 Molmasse 37
 Momentanreserve 396
 Momentenausgleich 109
 Moody-Diagramm 20
 Müllverbrennung 399
 Multiplikationsfaktor 458
 Muscheldiagramm 277
 M-Verfahren 174

N

Nachdieseln 161
Nachladung 190f.
Nachschaltheizflächen 425
Nassdampfgebiet 62f., 65
Naturumlauf 431
Nebenkondensat 437
Nettostromerzeugung 389
Netzstabilität 396
Neutron 406
Neutronen 458
Neutronenfluss 458
Newtonsche Ähnlichkeitsregeln 276
nichtadiabates System 28
Niederdruckschaufel 65, 364
Nockenwelle 176
Normalatmosphäre 50
Normal Null 50
NOx 69
nukleare Kettenreaktion 458
Nullhöhe 50
Nullpunkt, absoluter 26
Nusseltsche Ausflussfunktion 54
Nusseltsche Funktion 54
Nusselt-Zahl 77
Nutzgefälle 252, 317, 342
Nutzleistung 199
Nutzmitteldruck 151

O

Oberbecken 423
offshore 487
Offshore-Anlagen 393
Oktanzahl 207f.
Ölfeuerung 425
onshore 487
Onshore-Anlagen 393
Ordnungszahl 406
Ottomotor 152
– Vergleich Dieselmotor 168

P

Parallelförderung 279
Pelton-Schaufeln 345
Pelton-Turbine 343, 422
Petroleum 208
P-Glieder 89
Photovoltaik 398
Photovoltaikanlage 393
Pinch-Point 472
Planimetrieren 64
Polytrope 45f.
Prandtl'sches Staurohr 16
Prandtl-Zahl 77
Pressung 25
Primärenergie 225
Primärenergieträger 398
Primärluft 426
Primärregelung 398
Propeller 312
Propellertheorie 496
Proton 406
Pumpe
– für chemische aggressive Flüssigkeiten 123
– kurbeltrieblose 122
– mit stetig veränderlicher Fördermenge 122
Pumpenanlage 116, 283
Pumpen-Düsen-System 185
Pumpenturbine 226
Pumpenventile 120f.
Pumpspeicherkraftwerk
– Energiebilanz 424
Pumpspeicherkraftwerke 422
p,v-Diagramm 65
p,V-Diagramm 35

Q

Querspülung 188

R

Raddurchmesser
 – mittlerer 326, 363
 Radformzahl 255, 287, 308, 328
 Radial-Dampfturbine 372
 Radialmaschine 232
 Radialverdichter 280, 308
 Radreibungsverlust 326
 Rauchgasentschwefelung 440
 – Kalkstein /Gips-Verfahren 440
 Rauchgasentstaubung 439
 Rauchgasentstickung 438
 Rauchgasreinigung 437
 Rauchgasweg 441
 REA-Absorber 441
 Reaktionsgrad 241, 266
 Reaktordruckbehälter 460
 Reaktorgebäude 459
 Reaktorkern (Core) 460
 Reaktorschnellabschaltung 460
 Redispach 389
 Regelfall 236, 241, 248
 Regelung 81, 139
 – mittelbare 85
 – unmittelbare 84
 Regenerator 503
 Reibungsarbeit 27
 Reibungsbeiwert 20
 Reihenmotor 211
 Residuallast 388, 507
 Restexpansionsverlust 155
 Reynolds-Zahl 18, 159
 – kritisch 19
 Rhombengetriebe 204
 Ringventil 121
 Rohrbündel 433
 Rohrreibungszahl 20, 119
 Rohrwand 433
 Roots-Gebläse 141 f.
 Rotationsverdichter 141
 rotierende Massen 396
 Rotorgütegrad 493
 Rücklaufsystem 479
 Rückverstromung 512, 514

S

Sankey-Diagramm 79, 447
 Sattdampf 61
 Saughöhe 117, 284 f.
 Saughub 115, 117, 152
 Saugpumpe 113
 Saugschlitz 123, 125
 Saugzuggebläse 425
 schädlicher Raum 129
 Schadraum 129
 Schaufelform 266
 Schaufelplan 320
 Schaufelräder
 – halboffene 310
 Schaufelschnitt 231, 267
 Schaufelwinkel 231, 318
 Schaufelzahl 273
 Schiffsmotor 192, 202
 Schiffsschrauben 316
 Schlitzsteuerung 189
 Schmelztemperatur 60
 Schmierölpumpe 124
 Schmierung 133, 139, 145, 192
 Schnellläufigkeit 339
 Schraubenpumpe 125
 Schubbelastungsgrad 498
 Schubstangenmasse 99
 Schubzahl 315
 Schwarzstart 419
 Schweredruck 11
 Schwerwasser 458
 Schwimmgleichgewicht 11
 Schwingkolben-Handpumpe 113
 Schwungradberechnung 102
 Sechszylinder-Reihenmotor 212
 Seitenkanalkraftwerk 421
 Seitenkanalumpen 291
 Sekundärluft 426
 Sekundärregelung 398
 Selbstregelungseffekt des Netzes 396
 selektives katalytisches Verfahren 439
 selektives nichtkatalytisches Verfahren
 439
 Sichter 427

- Siedetemperatur 60
 - Siedewasserreaktor 457, 463
 - Signalverstärker 85
 - SO₂-Konzentration
 - Rauchgas 440
 - Spaltprodukte 459
 - Spaltverlust 327
 - Spannung 25
 - Speicherkraftwerk 420
 - Speisepumpe 436
 - Speisewasser 436
 - Speisewasseraufbereitung 442
 - Speisewasserregelung 451
 - Speisewasservorwärmung 448
 - spezifisches Volumen 12
 - Spiralgehäuse 238, 260
 - Spülpumpe 187
 - Spülverfahren 188
 - Staudruck 15
 - Staurohr 16
 - Stautemperatur 51
 - Stauverfahren 201
 - Steigstromvergaser 160
 - Steinkohle 398 f.
 - Heizwert 399
 - Stellglied 82
 - Sternmotor 211
 - Steuerkette 83
 - Steuerstäbe 458, 461
 - Steuerung 83
 - Steuerwinkeldiagramm 153
 - Steuerwinkelschaubild 187
 - Stickoxide 69
 - Stirling-Heißluftmotor 206
 - Stirlingmotor 203
 - stöchiometrischer Sauerstoffbedarf 70
 - Stoffmenge 38
 - Stoßverfahren 201
 - Strahlablenker 422
 - Strahlungsverdampfer 436
 - Strombedarf 387
 - Stromdichte 12
 - Stromgestehungskosten 412
 - Strommarkt 389
 - Strommix 390
 - Stromspeicher 507
 - Anforderungen 510
 - Anwendungsbereiche 511
 - Stromspeicherung 513
 - Strömung
 - laminar 17
 - Rohrleitungen 17
 - turbulent 17
 - Strömungsarbeitsmaschine 225, 232
 - Kenngrößen 251
 - radial durchströmte 232
 - Strömungsarbeitsmaschinen
 - axial durchströmte 262
 - Strömungsenergieverlust 19
 - Strömungsgeschwindigkeit 16
 - Strömungskraftmaschine 225, 316
 - Strömungsmaschine 225
 - Strömungsmaschinen
 - Hauptgleichung 21
 - Stromverlustkennziffer 480
 - Stufendruckverhältnis 301
 - Stufenregelung 139
 - Stufenschaltung 140
 - Stufenzahl 258
 - Stützfeuerung 425
 - Synchronmaschine 437
- T**
- Takt 151 f.
 - Talsperrenkraftwerk 421
 - Tangentialkraftdiagramm 95 f.
 - Teilbeaufschlagung 258, 326
 - Teildruck 49
 - Tellerventil 114, 121
 - Temperatur 26
 - Temperatur\, dynamische 51
 - Temperaturerhöhung 301
 - Temperaturregelung 86
 - Tertiärluft (Ausbrandluft) 426
 - thermische Energie 10
 - thermische Entgasung 443
 - thermisches NO_x 438
 - Tiefensaugerpumpen 292
 - Totalzustand 51

Totlage
 – obere 152
 – untere 152
 Tragflügel 262
 Tragflügeltheorie 488
 Transistorzündung 164
 Treibhausgas 391
 Trudelbetrieb 500
 T,s-Diagramm 43, 61
 Turbinendrehzahl 363
 Turbinenregelung 452
 Turbogruppe 434
 Turbosatz 434
 Turboverdichter 256, 296

U

Überdruck 8
 Überdruckstufe 332, 355
 Überdruckverfahren 226, 319, 351,
 356
 Überhitzungswärme 62
 Überisentropie 296, 306
 Überisotherme 300
 Überschallknall 25
 Übertragungsverhalten 88
 Umfangwirkungsgrad 324
 Umkehrspülung 188, 191, 215
 Ungleichförmigkeitsgrad 103
 Unterbecken 423
 Unterdruck 8
 Unterisentropie 45
 Uran 405, 457

V

Ventilsteuerung 93, 167
 Verbandsformel 70
 Verbrennung 67
 Verbrennungskraftmaschine 147
 Verbrennungsluft 72
 Verbrennungswärme 152
 Verdampfersysteme 431
 Verdampfungswärme 61
 Verdichter 126

Verdichtung
 – einstufige 128, 296
 – mehrstufige 301
 – wirkliche 133
 – zweistufige 128, 379
 Verdichtungsarbeit 128, 135, 296
 Verdichtungshub 152
 Verdichtungsstoß 23
 Verdrängerpumpen 112
 Verdrängungsverdichter 126
 Vergaser 152, 157
 Vergaserkraftstoff 207
 Vergleichsprozess 154
 Verluste 149
 Verstellpropeller 278
 Viertakt-Dieselmotor 167
 Viertaktmotor 185
 Viertakt-Reihenmotor 211
 Vierzylinder-Maschine 108
 Viskosität
 – dynamische 18
 – kinematische 18
 V-Motor 211
 Vollentsalzung 442
 Volumen 26
 Volumenänderungsarbeit 27f.
 Volumendehnung 26
 Volumendurchsatz 198
 Vordruckregelung 455
 Vorkammer 171
 Vorkammermaschinen 172
 Vorlaufsystem 479
 Vorschaltturbine 372
 Vortriebstheorie 312
 Vorzündung 152

W

Walzenring-Kohlenmühle 428
 Walzenringmühle 427
 Wankelmotor 194, 213, 220
 Wärme 29
 Wärmebedarf 387
 Wärmebelastung 192, 209
 Wärmediagramm 43

Wärmedurchgang 74
Wärmekapazität
– spezifische 30, 38
Wärmepumpe 485
Wärmeschaltplan
– GUD-Kraftwerk 471
– Kernkraftwerk 465
– Kohlekraftwerksblock 435
– Kraft-Wärmekopplung 481
Wärmetechnik 25
Wärmeübergang 74
Wärmeübergangszahl 209
Warmfestigkeit 447
Wasserdampf
– Arbeitsvermögen 63
Wasser-/Dampfkreislauf 434
Wasserelektrolyse 513
Wasserkraft 398
Wasserkraftanlage 393
Wasserkraftwerk 338, 419
Wasserkühlung 209
Wasserringpumpen 291
Wasserschloss 420
Wasserstoff 402
– als Speichermedium 511
– Heizwert 403
Wasserstrahlpumpen 295
Wasserturbine 316, 332
– Wirkungsgrad 348
Widerstandszahl 21
Wiedererwärmungsfaktor 306
Windangebot 488
Windenergie 487, 491
– aerodynamische Grundlagen 490
Windkessel 114, 139
Windkonverter 487
Windkraft 398
Windkraftanlage 393
Windleistung 491
Windrad 487
Windturbine 487
– Axialkraft 493
– Kennwerte 494

Wirbelbrennkammer 174
Wirbelkammer 173
Wirbelkammermaschinen 172
Wirkungsgrad 78, 149, 323
– effektiver 80
– hydraulischer 122, 243
– indizierter 122, 135
– innerer 80
– mechanischer 80, 122, 136
– thermischer 80
– volumetrischer 122, 133, 243
Wobbe-Index 402

Z

Zahnradpumpe 124, 141
Zentrifugalverdichter 308
Zölly-Düse 318, 351
Zündfeuerung 424
Zündgrenzen 156
Zündung 163
– vollelektronische 163f.
Zusatzwasser 442
Zustandsänderungen 45
– Wasserdampf 60
Zustandsgleichung
– des idealen Gases 36
– kalorische 38
– thermische 36
Zustandsgrößen
– thermische 25
Zuteiler 423, 451
Zwangsdurchlauf 431
Zwangsumlauf 431
Zweitakt-Dieselmotor 188, 215
Zweitakt-Reihenmotor 212
Zweitakt-Tauchkolben 193
Zweitaktverfahren 187
Zweizylindermotor 211
Zwischenüberhitzer 436
Zwischenüberhitzung 436
Zylinderkopf 171