

Hellmuth Schulz

Die
Pumpen

13. Auflage



Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York

Hellmuth Schulz

Die Pumpen

Arbeitsweise Berechnung Konstruktion

13., neubearbeitete Auflage

Mit 349 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1977

Dr.-Ing. Hellmuth Schulz

ehem. Dozent für Strömungsmaschinen
an der Staatlichen Ingenieurschule Kiel

Die 12. Auflage, von H. Schulz bearbeitet, erschien
unter dem Titel „Fuchslocher/Schulz, Die Pumpen“.

ISBN 3-540-08098-8 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-08098-8 Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

ISBN 3-540-03805-1 12. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
ISBN 0-387-03805-1 12th ed. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin

Library of Congress Cataloging in Publication Data

Schulz, Hellmuth. Die Pumpen. Twelfth ed. (1967) by E. Fuchslocher
and H. Schulz. Bibliography: p. Includes index.

1. Pumping machinery. I. Fuchslocher, Eugen. Die Pumpen.
II. Title. TJ 900. F8 1977 621.2'52 77-6685

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© by Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1938, 1941, 1943, 1948, 1955, 1959, 1963, 1967 and 1977.
Printed in GDR.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch 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.

2060/3020-5 43210

Die Pumpen

Vorwort zur dreizehnten Auflage

Die stetig fortschreitende Entwicklung auf dem Gebiete der Flüssigkeitsförderung führte zu einer neuerlichen Überarbeitung des Buches, das nach der in der neunten Auflage von mir vorgenommenen Neugestaltung und Erweiterung bisher unter dem Titel „Fuchslocher/Schulz, Die Pumpen“ erschienen ist.

Zahlreiche Abschnitte wurden ergänzt, umgearbeitet und in Wort und Bild dem heutigen Stand der Technik angepaßt, andere sind neu hinzugekommen.

So hat auf dem Gebiete der „Kreiselpumpen“ die bislang nur kurz behandelte Wasserringpumpe eine ausführliche Darstellung erfahren. Obwohl diese Bauart für die Flüssigkeitsförderung von untergeordneter Bedeutung ist, und ihre eigentliche Verwendung als Vakuumpumpe das hier vorliegende Stoffgebiet nicht unmittelbar betrifft, erschien mir eine eingehende Behandlung dieser Pumpe trotzdem wünschenswert, weil ihr als Entlüftungseinrichtung mittelbar selbstansaugender Kreiselpumpen eine wichtige Aufgabe zukommt.

Aus der Zahl der im Bereich der Kreiselpumpen neu bearbeiteten Teile seien ferner genannt: Die Saugverhältnisse, der Achsschubausgleich, die Druckzahl der Axialpumpe, die Normpumpe, die Kesselspeisepumpe, die Seitenkanalpumpe sowie die Freistrompumpe.

Das Kapitel „Hubkolbenpumpen“ wurde u. a. durch Ausführungen über Volumenschwankungen und Kolbenbeschleunigungen, über die Halteenergie sowie die wegabhängige Steuerung ergänzt. Ausgewählte Beispiele zeigen die praktische Ausführung von Steuerungen dieser Art. Weitere Abschnitte betreffen die bisher nicht behandelte Membranpumpe und das pulsationsfreie Fördern mit Hubkolbenpumpen ohne Windkessel.

In der Gruppe „Pumpen mit umlaufendem Verdränger“ haben die Drehkolbenpumpe, die Zahnradpumpe und die mittels Schleppströmung fördernde Einspindelschraubenpumpe (Gewindepumpe) besondere Beachtung gefunden.

Die im Kapitel „Strahlpumpen“ eingefügten Diagramme erleichtern die Berechnung der Wasserstrahlpumpe.

Durch die Vermehrung des Stoffes hat sich auch die Zahl der Rechenbeispiele erhöht. Wie bisher wurde auf eine sorgfältige Durchführung des Rechnungsganges besonderer Wert gelegt.

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit und zur Begrenzung des Umfanges erwies es sich als geboten, den ständig wachsenden Wissensstoff auf das Wesentliche und die zahlenmäßig kaum überschaubaren Ausführungsmöglichkeiten auf typische und praktisch wichtige Bauarten zu beschränken. Ausführungen über weitergehende Einzelheiten und über Vorgänge und Erscheinungen, die das behandelte Gebiet nur mittelbar betreffen, sind durch kleineren Druck kenntlich gemacht.

An die Stelle der in den früheren Auflagen und in der technischen Literatur bisher allgemein benutzten Formelzeichen sind die in DIN 1304 (Nov. 1971) festgelegten neuen Zeichen getreten. Außerdem wurden die Begriffe, Formelzeichen und Einheiten nach DIN 1944 (Abnahmeversuche an Kreiselpumpen, Okt. 1968) und nach DIN 24260 (Kreiselpumpen und Kreiselpumpenanlagen, Juni 1971) berücksichtigt, soweit sie dem bereits in der 12. Auflage eingeführten Internationalen und heute in der Bundesrepublik gesetzlichen Einheitensystem entsprechen. Diese Änderungen hatten die Erneuerung zahlreicher Abbildungen zur Folge.

Das Schrifttumsverzeichnis des Anhangs wurde durch Zugänge aus den letzten Jahren ergänzt. Es beschränkt sich auf die deutschsprachige Literatur. Einige ältere Arbeiten sind nicht mehr aufgeführt.

Dem Springer-Verlag danke ich für die Berücksichtigung besonderer Wünsche.

Kiel, im Juli 1977

HELLMUTH SCHULZ

Vorwort zur neunten Auflage

Das ursprünglich von Prof. Matthiessen und Dipl.-Ing. Fuchslocher verfaßte und später von Dipl.-Ing. Fuchslocher allein bearbeitete Buch hat sich in den interessierten Kreisen großer Beliebtheit erfreut. Obwohl fast jede Neuauflage textlich durch Einfügung neuer Abschnitte ergänzt und durch Austausch veralteter gegen zeitgemäße Konstruktionen verbessert wurde, erwies sich jetzt eine gründliche Überarbeitung als unumgänglich. Auf Veranlassung von Herrn Fuchslocher wurde mir im Herbst 1953 vom Verlag die Neubearbeitung des Buches übertragen. Die nun vorliegende neunte Auflage ist mit Rücksicht auf die schon in der Vorkriegszeit im Pumpenbau eingetretene Entwicklung völlig neu gestaltet und beträchtlich erweitert worden.

Unter den Fördereinrichtungen für Flüssigkeiten hat die Kreiselpumpe in den letzten Jahrzehnten eine stetig zunehmende Verbreitung gefunden und eine überragende Bedeutung im Wirtschaftsleben erlangt. Diese Tatsache machte eine eingehendere Behandlung dieser vielgestaltigen Pumpengattung und eine entsprechende Vergrößerung des ihr zufallenden Stoffgebietes notwendig. Unter Beachtung der inzwischen neu gewonnenen Erkenntnisse wurde nicht nur der theoretische Teil vertieft, sondern auch Berechnung und Konstruktion unter Heranziehung zahlreicher Ausführungsbeispiele aus der Praxis stärker betont. Neu aufgenommen ist die bisher in Theorie und Berechnung nicht behandelte Axialpumpe.

Die Kolbenpumpe großer Leistung ist heute aus der Fabrikation fast ganz verschwunden. Die Produktion der einschlägigen Industrie beschränkt sich hauptsächlich auf Kolbenpumpen kleiner und mittlerer Leistung unter Bevorzugung von Arbeitsgebieten, auf denen die Kolbenpumpe der Kreiselpumpe gegenüber wettbewerbsfähig oder dieser überlegen ist. Trotz des zahlenmäßigen Rückgangs wird die Kolbenpumpe — wenngleich auf Einzelgebiete beschränkt — ihre Stellung als Fördereinrichtung auch in Zukunft behaupten. Es ist deshalb der Umfang des bisherigen Stoffes im ganzen beibehalten, im einzelnen jedoch ebenfalls neu gestaltet und dem Fortschritt der Technik angepaßt.

In neuerer Zeit sind auch auf dem Gebiet der Strahlpumpen beachtliche Fortschritte in Theorie und Berechnung zu verzeichnen. Sofern Treib- und Fördermittel den gleichen Aggregatzustand haben, ist die Strahlpumpe heute einer exakten Berechnung zugänglich, während bei unterschiedlichem Aggregatzustand der rechnerischen Erfassung noch erhebliche Schwierigkeiten entgegenstehen. Die praktische Ausführung ist im letzteren Falle im wesentlichen auf empirische Erkenntnisse angewiesen. Mit Rücksicht auf die dieser Einführung dem Umfange nach gesteckten Grenzen mußte eine eingehende theoretische Behandlung dieser Pumpengattung vorläufig zurückgestellt und der interessierte Leser auf die vorliegende einschlägige Literatur verwiesen werden.

Aus dem gleichen Grunde ist auf die Besprechung solcher Pumpenarten verzichtet worden, die im Wirtschaftsleben nur von untergeordneter Bedeutung oder seltener anzutreffen sind. Das Buch erhebt daher keinen Anspruch auf Erfassung des Gesamtgebietes des Pumpenbaus. Es will vielmehr nur die Grundkenntnisse vermitteln, die für die Berechnung und Konstruktion der wichtigsten Pumpenarten notwendig sind.

In allen Teilen wurde auf eine möglichst anschauliche Darstellung Wert gelegt und der dargebotene Stoff durch eine Reihe sorgfältig durchgearbeiteter Beispiele belebt. Für das Verständnis ist neben einer mathematischen Vorbildung die Kenntnis der Grundlehren der Hydraulik erforderlich.

Möge das Buch auch in seiner neuen Gestalt dem angehenden wie dem praktisch tätigen Ingenieur von Nutzen sein!

Den Firmen, die mich freundlicherweise durch Überlassung von Konstruktionszeichnungen und anderem Bildmaterial unterstützten, sei auch an dieser Stelle herzlich gedankt. In gleicher Weise gilt mein Dank dem Verlag für die gute Ausstattung des Buches und die Bereitwilligkeit, mit der er meinen besonderen Wünschen entgegengekommen ist.

Kiel, im Juni 1955

HELLMUTH SCHULZ

Inhaltsverzeichnis

Erläuterungen zur Anwendung des MKS-Systems	1
Allgemeines über die Förderung von Flüssigkeiten	6

I. Kreiselpumpen

A. Wirkungsweise und Bauarten	8
B. Theoretische Grundlagen und Berechnung der Radialpumpe	10
1. Ermittlung der spezifischen Förderarbeit und der Förderhöhe	10
2. Die Geschwindigkeitsverhältnisse am Laufrad	13
3. Die Druckerzeugung im Lauf- und Leitrad. Die spezifische Schaufelarbeit $Y_{\text{Sch}\infty}$. Die theoretische Förderhöhe $H_{\text{th}\infty}$	14
a) Die Druckerzeugung im Laufrad	14
b) Die Druckerzeugung im Leitrad	16
4. Der Schaufelwinkel β_2	18
5. Einfluß der endlichen Schaufelzahl auf die spezifische Schaufelarbeit und die theoretische Förderhöhe	20
6. Die spezifische Förderarbeit. Die wirkliche Förderhöhe	25
7. Die spezifische Drehzahl	25
8. Der Reaktionsgrad. Gleichdruck- und Überdruckwirkung	30
9. Die Druckzahl	33
10. Verluste und Wirkungsgrade der Kreiselpumpe. Der Kraftbedarf	34
a) Hydraulische Verluste. Hydraulischer Wirkungsgrad	34
b) Spaltverluste. Liefergrad	24
c) Innere Leistungsverluste. Innerer Wirkungsgrad	37
d) Äußere Leistungsverluste. Mechanischer und Gesamt-Wirkungsgrad	39
e) Kraftbedarf	40
11. Die Zahl der Laufradschaufeln	40
12. Die axiale Eintrittsgeschwindigkeit c_A	41
13. Entwurf der einfach gekrümmten Radialschaufel	44
14. Die Leitvorrichtungen	48
a) Der Leitring	48
b) Das Leitrad	51
c) Das Spiralgehäuse	58
15. Bestimmung der Hauptabmessungen und Entwurf des Lauf- und Leitrades einer Radialpumpe mit einfach gekrümmter Laufschaufel. Beispiel	68
I. Laufrad	68
a) Laufradeintritt	68
b) Laufradaustritt	71
II. Leitrad	74
16. Berechnung und Entwurf des Laufrades mit räumlich gekrümmter Schaufel ..	76
a) Allgemeine Gesichtspunkte	76
b) Entwurf der Schaufelfläche	80
x) Ermittlung des Strombahnenanfangs im Grundriß mit Hilfe von Kegelmänteln. Beispiel	80

β) Winkel- und längentreue Übertragung der Strombahnen aus der Ebene auf die Stromflächen. Beispiel	87
γ) Rechnerische Bestimmung der Strombahnen. Beispiel	94
17. Berechnung und Entwurf des Leitrades mit räumlich gekrümmten Schaufeln. Beispiel	101
18. Berechnung und Entwurf einer Spirale mit kreisförmigem Querschnitt. Beispiel	106
C. Theoretische Grundlagen und Berechnung der Axialpumpe	108
19. Überleitung	108
20. Der Einzelflügel in der unbegrenzten gleichförmigen Strömung	110
21. Das Schaufelgitter	116
22. Die Berechnung des Axialrades	117
23. Kleinster Nabendurchmesser. Die Druckzahl	122
24. Das Leitrad	125
25. Der Reaktionsgrad	126
26. Berechnungsbeispiel	128
a) Laufrad	128
b) Leitrad	134
D. Betriebliches Verhalten	136
27. Die Drosselkurve. Das Affinitätsgesetz (Newtonsches Ähnlichkeitsgesetz)	136
28. Der Betriebspunkt der Pumpe. Parallelbetrieb	138
29. Labiler Zweig der Drosselkurve	139
30. Maßnahmen zur Erzielung stabiler Drosselkurven	141
31. Kennlinien mit dimensionslosen Koordinaten	143
32. Drucksteigerung durch Impulsaustausch	144
33. Die Kennlinien der schnellläufigen Kreiselpumpe	145
34. Die Saugverhältnisse der Kreiselpumpe	151
a) Die spezifische Saugarbeit. Die größte erreichbare Saughöhe	151
b) Kavitation	156
c) Kavitationsfreier Arbeitsbereich	159
d) Saugzahl und Kavitationsbeiwert	164
35. Die Regelung der Kreiselpumpe	168
36. Änderung der Pumpenleistung	173
37. Modellgesetze	177
38. Förderung zäher Flüssigkeiten. Beispiel	181
E. Bauliche Einzelheiten	187
39. Laufräder	187
40. Welle	188
a) Allgemeines	188
b) Bemessung der Welle unter Berücksichtigung der kritischen Drehzahl	188
α) Die kritische Drehzahl	189
β) Eigenschwingungszahl der ruhenden Welle und kritische Drehzahl	191
γ) Graphische Ermittlung der kritischen Drehzahl einer beliebig belasteten Welle von sprungweise veränderlichem Querschnitt	192
41. Stopfbuchsen	194
42. Gleitringdichtungen	197
a) Wirkungsweise und betriebliches Verhalten	197
b) Ausführungsbeispiele	202
c) Hydrodynamische Gleitringdichtungen	206
43. Lager	207
44. Gehäuse	209
45. Achsschub und Achsschubausgleich	211
a) Radialpumpe	211
b) Axialpumpe	219
F. Ausführungsbeispiele	220
46. Einstufige Radialpumpen	220

47. Schraubenpumpen (Halbaxialpumpen)	227
48. Propellerpumpen (Axialpumpen)	229
49. Mehrstufige Kreiselpumpen	233
G. Kreiselpumpen für Sonderzwecke	240
50. Heißwasserpumpen	240
a) Kesselspeisepumpen	240
b) Umwälzpumpen	250
51. Tiefbrunnenpumpen	254
a) Bohrlochwellenpumpe	255
b) Unterwassermotorpumpe	258
c) Tiefsaugerpumpe	263
52. Selbstansaugende Kreiselpumpen	267
a) Unmittelbar selbstansaugende Pumpen	267
α) Wasserringpumpe	268
β) Seitenkanalpumpe	281
γ) Ausführungsbeispiele unmittelbar selbstansaugender Pumpen	295
b) Mittelbar selbstansaugende Pumpen	300
53. Schmutzwasser- und Dickstoffpumpen	304
54. Säurefeste Kreiselpumpen, Chemiepumpen	311
II. Verdrängerpumpen	318
a) Hubkolbenpumpen	318
A. Bauarten und Wirkungsweise. Theoretischer und wirklicher Volumenstrom	318
55. Einfach wirkende Pumpen	318
56. Doppelt wirkende Pumpen	320
57. Differentialpumpen (Stufenkolbenpumpen)	321
58. Der wirkliche Volumenstrom. Volumetrischer Wirkungsgrad oder Liefergrad ..	322
B. Berechnung der Hubkolbenpumpe	323
59. Volumenstromschwankungen und Kolbenbeschleunigungen einfach wirkender ein- und mehrzylindriger Pumpen	323
60. Saugwirkung der einfach wirkenden Einzylinder-Tauchkolbenpumpe	327
a) Ohne Windkessel	327
b) Mit Windkessel	331
61. Die erreichbare geodätische Saughöhe. Die Haltedruckhöhe. Beispiel	332
62. Druckwirkung einer einfach wirkenden Tauchkolbenpumpe	335
a) Ohne Windkessel	335
b) Mit Windkessel	336
63. Wirkungsweise und Berechnung der Windkessel	337
a) Mit Rücksicht auf den Pumpengang. Beispiel	337
b) Mit Rücksicht auf das Anfahren der Pumpe. Beispiel	341
64. Die Steuerung der Hubkolbenpumpen	342
a) Wegabhängige Steuerung	342
b) Druckabhängige Steuerung	344
α) Arbeitsweise des Hubventils	344
β) Berechnung des Hubventils normaler Bauart. Beispiel	348
65. Die spezifische Förderarbeit der Hubkolbenpumpe. Die Förderhöhe	353
66. Wirkungsgrade und Kraftbedarf	355
a) Der hydraulische Wirkungsgrad η_h	355
b) Der volumetrische Wirkungsgrad oder Liefergrad η_l	356
c) Der indizierte Wirkungsgrad η_i	356
d) Der mechanische Wirkungsgrad η_m	356
e) Der Gesamtwirkungsgrad η	356

67. Bestimmung der Hauptabmessungen. Beispiel	357
68. Wirkungsweise und Bemessung des Druckkessels. Beispiel	361
C. Bauliche Einzelheiten	366
69. Pumpenkörper (Pumpenzylinder)	366
70. Kolben	369
71. Stopfbuchsen	372
72. Windkessel	374
73. Hubventile	376
D. Ausführungsbeispiele*	382
74. Einzylinderpumpen	382
75. Mehrzylinderpumpen	390
76. Preßpumpen	394
77. Pumpen mit stetig veränderlichem Kolbenhub	396
77a. Pulsationsfreies Fördern mit Hubkolbenpumpen ohne Windkessel	401
78. Schnellaufende Hubkolbenpumpen	405
79. Schwungradlose Hubkolbenpumpen (Dampfpumpen)	408
80. Erdölpumpen	416
b) Pumpen mit umlaufendem Verdränger	418
81. Zahnradpumpen	419
a) Wirkungsweise, betriebliche und konstruktive Merkmale	419
b) Berechnungsgrundlagen	421
c) Ausführungsbeispiele	427
82. Drehkolbenpumpen (Kreiskolbenpumpen)	429
83. Drehflügelpumpen (Zellenpumpen)	432
84. Schraubenspindelpumpen	435
III. Strahlpumpen	447
85. Allgemeines	447
A. Wasserstrahlpumpen	448
86. Arbeitsweise und Berechnung	448
87. Der Wirkungsgrad	456
88. Die erreichbare Saughöhe. Kavitation	458
89. Berechnungsbeispiele	462
90. Verhalten der Wasserstrahlpumpe bei Änderung des Betriebszustandes	467
B. Dampfstrahlpumpen (Injektoren)	472
91. Wirkungsweise und bauliche Ausführung	472
92. Der Wirkungsgrad	475
93. Betriebliches Verhalten	475
94. Ausführungsbeispiele	477
IV. Druckluftwasserheber (Luftmischheber)	480
95. Wirkungsweise	480
96. Die Geschwindigkeitsverhältnisse im Steigrohr	482
97. Wirkungsgrad und Auslegung	483
98. Berechnungsbeispiel	485
V. Stoßheber (hydraulischer Widder)	487
99. Arbeitsweise und konstruktive Durchbildung	487
100. Wirkungsgrad und anteilmäßiger Nutzwasserstrom	489
Schrifttum	491
Sachverzeichnis	502

Erläuterungen zur Anwendung des MKS-Systems

In den Gleichungen der Physik und der Technik sind physikalische Größen miteinander verknüpft. Größen sind meßbare Eigenschaften physikalischer Objekte, Vorgänge oder Zustände wie Länge, Masse, Energie, Geschwindigkeit, Zeit, Temperatur usw. Eine physikalische *Größe* enthält stets zwei Aussagen: Eine qualitative Aussage, die *Einheit*. Sie kennzeichnet die Art der Größe. Ferner eine quantitative Aussage, den *Zahlenwert*, der ihre Ausdehnung angibt. Schreibt man beispielsweise $l = 10 \text{ m}$, so hat die Größe l die Einheit Meter und den Zahlenwert 10. Der Zahlenwert ist hiernach die Zahl, mit der man die Einheit vervielfachen muß, um die Größe zu erhalten. Man kann deshalb definieren:

$$\text{Größe} = \text{Zahlenwert} \times \text{Einheit}.$$

Der Begriff „*Einheit*“ ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff „*Dimension*“. Die Dimension unterscheidet die Größen in anderer Weise. So hat in unserm Beispiel die Größe l die Einheit Meter und die Dimension einer Länge. Die Größe $v = 5 \text{ m/s}$ hat die Einheit Meter/Sekunde und die Dimension einer Geschwindigkeit. Bildet man das Produkt aus einer Kraft und einem Weg, so liefert dieses die Dimension einer Energie.

Bestimmte, voneinander unabhängige Grundeinheiten bilden ein Einheitensystem, z.B. das Technische Einheitensystem mit den Grundeinheiten Meter (m), Kraft (kp) und Sekunde (s). Den Gleichungen in dieser Auflage liegt das Internationale Einheitensystem¹ zugrunde, das in seinem die Mechanik betreffenden Teil als MKS-System bezeichnet wird. Seine Grundeinheiten sind

das Meter (m) als Einheit der Länge,
das Kilogramm (kg) als Einheit der Masse,
die Sekunde (s) als Einheit der Zeit.

Die Krafteinheit, das Newton (N), wird aus den Grundeinheiten abgeleitet. Das Newton ist die Kraft, die der Masse 1 kg die Beschleunigung 1 m/s^2 erteilt:

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m/s}^2.$$

Aus den drei Grundeinheiten lassen sich weitere *kohärente* Einheiten ableiten. Man versteht darunter Einheiten, die so aufeinander abgestimmt sind, daß in den sie verbindenden Gleichungen keine Umrechnungsfaktoren auftreten, die von der Zahl 1 abweichen. Derartige Gleichungen sind allgemeine Größengleichungen. Diese zeich-

¹ Gemäß Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 2. Juli 1969 (Bundesgesetzblatt I, S. 709) mit der Ausführungsverordnung vom 26. Juni 1970.

nen sich also dadurch aus, daß sie außer den Formelzeichen für die Größen keine Umrechnungszahlen zwischen verschiedenen Einheiten (z.B. km und m, t und kg, h und s) enthalten, sondern lediglich solche Zahlenwerte, die durch mathematische Operationen (z.B. Differenzieren oder Integrieren) oder auch durch Versuch in Gestalt von dimensionslosen Kennzahlen entstehen.

In der folgenden Tabelle sind kohärente Einheiten des MKS-Systems, die aus Grundeinheiten gebildet sind, zusammengestellt.

Größe	Formelzeichen	Einheit Einheitenzeichen	Name
Fläche	A, S	m^2	
Querschnitt, Querschnitts- fläche	S, q	m^2	
Volumen	V	m^3	
Volumenstrom	$Q, \dot{V}$	m^3/s	
Frequenz	f	Hz ($1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$)	Hertz
Geschwindigkeit	c, w, u, v	m/s	
Beschleunigung	a	m/s^2	
Fallbeschleunigung	g	m/s^2	
Winkelgeschwindigkeit	ω	rad/s	
Winkelbeschleunigung	α	rad/s^2	
Dichte = $\frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$	ρ	kg/m^3	
Impuls	p	kgm/s	
Kraft	F	N ($1 \text{ N} = 1 \text{ kgm}/\text{s}^2$)	Newton
Gewichtskraft	G		
Drehmoment	M		
Druck (Spannung)	$p(\sigma)$	Pa ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$)	Pascal
Dynamische Viskosität	η	Ns/m^2 ($1 \text{ Ns}/\text{m}^2 = 1 \text{ Pas}$)	Pascalsekunde
Kinematische Viskosität	ν	m^2/s	
Arbeit, Energie	A, E, W	Nm ($1 \text{ Nm} = 1 \text{ kgm}^2/\text{s}^2$)	Newtonmeter
Wärmemenge		J ($1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$)	Joule
		Ws ($1 \text{ Ws} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$)	Wattsekunde
Spezifische Arbeit	Y	$\text{Nm}/\text{kg} = \text{J}/\text{kg} = \text{m}^2/\text{s}^2$	
Leistung	P	W ($1 \text{ W} = 1 \text{ Nm}/\text{s} = 1 \text{ J}/\text{s}$)	Watt

Ergeben sich bei Verwendung kohärenter Einheiten sehr große oder sehr kleine Zahlenwerte, so können durch Vorsätze vor den Einheiten kleinere oder größere Einheiten gebildet werden. Die Vorsätze sind dezimale Teile oder Vielfache der kohärenten Einheiten. Da die verkleinerten oder vergrößerten Einheiten nicht aus Grundeinheiten mit dem Zahlenfaktor 1 bestehen, sind sie nicht kohärent und gehören nicht zum Internationalen System.

Die Benennung der Vorsätze und ihre Kurzzeichen sind im Gesetz über Einheiten im Meßwesen sowie in DIN 1301 festgelegt und aus der folgenden Tabelle ersichtlich.

Teile der kohärenten Einheit	das 10^{-12} fache	10^{-9} fache	10^{-6} fache	10^{-3} fache	10^{-2} fache	10^{-1} fache
Vorsatz Vorsatzzeichen	Piko- p	Nano- n	Mikro- μ	Milli- m	Zenti- c	Dezi- d

Vielfache der kohärenten Einheit	das 10^1 fache	10^2 fache	10^3 fache	10^6 fache	10^9 fache	10^{12} fache
Vorsatz Vorsatzzeichen	Deka- da	Hekto- h	Kilo- k	Mega- M	Giga- G	Tera- T

Hiernach sind beispielsweise

$$\begin{aligned}
 2\,630 \text{ Newton (N)} &= 2,63 \cdot 10^3 \text{ N} = 2,63 \text{ Kilonewton} = 2,63 \text{ kN}, \\
 1\,270\,000 \text{ Watt (W)} &= 1,27 \cdot 10^6 \text{ W} = 1,27 \text{ Megawatt} = 1,27 \text{ MW}, \\
 0,0000062 \text{ Meter (m)} &= 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 6,2 \text{ Mikrometer} = 6,2 \mu\text{m}.
 \end{aligned}$$

Zur Erleichterung der Einarbeitung in das MKS-System wird empfohlen, möglichst mit allgemeinen Größengleichungen zu arbeiten und dabei Grundeinheiten und daraus abgeleitete kohärente Einheiten zu verwenden. Es sei aber bemerkt, daß allgemeine Größengleichungen unabhängig von der Wahl der Einheiten gültig sind, also im Gegensatz zu Zahlenwertgleichungen einen Wechsel der Einheiten zulassen. Dabei ist allerdings zu beachten, daß sich das Produkt aus Zahlenwert und Einheit nicht ändert. Wählt man also eine zehnmal so große Einheit, so verkleinert sich der Zahlenwert auf den zehnten Teil.

Zahlenwertgleichungen sind Gleichungen, in denen die Formelzeichen Zahlenwerte bedeuten, welchen bestimmte Einheiten zugeordnet sind. Gleichungen dieser Art erfordern stets eine Einheitenerläuterung.

Beispiele allgemeiner Größengleichungen:

1. Gleichung für die Nutzleistung P_n einer Pumpe mit dem Volumenstrom Q , der Förderhöhe H und der Dichte ρ der Flüssigkeit.

Mit der spezifischen Arbeit $Y = gH$ (g = Fallbeschleunigung) ist

$$P_n = Q \rho g H = Q \rho Y.$$

Unter Verwendung kohärenter, aus den Grundeinheiten abgeleiteter Einheiten erhalten wir die Nutzleistung in der Einheit

$$\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{m} = \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \text{Watt}.$$

2. Gleichung für den theoretischen Volumenstrom einer einfach wirkenden Tauchkolbenpumpe mit dem Kolbenquerschnitt A , dem Hub s und der auf die Zeiteinheit bezogenen Drehzahl n .

Es ist

$$Q = A s n.$$

Wählen wir als Längeneinheit das Meter und beziehen n auf die Sekunde, so erscheint Q in der Einheit

$$\text{m}^2 \text{ m} \frac{1}{\text{s}} = \text{m}^3/\text{s}.$$

Da die allgemeine Größengleichung keine bestimmten Einheiten vorschreibt, kann als Längeneinheit auch das Dezimeter und als Zeiteinheit die Minute benutzt werden. Dann ergibt sich als Einheit des Volumenstroms

$$\text{dm}^3/\text{min} = l/\text{min}.$$

Beispiel einer Zahlenwertgleichung:

Für die Ermittlung des Drehmomentes M eines Motors aus der Leistung P und der Drehzahl n wird vielfach die dem Technischen Einheitensystem entstammende Gleichung

$$M = 716,2 \frac{P}{n}$$

verwendet.

Hier bedeuten die Formelzeichen Zahlenwerte, denen die nichtkohärenten Einheiten kpm für das Drehmoment, PS für die Leistung und 1/min für die Drehzahl zugeordnet sind. Die erforderlichen Umrechnungszahlen sind in der Vorzahl 716,2 zusammengefaßt.

Bei einer Zahlenwertgleichung dieser Art sind also stets Angaben darüber notwendig, für welche Einheiten die Zahlenwerte einzusetzen sind und für welche Einheit der errechnete Zahlenwert gültig ist.

Die entsprechende allgemeine Größengleichung lautet

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n},$$

wobei sich im MKS-System für das Drehmoment die Einheit

$$\frac{\text{W}}{1/\text{s}} = \text{Ws} = \text{Nm}$$

ergibt.

Häufig liegen die Größen in nichtkohärenten Einheiten vor. In diesem Falle empfiehlt es sich, unter Beibehaltung allgemeiner Größengleichungen die Einheiten vor Beginn der Zahlenrechnung in kohärente Einheiten umzurechnen, z. B.: $1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ mbar} = 10^2 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ kW} = 10^3 \text{ W}$.

Eine Umrechnung ist immer erforderlich, wenn die Einheiten dem Technischen Einheitensystem entstammen. Sie läßt sich leicht durchführen, wenn man beachtet, daß die technische Kräfteinheit $1 \text{ kp} = g_n \text{ N}$ ist. $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$ bezeichnet die Normfallbeschleunigung. Mit dem aufgerundeten Zahlenwert 9,81 erhält man

$$1 \text{ kp} = 9,81 \text{ N} = 9,81 \text{ kg m/s}^2.$$

An Hand dieser Beziehung sind in der nachstehenden Tabelle Einheiten des Technischen Einheitensystems in kohärente Einheiten des MKS-Systems umgerechnet.

In den Gleichungen dieses Buches finden sich Einheitenangaben vielfach auch dann, wenn es sich um Größengleichungen handelt, wenn also Angaben über die Ein-

heiten nicht erforderlich sind. Die Beifügung der Einheiten soll dazu dienen, den an das Technische Einheitensystem Gewöhnten mit den neuen Einheiten vertraut zu machen und ihm die Umstellung auf das MKS-System zu erleichtern.

Größe	Formel- zeichen	Zahlenwert 1 und Einheit im Technischen Einheitensystem	Zahlenwert und kohärente Einheit im MKS-System
Masse	m, M	1 kp s ² /m	9,81 kg
Massestrom	$\dot{M}$	$\frac{1 \text{ kps}^2}{\text{m}} \text{ h} \left(= \frac{1}{3600} \text{ kps/m} \right)$	$\frac{1}{3600} \text{ 9,81 kg/s}$
Volumenstrom	$Q, \dot{V}$	$1 \text{ m}^3/\text{h} \left(= \frac{1}{3600} \text{ m}^3/\text{s} \right)$	$\frac{1}{3600} \text{ m}^3/\text{s}$
Kraft	F	} 1 kp	9,81 N
Gewichtskraft	G		
Wichte = $\frac{\text{Gewichtskraft}}{\text{Volumen}}$	$\gamma, \varrho \cdot g$	1 kp/m ³	9,81 N/m ³
Dichte = $\frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$	ϱ	1 kp s ² /m ⁴	9,81 kg/m ³
Energie, Arbeit, Wärme	E, A, W	1 kp m	9,81 Nm = 9,81 J = 9,81 Ws
Leistung	P	1 kp m/s	9,81 Nm/s = 9,81 J/s = 9,81 W
		1 PS (= 75 kp m/s)	75 · 9,81 Nm/s = 736 W
		1 kW (= 101,94 kp m/s)	101,94 · 9,81 Nm/s = 1000 W
Impuls	p	1 kp s	9,81 Ns = 9,81 kg m/s
Massenträgheitsmoment	J	1 kp s ² m	9,81 kg m ²
Drehzahl ¹	n	1 1/min	$\frac{1}{60} \text{ 1/s}$
Drehmoment	M	1 kp m	9,81 Nm
Druck, Spannung	$p(\sigma)$	1 kp/m ² = 1 mm WS	9,81 · N/m ² = 9,81 Pa
		1 kp/cm ² = 1 at	9,81 · 10 ⁴ N/m ² (= 0,981 bar)
		1 Torr = $\frac{1}{760}$ atm	1,3332 · 10 ² N/m ²
Dynamische Viskosität	η	1 kp s/m ²	$9,81 \frac{\text{kg}}{\text{m s}} = 9,81 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} = 9,81 \text{ Pas}$
Kinematische Viskosität	ν	1 m ² /s	1 m ² /s

¹ Im Gesetz über Einheiten im Meßwesen und in der Ausführungsverordnung findet sich das Wort „Drehzahl“ nicht. Es wird hier weiter verwendet mit den Einheitenzeichen 1/min und 1/s.