



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Metallberufe

Ewald Bach
Ulrich Maier

Dr. Bernd Mattheus
Falko Wieneke

Kraft- und Arbeitsmaschinen

17., überarbeitete Auflage 2022
mit Vertiefungs- und Wiederholungsaufgaben
und Lösungshinweisen

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 10412

Autoren:

Ewald Bach	Oberstudienrat	Uhingen/Fils
Ulrich Maier	Dr. rer.nat., Oberstudienrat	Heilbronn/Neckar
Bernd Mattheus	Dr.-Ing.	Essen
Falko Wieneke	Dipl.-Ing., Studiendirektor	Essen

Lektorat:

Falko Wieneke

Lektorat bis zur 15. Auflage:

Horst Herr †	Dipl.-Ing.	Kelkheim/Taunus
--------------	------------	-----------------

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, 73760 Ostfildern,
Petra Gladis-Toribio

Diesem Buch wurden die neuesten Ausgaben der DIN-Normen und der sonstigen einschlägigen Regelwerke zugrunde gelegt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass nur die Regelwerke selbst verbindlich sind. Autoren, Lektorat und Verlag übernehmen keinerlei Haftung.

17. Auflage 2022

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-7585-1263-6

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2022 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Satz+Layout Werkstatt Kluth GmbH, 50374 Ertstadt
Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Umschlagfotos: © photosoup und Michael Rosskothén – fotolia.com
Druck: RCOM Print GmbH, 97222 Rimpfing

Vorwort

*Wer in der Zukunft lesen will,
muss in der Vergangenheit blättern.*
André Malraux

Bei dem in der **17. Auflage** vorliegendem Buch handelt es sich um eines der ältesten Verlagswerke des Verlages Europa-Lehrmittel. Bis zur 12. Auflage wurde das Buch „Kraft- und Arbeitsmaschinen von den Autoren Prof. Dr.-Ing. Walter Kittl und Prof. Dipl.-Ing. Wolfgang Schöner aktualisiert und verbessert. Die 13. Auflage wurde im Jahr 2003 von Horst Herr, Ewald Bach, Ulrich Maier und Falko Wieneke vollständig überarbeitet und mit neuen Inhalten gefüllt. Ab der 16. Auflage hat Dr. Bernd Mattheus die Kapitel des verstorbenen Kollegen Horst Herr zum größten Teil übernommen. Die Leitung des Lektorats wurde an Falko Wieneke übergeben.

Das Buch Kraft- und Arbeitsmaschinen versteht sich nicht nur als ein Werk, das Fachwissen vermittelt. Es verdeutlicht einen „Spaziergang“ durch den Maschinenbau. Beim Aufführen der Kraft- und Arbeitsmaschinen werden an entsprechenden Stellen neben der Erläuterung der technischen Zusammenhänge auch die Namen und der zeitliche Lebensraum der Wissenschaftler und Techniker benannt. Das Motto von André Malraux wurde gewählt, weil das Buch sowohl die grundlegenden „alten“ Technologien der Kraft- und Arbeitsmaschinen, als auch neue zukunftsorientierte Entwicklungen aufnimmt.

Das Buch Kraft- und Arbeitsmaschinen wendet sich an **Auszubildende der Metalltechnik**, Studierende der **Fachschule für Technik**, Lernende in der Meisterausbildung sowie Schülerinnen und Schüler der **Berufsfachschule für Technik** und des **Technischen Gymnasiums**. Für Studierende der **Hochschulen** und **Universitäten**, die sich in einem Studium der Maschinenbautechnik befinden, ist dieses Buch eine wertvolle Hilfe. Aber auch **Gesellen, Meister, Techniker und Ingenieure** können dieses Buch zur Weiterbildung ihres Fachwissens einsetzen.

Die vorliegende **17. Auflage** wurde im Vergleich zur 16. Auflage umfassend überarbeitet und aktualisiert. Inhaltlich wurde eine Gliederung der Hauptkapitel mit den Buchstaben A (Naturwissenschaftliche Grundlage), B (Energie), C (Kraftmaschinen) und D (Arbeitsmaschinen) vorgenommen. Das Hauptkapitel A fasst die Grundlagen zusammen, die als unbedingte naturwissenschaftliche Voraussetzungen der Maschinenbautechnik notwendig sind. Im Hauptkapitel B wird die Grundlage behandelt, ohne die keine Kraft- oder Arbeitsmaschine funktionsfähig wäre, die Energie. Es werden insbesondere erneuerbare Energien aufgeführt, die – getreu dem obigen Motto – unsere Zukunft bestimmen. Neben der Solartechnik, der Technik mit Windenergieanlagen und der Wärmepumpentechnologie wird in diesem Buch auch die Technologie mit Brennstoffzellen verdeutlicht.

In den Hauptkapiteln C (Kraftmaschinen) und D (Arbeitsmaschinen) werden umfassend Maschinen und Anlagen vorgestellt und die jeweiligen Funktionsweisen erläutert. Es ist kaum zu erwarten, dass ein Buch dieser Größenordnung das gesamte Gebiet der Kraft- und Arbeitsmaschinen aufnimmt. Sie dürfen aber erwarten, dass die wichtigsten Teilbereiche Beachtung finden. Zu Beginn der Hauptkapitel wird eine Einführung in die Maschinenkunde gegeben. Mit der Gruppierung und der Begriffsbestimmung von Kraft- und Arbeitsmaschinen werden Sie mit dem Thema des Buches vertraut gemacht.

Das vorliegende Buch bietet dem Lernenden die Möglichkeit, anhand der Wiederholungs- und Vertiefungsaufgaben das eigene Verständnis und Wissen zu überprüfen. Die Lösungshinweise hinter den Hauptkapiteln des Buches befähigen den Lernenden zur Selbstkontrolle seiner Ergebnisse. Somit kann dieses Buch auch im **Selbststudium** seinen Einsatz finden.

Wir wünschen unseren Leserinnen und Lesern viel Freude bei der Erkundung der Kraft- und Arbeitsmaschinen. Hinweise zur Verbesserung und Weiterentwicklung des Buches nehmen wir gerne unter der Verlagsadresse oder per E-Mail (lektorat@europa-lehrmittel.de) entgegen.

Hinweise zum Arbeiten mit diesem Buch

Das Buch Kraft- und Arbeitsmaschinen kann sowohl unterrichtsbegleitend, als auch zum Selbststudium eingesetzt werden.

Die Lernenden finden bei jedem Kapitel Informationen zu den jeweiligen Lerngegenständen. Wichtige Informationen sind in den **blau unterlegten Merksätzen** zusammengefasst.

Am Ende eines oder mehrerer Kapitel werden **Wiederholungs- und Vertiefungsaufgaben** vorgegeben. Die Lernenden können somit die Inhalte aus den Kapiteln wiedergeben und weiterführen.

Im letzten Abschnitt des Buches befinden sich die **Lösungshinweise** zu den jeweiligen Wiederholungs- und Vertiefungsaufgaben. Lernende können somit die Ergebnisse ihrer Aufgaben eigenständig kontrollieren.

Das Buch ist in Hauptkapitel

A (Naturwissenschaftliche Grundlagen)
B (Energie)
C (Kraftmaschinen)
D (Arbeitsmaschinen)

unterteilt. Die Bezeichnungen von den Unterkapiteln bestehen aus einem Buchstaben und einer Zahl, die sich jeweils vor den Überschriften befinden, z. B.

D1 Pumpen

Die Kennzeichnung ermöglicht die Verkettung der Sachverhalte durch Hinweispfeile, z. B.

(→ **C 3.1**) Weitere Informationen im Hauptkapitel C, Unterkapitel 3.1

Bitte nutzen Sie diese Möglichkeit, denn durch den Sprung zu den vorhergehenden Sachverhalten wiederholen Sie das Gelernte ständig und es ergibt sich ein sehr viel größerer Lerneffekt.

Das umfangreiche und übersichtliche **Inhaltsverzeichnis** des Buches bietet eine erste Orientierungshilfe an. Noch mehr hängt aber der Wert eines Fachbuches vom Sachwortverzeichnis ab. Dieses enthält etwa 1800 Begriffe.

Orientieren Sie sich in diesem Buch vor allem mithilfe des Sachwortverzeichnisses.

Zum besseren Verständnis werden die Lerninhalte mit **Bildern** unterstützt. In den zahlreichen Bildern werden größtenteils die Sachverhalte vereinfacht skizziert und auf das Wesentliche reduziert. Bei den meisten bildlichen Darstellungen wurde bewusst auf Fotos von Maschinen oder Anlagen verzichtet und dafür Skizzen von den jeweiligen Maschinen oder Anlagen im Ganzen oder in Teilbereichen mit entsprechenden Legenden angefertigt. Erfahrungsgemäß haben reine Fotos von Maschinen oder Anlagen nur eine geringe Aussagekraft.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg beim Arbeiten mit diesem Buch.

A	Naturwissenschaftliche Grundlagen	15
A1	Mechanik der festen Körper	16
1.1	Physikalische Größen und ihre Einheiten	16
1.2	Gleichförmige geradlinige Bewegung	16
1.3	Ungleichförmige geradlinige Bewegung	16
1.4	Skalare und Vektoren	17
1.5	Grundsatz der Unabhängigkeit	17
1.6	Dynamisches Grundgesetz, Krafteinheit, Gewichtskraft	17
1.7	Das Kraftmoment	17
1.8	Standfestigkeit und Kippsicherheit	18
1.9	Bewegungsgröße (Impuls), Impulserhaltung, Impulsänderung	19
1.10	Reibung	19
1.11	Arbeit und Energie	20
1.12	Mechanische Leistung	21
1.13	Mechanischer Wirkungsgrad	21
1.14	Drehleistung	21
1.15	Gleichmäßig beschleunigte oder verzögerte Drehbewegung	22
1.16	Kinetische Energie rotierender Körper	22
A2	Hydrostatische Grundgesetze	23
2.1	Hydrostatischer Druck	23
2.2	Druckkraft auf Flächen	24
A3	Strömungsgesetze	26
3.1	Definition des inkompressiblen Fluids	26
3.2	Die stationäre Strömung ohne Reibungsverluste	26
3.3	Stromlinie und Stromröhre	27
3.4	Die Kontinuitätsgleichung für inkompressible Medien	27
3.5	Kontinuitätsgleichung des kompressiblen Massenstroms	28
3.6	Die Energiegleichung nach Bernoulli	30
A4	Fluidreibung	33
4.1	Innere Reibung	33
4.2	Zähigkeit der Fluide	34
4.3	Die Strömungsformen	36
4.4	Der Strömungswiderstand	38
4.5	Druckverluste in Rohrleitungen	39
4.5.1	Berechnung des Druckverlustes in Rohrleitungen	40
4.6	Druckverluste in Rohrleitungssystemen mit Einbauten	42
A5	Grundgesetze der Thermodynamik	45
5.1	Temperatureinheiten und Temperaturskalen	45
5.2	Ausdehnung fester und flüssiger Stoffe durch Temperaturänderung	46
5.3	Volumenänderung von Gasen und Dämpfen durch Temperaturänderung	47
5.4	Allgemeine Zustandsgleichung der Gase	48
5.5	Molare (stoffmengenbezogene) Zustände und Größen	48
5.6	Wärmekapazität fester und flüssiger Stoffe	49
5.7	Brennwert und Heizwert	50
5.8	Schmelzen und Erstarren	50
5.9	Verdampfen und Kondensieren	51
A6	Der erste Hauptsatz der Thermodynamik	52
6.1	Volumenänderungsarbeit	53
6.2	Innere Energie und Enthalpie	55
6.3	Die spezifische Wärmekapazität von Gasen	56

A7	Thermodynamische Zustandsänderungen	58
7.1	Die Isobare	58
7.2	Die Isochore	60
7.3	Die Isotherme	60
7.4	Die Isentrope bzw. Adiabate	62
7.5	Die Polytrope	62
A8	Kreisprozesse im p, V-Diagramm	64
8.1	Nutzarbeit	65
8.2	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	65
8.3	Der thermische Wirkungsgrad	66
8.4	Vergleichsprozesse der Wärmekraftmaschinen	67
8.4.1	Der Diesel-Prozess (Gleichdruckprozess)	67
8.4.2	Der Otto-Prozess	69
8.4.3	Der Seiliger-Prozess	69
8.4.4	Der Joule-Prozess	69
8.4.5	Der Ackeret-Keller-Prozess	69
8.4.6	Der Stirling-Prozess	70
8.4.7	Der Carnot-Prozess	70
8.4.8	Der Dampfkraftprozess	70
A9	Kreisprozesse im T, s-Diagramm	71
A10	Kreisprozesse im h, s-Diagramm	72
A11	Mollier-Diagramme	73
A12	Elektrizitätslehre	74
12.1	Gesetzmäßigkeiten im elektrischen Stromkreis	74
12.2	Gesetzmäßigkeiten bei Widerstandsschaltungen	74
12.2.1	Parallelschaltung von Widerständen	74
12.2.2	Reihenschaltung von Widerständen	75
12.3	Klemmenspannung und Innenwiderstand von Spannungserzeugern	76
12.4	Elektromagnetische Größen	76
12.5	Der sinusförmige Wechselstrom	77
12.6	Elektrische Motoren und Transformatoren	77
12.7	Stern- und Dreieckschaltung	79
A13	Kernphysik	80
13.1	Radioaktivität	80
13.2	Dosimetrie	81
13.3	Kernenergie	82
B	Energie	83
B1	Primärenergie und Sekundärenergie	83
B2	Energieträger	83
2.1	Die Steinkohleneinheit	83
2.2	Erzeugung und Verbrauch von Primärenergie	84
2.3	Energievorräte	85
2.4	Nicht erneuerbare Energieträger	85
2.5	Erneuerbare Energieträger	86
2.5.1	Begründung des Einsatzes erneuerbarer Energien	86
2.5.2	Nachwachsende Energiequellen	87

2.5.3	Wärmepumpentechnologie	89
2.5.4	Solartechnik, Sonnenkollektoren, Fotovoltaik	91
2.5.4.1	Solarzelle	92
2.5.4.2	Solarmodule	94
2.5.4.3	Fotovoltaikanlagen	95
2.5.5	Windenergieanlagen (WEA)	98
2.5.6	Brennstoffzelle	103
2.5.6.1	Funktionsprinzip der Brennstoffzellen	103
2.5.6.2	Brennstoffzellentypen	104
2.5.6.3	Brennstoffzellensysteme	105
2.5.6.4	Brennstoffaufbereitung	105
2.5.6.5	Wirkungsgrad von Brennstoffzellen	106
2.5.6.6	Anwendungen von Brennstoffzellensystemen	106
2.5.7	Wasserkraft	108
2.6	Energieeinsparung	108
2.7	Umweltproblematik	109
2.7.1	Luftverunreiniger	110
2.7.2	CO ₂ -Bilanz der nachwachsenden Biomasse	110

C Kraftmaschinen 111

C1 Arten der Kraftmaschinen 111

C2 Dampferzeugungsanlagen 111

2.1	Physik der Dampferzeugung	112
2.2	Wärme durch Verbrennung	113
2.3	Feuerungsstätten	115
2.3.1	Planrostfeuerung	115
2.3.2	Treppenrostfeuerung	115
2.3.3	Wanderrostfeuerung	115
2.3.4	Kohlenstaubfeuerung	116
2.3.5	Schmelzkammerfeuerung	116
2.3.6	Ölfeuerung	117
2.3.7	Gasfeuerung	117
2.4	Dampferzeuger	118
2.4.1	Möglichkeiten der Wärmeübertragung	118
2.4.2	Einteilung der Dampferzeuger	119
2.4.3	Wasserraumkessel	119
2.4.4	Wasserrohrkessel	120
2.5	Hilfsanlagen für die Dampferzeugung	123
2.5.1	Kesselspeisepumpe	123
2.5.2	Speisewasservorwärmer	123
2.5.3	Luftvorwärmer	123
2.5.4	Rußbläser	124
2.5.5	Überhitzer	124
2.5.6	Staubfilteranlagen	124
2.5.7	Wasseraufbereitung	125

C3 Dampfkraftmaschinen 126

3.1	Kolbendampfmaschine	126
3.2	Dampfmotor	127
3.2.1	Dampfmotor mit Kolbenschiebersteuerung	128
3.2.2	Dampfmotor mit Ventilsteuerung	129
3.3	Dampfturbinen	131
3.3.1	Grundsätzlicher Aufbau von Dampfturbinen	131
3.3.2	Physik im Turbinenbetrieb	131

3.3.3	Turbinenbauarten nach DIN 4304	136
3.3.4	Häufig ausgeführte Arbeitsverfahren	138
3.3.5	Radialdampfturbine	142
3.3.6	Werkstoffe im Dampfturbinenbau	143
3.3.7	Sicherheits- und Regeleinrichtungen im Turbinenbau	143
C4	Dampfkraftanlagen	145
4.1	Konventionelle Dampfkraftwerke	145
4.2	Nukleare Dampfkraftwerke	146
4.2.1	Kernenergie und kontrollierte Kernspaltung	147
4.2.2	Kernreaktoren	149
4.2.3	Reaktorsicherheit	151
4.2.4	Entsorgung	151
4.3	Gas- und Dampfturbinenanlagen	152
4.4	Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	153
C5	Wasserkraftmaschinen	155
5.1	Wasserräder	155
5.2	Wasserturbinen	157
5.2.1	Geschwindigkeitsdreiecke	157
5.2.2	Euler'sche Turbinengleichung und Turbinenarten	158
5.2.3	Die Peltonturbine (Freistrahltriebwerk)	159
5.2.4	Die Francisturbine (Spiralturbine)	160
5.2.5	Die Kaplan-turbine (Propellerturbine)	161
5.2.6	Pumpenturbinen	164
C6	Wasserkraftwerke	164
6.1	Laufwasserkraftwerke	165
6.2	Speicherkraftwerke	165
6.3	Gezeitenkraftwerke	166
6.4	Kraftwerksverbund	167
C7	Verbrennungskraftmaschinen	168
7.1	Übersicht und grundsätzliche Unterschiede	168
7.2	Gasturbinen und Strahltriebwerke	169
7.3	Verbrennungsmotoren	171
7.3.1	Hubkolbenmotoren nach DIN 1940, DIN ISO 3046	172
7.3.2	Viertakt-Ottomotor	173
7.3.3	Steuerung des Viertakt-Motors	177
7.3.4	Zweitakt-Ottomotor	179
7.3.5	Vergaseranlagen und Benzineinspritzanlagen des Ottomotors	181
7.3.6	Zündung beim Ottomotor	184
7.3.7	Viertakt-Dieselmotor	185
7.3.8	Gemischbildung beim Dieselmotor	186
7.3.9	Zweitakt-Dieselmotor	188
7.3.10	Kraftstoffdirekteinspritzung bei Dieselmotoren	188
7.3.11	Kreiskolbenmotor	191
7.3.12	Aufladung	192
7.3.13	Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren	194
C8	Elektrische Maschinen und Anlagen	197
8.1	Grundlagen der Spannungserzeugung	198
8.1.1	Entstehung einer Wechselspannung	198
8.1.2	Entstehung des Drehstromes	200
8.2	Elektromotoren	201
8.2.1	Gleichstrommotoren	203

8.2.1.1	Gleichstrommotoren in Sonderbauformen	205
8.2.2	Drehstrommotoren	207
8.2.2.1	Wechselstrommotoren besonderer Bauart	213
8.3	Transformatoren	214
8.4	Schutzmaßnahmen	215

D Arbeitsmaschinen 217

D1 Pumpen 217

1.1	Strömungsgesetze	217
1.2	Pumpeneinsatzbereiche und Leistungsgrenzen	218
1.3	Berechnung der Anlagen-Förderhöhe und der Pumpenleistung	219
1.4	Pumpen- und Anlagenkennlinien	220
1.5	Kreiselpumpen	220
1.5.1	Arbeitsprinzip von Kreiselpumpen	220
1.5.2	Die Saugwirkung	222
1.5.3	Kavitation und Selbstansaugung	222
1.5.4	Bauarten von Kreiselpumpen	223
1.6	Verdrängerpumpen	226
1.6.1	Kolbenpumpen	226
1.6.2	Membranpumpen	229
1.6.3	Umlaufverdrängerpumpen	229
1.7	Vergleich zwischen Kolben- und Kreiselpumpen	232
1.8	Weitere Pumpenarten	233

D2 Verdichter 235

2.1	Verdichterbezeichnungen	235
2.2	Hubkolbenverdichter	236
2.3	Thermodynamik der Verdichtung	238
2.4	Drehkolbenverdichter	241
2.5	Turboverdichter	242
2.6	Nutzung von Verdichtern in der Industrie	244

D3 Kälteanlagen und Wärmepumpen 245

3.1	Verfahren der Kälteerzeugung	245
3.1.1	Linkslaufende Kreisprozesse mit Dämpfen	246
3.2	Kältemittel	250
3.2.1	Erwünschte Eigenschaften von Kältemitteln	250
3.2.2	Thermodynamische Daten von Kältemitteln	251
3.2.3	Umweltdaten der Kältemittel	252

D4 Fördermittel und Fördereinrichtungen 253

4.1	Fördertechnik als Element der Logistik	253
4.2	Einteilung der Fördermittel und der Fördergüter	253
4.3	Unstetigförderer	254
4.3.1	Schienengebundene Flurfördermittel	255
4.3.2	Schienenfreie Flurfördermittel	255
4.3.3	Hebezeuge	257
4.3.4	Hängebahnen	258
4.3.5	Krane	258
4.4	Stetigförderer	266
4.4.1	Stetigförderer für Schüttgut	267
4.4.2	Stetigförderer für Schütt- und Stückgut	270
4.4.3	Stetigförderer für Stückgut	273
4.5	Beispiel einer Förderanlage mit Unstetigförderern	275
4.6	Beispiel einer Förderanlage mit Stetigförderern	275

4.7	Wichtige Bauelemente und Bauteilgruppen in der Fördertechnik	277
4.7.1	Seile	277
4.7.2	Seilbefestigungen und Seilverbindungen	278
4.7.3	Ketten	279
4.7.4	Rollen und Flaschenzüge	281
4.7.5	Seiltrommeln und Treibscheiben	281
4.7.6	Lastaufnahmemittel	282
4.7.7	Laufträder	283
4.7.8	Bremsen	283
4.8	Unfallverhütung in der Fördertechnik	284

D5	Werkzeugmaschinen	285
5.1	Einteilung der Werkzeugmaschinen nach den Fertigungsverfahren	286
5.2	Automatisierung von Werkzeugmaschinen	287
5.2.1	Technische Merkmale automatisierter Werkzeugmaschinen	287
5.2.2	Steuern und Regeln von CNC-Werkzeugmaschinen	290
5.2.3	Automatisierung und Flexibilität	293
5.3	Urformende Maschinen und Anlagen	295
5.3.1	Fertigungsmaschinen zur Gießformherstellung	295
5.3.2	Druckgießmaschinen	296
5.3.3	Stranggießanlage	297
5.3.4	Fertigungsanlagen zum Sintern	298
5.4	Umformende Werkzeugmaschinen	299
5.4.1	Pressen	300
5.4.2	Walzmaschinen	301
5.4.3	Biegemaschinen	301
5.4.4	Ziehmaschinen	301
5.5	Trennende Werkzeugmaschinen	302
5.5.1	Bohrmaschinen	302
5.5.2	Drehmaschinen	303
5.5.3	Fräsmaschinen	305
5.5.4	Schleifmaschinen	307
5.5.5	Zerteilende Maschinen	308
5.5.6	Abtragende Maschinen	308
5.5.7	Einzweckmaschinen	309
5.6	Fügende Werkzeugmaschinen und Anlagen	309
5.6.1	Anlagen zum Schmelzschweißen	310
5.6.2	Werkzeugmaschinen zum Pressschweißen	310
5.7	Werkzeug- und Werkstücksysteme an trennenden Werkzeugmaschinen	311
	Lösungshinweise	313
	Sachwortverzeichnis	337
	Bildquellenverzeichnis	351

Einführung in die Maschinenkunde

Unter **Maschinen** versteht man mechanische Vorrichtungen aus festen und beweglichen Teilen, den **Maschinenelementen**. Die beweglichen Teile werden durch eingeleitete Kräfte in vom Konstrukteur vorgegebenen Bahnen und in mehr oder weniger regelmäßiger Wiederkehr bewegt. Diese Kräfte resultieren aus zugeführten **Energien**. Der physikalische Begriff Energie (→ **B**) zieht sich somit wie ein Leitfaden durch die gesamte **Maschinenkunde**. Schon jetzt soll festgehalten werden:

Energie ist **gespeicherte Arbeitsfähigkeit**. Sie ist umwandelbar.

Energie ist grundsätzlich an einen **Energieträger**, etwa Wasser, Wind, Dampf, Gas, Strahlung oder elektrischen Strom gebunden. Hierüber sowie über die verschiedenen **Energiearten** (→ **A1.11**, **A1.16**, **A3.6**, **A6.2**, **A12.1**) wird noch ausführlich informiert.

Dieses Buch hat vor allem die Aufgabe, sich mit dem heutigen **Stand der Maschinentechnik** auseinanderzusetzen. Darüber hinaus sollen aber auch bereits heute zu erkennende **Entwicklungsrichtungen** aufgezeigt werden. Wenn auch diese Intention eindeutig im Vordergrund steht, soll aber auch eine **historische Komponente** erkennbar werden. Wir wissen zwar nicht wann, wo und von wem die erste Maschine gebaut wurde, doch viele Persönlichkeiten aus Technik und Naturwissenschaften, ihr zeitlicher Lebensraum und die von ihnen vorangetriebenen Entwicklungen sind bekannt und sollen in diesem Buch genannt werden.

Gruppierung in Kraft- und Arbeitsmaschinen

Bereits aus der Vorzeit und der Antike sind zahlreiche Werkzeuge und Geräte, die den Menschen halfen, ihre meist mühsame Arbeit zu erleichtern bzw. überhaupt verrichten zu können, bekannt. Wegen der begrenzten körperlichen Kraft waren die Menschen in jedem Zeitalter bestrebt, solche **Hilfsmittel zur Arbeitserleichterung** zu bauen und einzusetzen. Schon sehr früh erkannte man, dass man dies am wirkungsvollsten im Einklang mit der Natur tun konnte, d.h. unter Beachtung der **Naturgesetze** (→ **A**), soweit diese bereits entdeckt und formuliert waren. Verfolgt man einmal die Entwicklung der Naturwissenschaften, dann ist zu erkennen, dass sich ein effektiver **Maschinenbau** erst etwa ab dem Jahr 1700 entwickeln konnte. Dies gilt natürlich auch für die meisten anderen Technikbereiche.

Die im obigen Sinn, d.h. zur Arbeitsverrichtung gebauten Maschinen bezeichnet man wegen dieser Zweckgebundenheit als **Arbeitsmaschinen** (→ **D**). Viele solcher Maschinen werden bei kleiner Arbeitsleistung und wenn der Einsatz zeitlich begrenzt ist, mit **Muskelkraft** angetrieben. Größere Arbeitsleistungen und ein zeitlich unbegrenzter Einsatz erfordern aber Maschinen, die die Arbeitsmaschinen antreiben. Solche Maschinen werden als Kraftmaschinen (→ **C**) bezeichnet. Eine Arbeitsmaschine setzt somit für ihren Betrieb in der Regel eine Kraftmaschine voraus. In der Reihenfolge der Nennung beider Maschinengruppen ist also die Bezeichnung **Kraft- und Arbeitsmaschinen** ganz logisch und in dieser Reihenfolge soll nun auf beide Begriffe und deren Zusammengehörigkeit näher eingegangen werden.

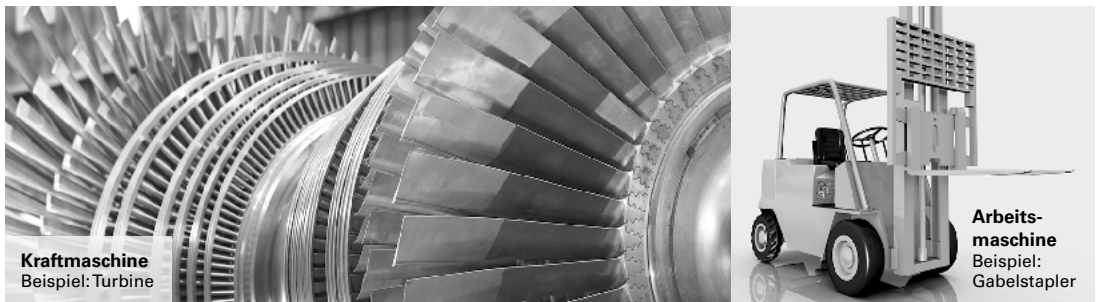


Bild 1: Beispiele für Kraft- und Arbeitsmaschinen

Begriff Arbeitsmaschine

Aus dem bisher Gesagten kann bereits abgeleitet werden, was man unter einer Arbeitsmaschine zu verstehen hat. Sie ist immer ein Hilfsmittel zur Arbeitserleichterung und sie wird in der Regel von einer Kraftmaschine angetrieben. Man kann also definieren:

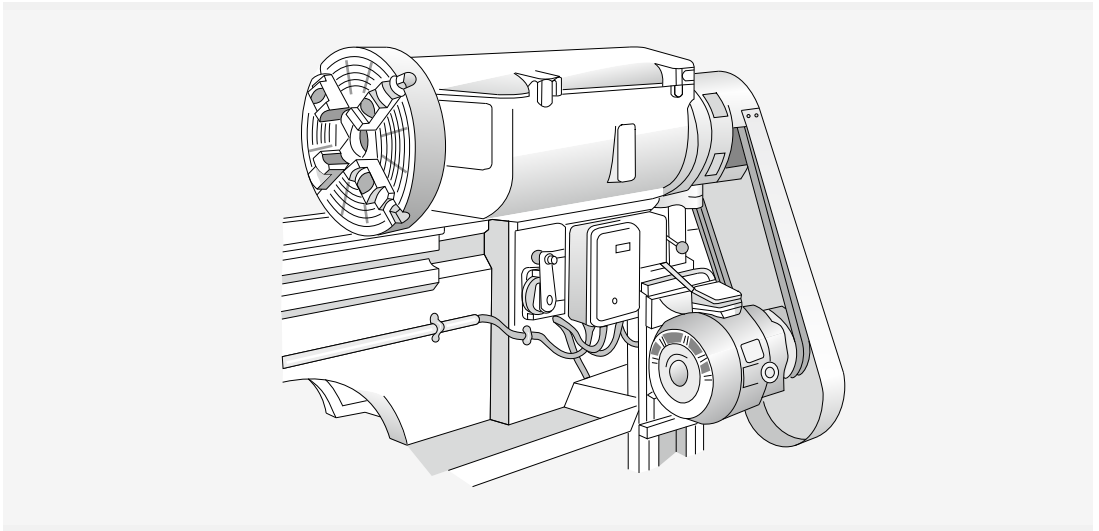


Bild 1: Koppelung von Kraftmaschine und Arbeitsmaschine

Unter einer Arbeitsmaschine versteht man eine Maschine, die zu technischen Zwecken (z.B. Gewinnung von Stoffen, Be- und Verarbeitung, Veredelung, Verpackung, Transport, Lagerung von Produkten) Arbeit verrichtet.

Beispiele für Arbeitsmaschinen

Verdichter, Pumpen, Ventilatoren, Kältemaschinen, Hebe- und Fördermittel, Werkzeugmaschinen, Fahrzeuge u.a.

Bild 1 zeigt an einem Beispiel die bereits angesprochene **konstruktive Verbindung** von Kraftmaschine (hier Elektromotor) und Arbeitsmaschine (hier Drehmaschine).

Die in diesem Beispiel zu erkennenden **energetischen Stufen** sind in **Bild 2** dargestellt:

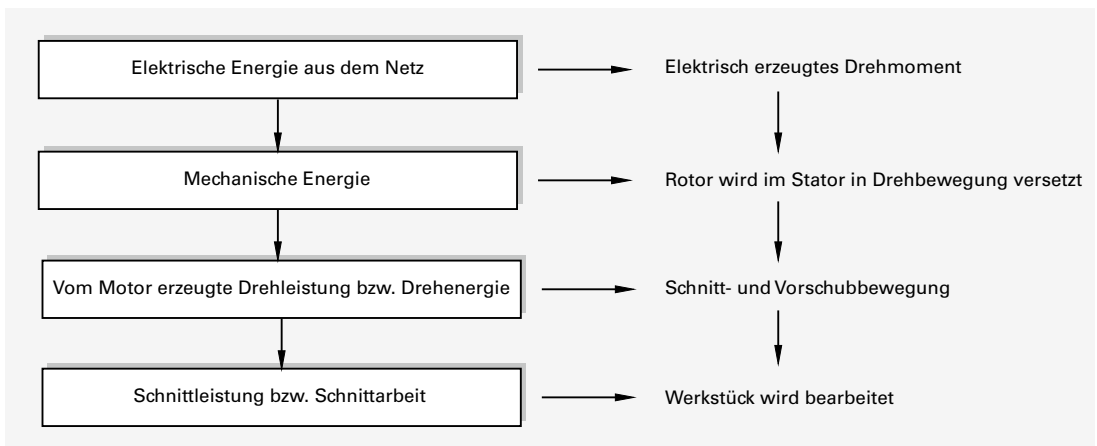


Bild 2: Energetische Stufen bei der Koppelung von Elektromotor und Drehmaschine

Maschinen, Aggregate und technische Anlagen

Maschinen sind in der Regel aus mehreren **Baugruppen** zusammengesetzt. Dies ist in **Bild 1** am Beispiel einer Drehmaschine (→ **D5.2.2**) in mehreren Details ersichtlich. **Bild 1** zeigt eine derartige Drehmaschine in der Gesamtansicht. Deutlich ist z.B. der Spindelkasten mit der hohlen Hauptspindel als Baugruppe zu erkennen. Auch der Bettschlitten stellt eine solche Baugruppe dar. Bei **Werkzeugmaschinen** (→ **D5**) dient ein kastenförmiges, gegen Durchbiegung, Verdrehung und Schwingungen widerstandsfähiges **Gestell** – das sogenannte **Bett** – zur Aufnahme der Baugruppen und aller beweglichen Teile. Eine solche zusammenfügende Funktion hat z.B. auch ein **Motorblock** bei einer **Verbrennungskraftmaschine**. Auch ein **Aggregat** fügt mehrere zusammenwirkende Einzelteile, Einzelmaschinen oder Einzelapparate – meist auf einer gemeinsamen Grundplatte – zusammen. In diesem Fall spricht man auch von einem **Maschinensatz**. So besteht z.B. ein Pumpenaggregat aus dem Antriebsmotor (dies ist die **Kraftmaschine**), der Wasserpumpe (dies ist die **Arbeitsmaschine**), dem Windkessel und der Regeleinrichtung.

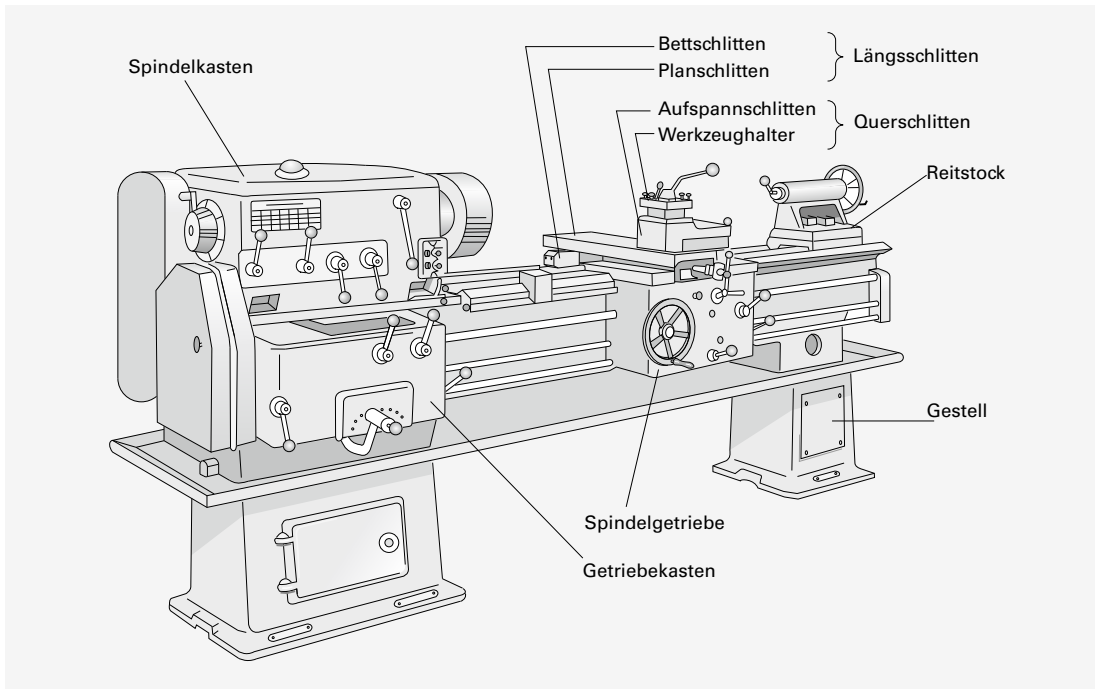


Bild 1: Drehmaschine, aus mehreren Baugruppen zusammengesetzt

Beim Bau von **Anlagen** werden viele Baugruppen und Aggregate durch Leitungen und sonstige Konstruktionsteile miteinander zu großen Einheiten verbunden, z.B. zu einer **Kälteanlage** oder zu einer **Produktionsanlage**, etwa in der Verfahrenstechnik. Verkettet man mehrere dieser Anlagen, so wird das Ergebnis daraus oft als **Fabrik** (z.B. eine Zuckerfabrik) oder als **Werk** (z.B. ein Kraftwerk) bezeichnet. **Bild 2** fasst nochmals zusammen:

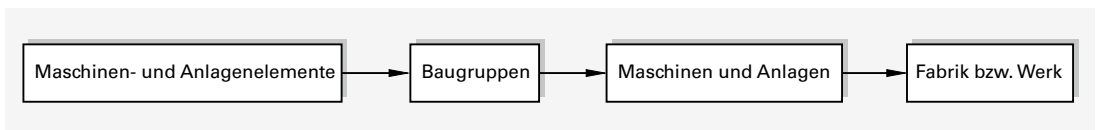


Bild 2: Das Fügen vom Teil zum Ganzen – vom Element zur Produktionsstätte

A Naturwissenschaftliche Grundlagen

Aus den bisherigen Betrachtungen ist herauslesbar, dass die Inhalte dieses Buches auf naturwissenschaftlicher Grundlage vermittelt werden sollen. Der folgende Text, d. h. die Vorbemerkung zum Kapitel A, soll die weitere Vorgehensweise kurz erläutern:

Vorbemerkung

Über die Bedeutung der Naturgesetze für die Entwicklung der Technik wurden Sie bereits informiert. Die aktuelle Technik bedarf immer einer wissenschaftlichen Grundlage. Neben den **Naturwissenschaften** spielen auch die **Wirtschaftswissenschaften** eine immer größere Rolle. Auf Letztere wird jedoch in diesem Buch nur am Rande eingegangen. In die einzelnen **Ingenieurwissenschaften**, z. B. dem **Maschinenbau**, fließen viele Wissenschaftsbereiche ein bzw. kommen dort in kombinierter Form zur Anwendung. Oftmals ist es sogar so, dass technische Problemlösungen nur durch die Zusammenarbeit von Ingenieuren und Wissenschaftlern aus anderen Fachbereichen, z. B. Physikern, Chemikern oder Biologen, erarbeitet werden können.

Um in den einzelnen Kapiteln des vorliegenden Buches über Kraft- und Arbeitsmaschinen nicht in „Erklärungsnot“ zu kommen, werden im **Kapitel A** die grundlegenden **naturwissenschaftlichen Gesetze in tabellarischer Form** zusammengefasst. Vor allem sind dies – dem Buchtitel entsprechend – **Gesetze der Physik**. Darüber hinaus werden grundlegende naturwissenschaftliche Gesetze und Regeln, die das Fachgebiet Kraft- und Arbeitsmaschinen unmittelbar betreffen, ausführlich erklärt und in sachlogischer Reihenfolge als **Merksätze** in die oben genannte tabellarische Zusammenfassung eingearbeitet. Diese **tabellarische Zusammenfassung und die darin eingeschobenen Merksätze** werden für erforderlich gehalten, da erfahrungsgemäß im Moment der Anwendung oftmals das früher einmal gelernte naturwissenschaftliche Gesetz bzw. die technische Regel nicht parat ist.

Den Kernthemen der Kraft- und Arbeitsmaschinen werden in kurzer tabellarischer Form die erforderlichen naturwissenschaftlichen Gesetze – insbesondere der Physik – vorangestellt. Grundlegende Themen, die das Fachgebiet Kraft- und Arbeitsmaschinen direkt betreffen, werden als Merksätze an der „richtigen Stelle“ in diese tabellarische Zusammenfassung eingearbeitet. Damit ist es in den weiteren Kapiteln, die dann spezielle Themen der Kraft- und Arbeitsmaschinen betreffen, möglich, bei Bedarf einen **Hinweis auf die entsprechende Dezimalklassifikation** zu geben. Dies geschieht durch **Pfeilverweise** (→ ...).

In der Regel beinhaltet die tabellarische Zusammenfassung die **Formel** und eine entsprechende **Legende**. Diese Legende enthält die **Formelzeichen**, die Namen der **physikalischen Größen** und deren **Einheiten**.

Sollten Sie ausführlichere oder durch weitere Erklärungen und Übungen geprägte Informationen über Grundlagen benötigen, dann beachten Sie bitte die im Anhang befindlichen **Literaturhinweise**.

Die einzelnen Teilgebiete der **Technischen Physik** stellen die Basis für das Verständnis des Maschinen- und Anlagenbaues dar.

A1 Mechanik der festen Körper

1.1 Physikalische Größen und ihre Einheiten

SI-Einheitensystem

Grundlage sind die **Basisgrößen** mit den zugehörigen **Basiseinheiten** (nebenstehende Tabelle).

Alle **abgeleiteten Größen** lassen sich auf die sieben Basisgrößen zurückführen.

Beispiel: $\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$

$$v = \frac{s}{t} \longrightarrow [v] = \frac{[s]}{[t]} = \frac{m}{s} \quad \text{z. B. } 5 \frac{m}{s}$$

Die **Definition der Basiseinheiten** erfolgt durch die **Einheitennormale**.

Tabelle 1: SI-Basissystem		
Basisgröße	Basiseinheit	Kurzzeichen
Länge	Meter	m
Masse	Kilogramm	kg
Zeit	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	Kelvin	K
Lichtstärke	Candela	cd
Stoffmenge	Mol	mol

1.2 Gleichförmige geradlinige Bewegung

Bei einer **gleichförmigen geradlinigen Bewegung** bewegt sich ein Körper mit **konstanter Geschwindigkeit** v auf geradliniger Bahn.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \text{Geschwindigkeit in } \frac{m}{s}, \frac{km}{h}, \dots$$

$$v = \frac{s}{t} \quad s = v \cdot t \quad t = \frac{s}{v} \quad 1 \frac{m}{s} = 3,6 \frac{km}{h}$$

Im **v, t -Diagramm** (\rightarrow Bild 2) stellt sich der Weg s als Rechteckfläche dar.

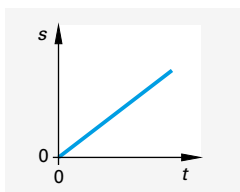


Bild 1: s, t -Diagramm

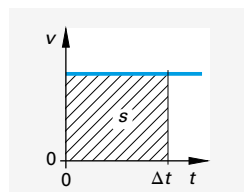


Bild 2: v, t -Diagramm

v	Geschwindigkeit	m/s
$\Delta s = s$	zurückgelegter Weg (Strecke)	m
$\Delta t = t$	Zeitspanne	s

1.3 Ungleichförmige geradlinige Bewegung

Merkmale einer ungleichförmigen Bewegung

Bei einer **ungleichförmigen Bewegung** ändert sich die Geschwindigkeit, der Körper wird beschleunigt oder verzögert.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{Beschleunigung}$$

$a > 0$: **Beschleunigung** \longrightarrow Geschwindigkeitszunahme
 $a < 0$: **Verzögerung** \longrightarrow Geschwindigkeitsabnahme

$a = \text{konstant}$ \longrightarrow gleichmäßig beschleunigte bzw. gleichmäßig verzögerte Bewegung

$a = \text{variabel}$ \longrightarrow ungleichmäßig beschleunigte bzw. ungleichmäßig verzögerte Bewegung

Freier Fall und senkrechter Wurf nach oben

Freier Fall	\longrightarrow gleichmäßige Beschleunigung
Senkrechter Wurf nach oben	\longrightarrow gleichmäßige Verzögerung

$s \triangleq h$ Fallhöhe bzw. Steighöhe
 $a \triangleq g$ Fallbeschleunigung

$g_n = \text{Normfallbeschleunigung} = 9,80665 \text{ m/s}^2$

7

Die **Fallgesetze** gelten streng genommen nur im **Vakuum**.

$g_{\max} \approx 9,83 \text{ m/s}^2$ an den Erdpolen
 $g_{\min} \approx 9,78 \text{ m/s}^2$ am Äquator

Durchschnittswert: $g \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$

8

1.4 Skalare und Vektoren

Skalar → ungerichtete physikalische Größe, z. B. Temperatur, Volumen, Zeit, Energie ...

Vektor → gerichtete physikalische Größe, z. B. Kraft, elektrischer Strom, Geschwindigkeit ...

Vektoren werden addiert, indem man sie unter Beachtung ihrer **Größe** und **Richtung** aneinander reiht. **Summenvektor** bzw. **Resultierende**: Strecke zwischen dem Anfangspunkt des ersten Vektors und dem Endpunkt des letzten Vektors.

Bei zwei Vektoren: Parallelogrammkonstruktion (→ Bild 1), z. B. **Kräfteparallelogramm** oder mit einer Dreieckskonstruktion (→ Bild 2), z. B. **Geschwindigkeitsdreieck** oder **Kräfte-dreieck**.

Bei mehr als zwei Vektoren: Vektorvieleck bzw. **Vektorpolygon** (→ Bild 3), z. B. **Kräftepolygon** bzw. **Krafteck**.

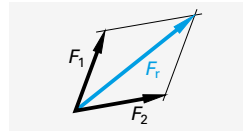


Bild 1: Kräfteparallelogramm

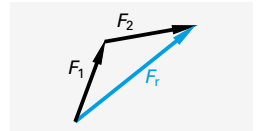


Bild 2: Kräfte-dreieck

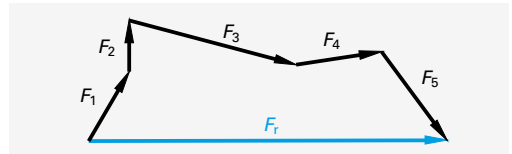


Bild 3 : Kräftepolygon

1.5 Grundsatz der Unabhängigkeit

Unabhängig davon, ob ein Körper mehrere **Einzelbewegungen** gleichzeitig oder zeitlich nacheinander ausführt, gelangt er immer an den gleichen Ort.

Die kürzeste Zeit zur Realisierung der **Ortsveränderung** eines Körpers ergibt sich, wenn alle Einzelbewegungen gleichzeitig ablaufen.

Erzwungene Bewegungsbahnen → z. B.: Schwenken einer Tür, Rollen der Eisenbahn auf Schienen, Mutter auf Schraube, Führungen ...

Freie Bewegungsbahnen → z. B.: Freier Fall, senkrechter Wurf, schiefer Wurf, waagerechter Wurf ...

1.6 Dynamisches Grundgesetz, Krafteinheit, Gewichtskraft

$F = m \cdot a$ 1 **Massenträgheitskraft**

$F_G = m \cdot g$ 2 **Gewichtskraft**

F	Kraft	N
m	Masse	kg
a	Beschleunigung	m/s ²
g	Fallbeschleunigung	m/s ²

Die Krafteinheit

$$[F] = [m] \cdot [a] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2}$$

$$1 \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} = 1 \text{ Newton} = 1 \text{ N}$$

Ein **Newton** ist gleich der Kraft, die einem Körper mit der Masse $m = 1 \text{ kg}$ die Beschleunigung $a = 1 \text{ m/s}^2$ erteilt.

1 daN	= 1 Dekanewton	= 10 N	je nach Größenordnung der Kraft
1 kN	= 1 Kilonewton	= 10 ³ N	
1 MN	= 1 Meganewton	= 10 ⁶ N	

1.7 Das Kraftmoment

Das Kraftmoment als physikalische Größe

DIN 1304: Das **Kraftmoment** M ist gleich dem Produkt aus der Kraft F und dem senkrechten Abstand ihrer Wirkungslinie r zu einem bestimmten Punkt, dem Drehpunkt (→ Bild 4).

$M_d = F_r \cdot r$ 4 **Kraftmoment bzw. Drehmoment**

Geht die Wirkungslinie WL von F_r nicht durch den Drehpunkt D eines Drehkörpers, dann erzeugt F_r ein Kraftmoment.

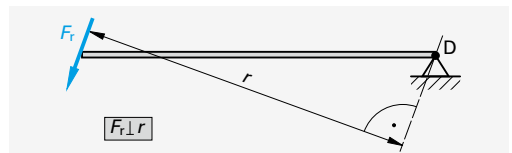


Bild 4: Kraftmoment

M_d	Kraftmoment (Drehmoment)	Nm
F_r	Resultierende (oder Einzelkraft)	N
r	Hebelarm senkrecht zur Kraft	m

Einheit des Drehmomentes: Newtonmeter (Nm)

Dreh Sinn und Vorzeichen von M_d (→ Bilder 1 und 2)

positives Drehmoment



Linksdrehsinn (entgegen dem Uhrzeigersinn)

Bild 1

negatives Drehmoment



Rechtsdrehsinn (im Uhrzeigersinn)

Bild 2

Resultierendes Drehmoment und Wirkung von Schrägkräften

Das **Gesamtdrehmoment** = **resultierendes Drehmoment** M_{dr} entspricht der Summe der Einzeldrehmomente (→ Bild 3).

Vorzeichenregel beachten! Somit:

$$M_{dr} = F_r \cdot r = F_1 \cdot r_1 + F_2 \cdot r_2 + \dots \quad \text{resultierendes Drehmoment}$$

Bei **Schrägkräften** (→ Bild 4) ist der im rechten Winkel zur Kraft F gerichtete Hebelarm in die Rechnung einzusetzen.

$$M_d = F \cdot r = F_y \cdot r_y \quad \text{Drehmoment bei Schrägkräften (→ Bild 4)}$$

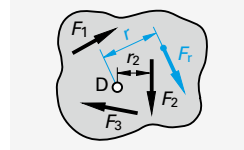


Bild 3

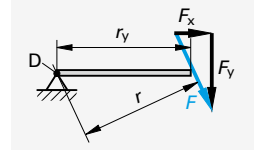


Bild 4

M_{dr}	resultierendes Drehmoment	Nm
F_r	resultierende Kraft	N
r	senkrechter Hebelarm von F_r	m
F_1, F_2	Einzelskräfte	N
F_y	senkrechte Komponente von F	N
r_y	senkrechter Hebelarm von F_y	m

Hebelarten und Hebelgesetz

Einseitiger Hebel

→ der stabförmige Hebel hat seinen Drehpunkt an einem Ende

Zweiseitiger Hebel

→ der stabförmige Hebel hat seinen Drehpunkt zwischen seinen beiden Enden

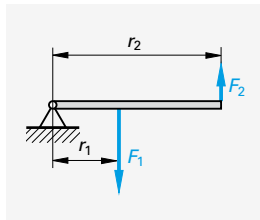


Bild 5: Einseitiger Hebel

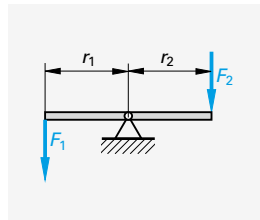


Bild 6: Zweiseitiger gleicharmiger Hebel

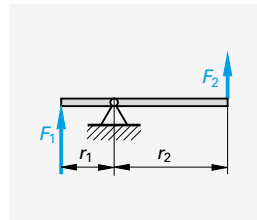


Bild 7: Zweiseitiger ungleicharmiger Hebel

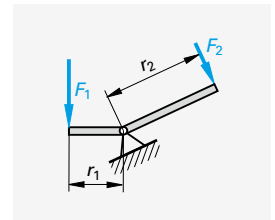


Bild 8: Winkelhebel

Unabhängig von der **Hebelart** werden die **Hebelarme** vom Angriffspunkt der Kraft bis zum Drehpunkt, d. h. bis zum Hebellager, gemessen ($F \perp r$).

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2 \quad \text{Hebelgesetz}$$

F_1, F_2	Kräfte	N
r_1, r_2	Hebelarme	m

$$\sum M_d = 0 \quad \text{Momentengleichgewicht}$$

1.8 Standfestigkeit und Kippsicherheit

$F_1 \cdot r_1$ → **Kippmoment** → M_K in Nm
 $F_G \cdot r, F_2 \cdot r_2$ → **Standmomente** → M_S in Nm (→ Bild 9)

$$v_K = \frac{\sum M_S}{\sum M_K} \quad \text{Kippsicherheit}$$

Stabiles Gleichgewicht bei $v_K > 1$

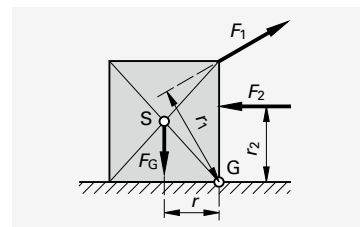


Bild 9: Stand- und Kippmoment

Greifen bei einem Körper außer der Gewichtskraft keine weiteren äußeren Kräfte an, dann steht der Körper stabil, wenn er Kippkanten (Kipp-Punkte) hat (Punkt G in Bild 9/18) und das Lot vom Schwerpunkt die Standfläche innerhalb der Kippkanten trifft.

r	Hebelarme	m
F	Kräfte	N
ΣM_S	Summe aller Standmomente	Nm
ΣM_K	Summe aller Kippmomente	Nm

1.9 Bewegungsgröße (Impuls), Impulserhaltung, Impulsänderung

$$p = m \cdot v \quad \text{1} \quad \text{Bewegungsgröße (Impuls)}$$

$$m \cdot v_t = m \cdot v_0 \quad \text{2} \quad \longrightarrow \quad \Delta p = 0: \text{Impulserhaltung}$$

Impulssatz: Bei $\Sigma F = 0$ (äußere Kräfte) ändert sich der Impuls nicht, d. h. $\Delta p = 0$.

$$I = F \cdot \Delta t = m \cdot v_t - m \cdot v_0 \quad \text{3} \quad \text{Kraftstoß}$$

p	Bewegungsgröße (Impuls)	kgm/s
m	Masse des Körpers	kg
v	Geschwindigkeit des Körpers	m/s
v_t	Endgeschwindigkeit	m/s
v_0	Anfangsgeschwindigkeit	m/s
I	Kraftstoß (Impulsänderung)	kgm/s
F	kurzzeitig wirkende Kraft	N
Δt	Wirkzeit	s

Der Kraftstoß ist gleich der Änderung des Impulses eines bewegten Körpers.

1.10 Reibung

Haft- und Gleitreibungskraft, Reibungsgesetz nach Coulomb

$$\text{Haftreibungskraft} \longrightarrow F_{R0} \longrightarrow \text{Reibungskraft im Ruhezustand}$$

$$\text{Gleitreibungskraft} \longrightarrow F_R \longrightarrow \text{Reibungskraft im Bewegungszustand}$$

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad \text{4} \quad \text{Coulomb'sches Reibungsgesetz}$$

Die **Normalkraft** F_N ist die Kraft, mit der die beiden festen Körper gegeneinander gepresst werden.

$$F_{R0} = \mu_0 \cdot F_N \quad \text{5} \quad \text{Haftreibungskraft}$$

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad \text{6} \quad \text{Gleitreibungskraft}$$

F_{R0}	Haftreibungskraft	N
μ_0	Haftreibungszahl (-koeffizient)	1
F_R	Gleitreibungskraft	N
μ	Gleitreibungszahl (-koeffizient)	1
F_N	Normalkraft (\rightarrow Bild 1)	N

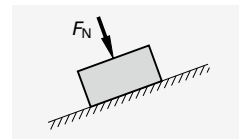


Bild 1: Normalkraft

Rollreibung (\rightarrow Bild 2)

$$F_{RR} = \frac{f}{r} \cdot F_N = \mu_R \cdot F_N \quad \text{7} \quad \text{Rollreibungskraft in N}$$

$$F = F_{RR} \quad \text{8} \quad \text{Rollkraft in N}$$

f	Hebelarm der Rollreibung (siehe Tabelle unten)	cm
$\gamma \approx r$	Radius des Rollkörpers	cm
F_N	Normalkraft	N
μ_R	Rollreibungszahl	1

Tabelle 1: Hebelarme der Rollreibung		
Werkstoff Rollkörper	Werkstoff Rollbahn	Hebelarm f der Rollreibung in cm
GG	St	0,05
Stahl (St)	Stahl (St)	0,05
GG	GG	0,05
Holz	Holz	0,5
St gehärtet	St gehärtet	0,0005...0,001
Kupfer	St	0,1
Kupfer	Kupfer	0,8
Messing	St	0,05

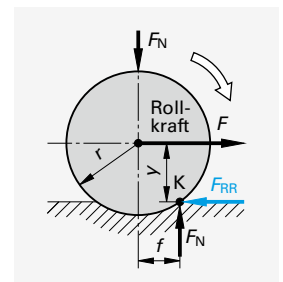


Bild 2: Rollreibungskraft

Fahrwiderstand

$$F_F = \mu_F \cdot F_N \quad \text{1} \quad \text{Fahrwiderstandskraft in N}$$

μ_F	Fahrwiderstandszahl	1
	Schienenfahrzeuge $\mu_F \approx 0,0015 \dots 0,0030$	
	Kfz auf Straße $\mu_F \approx 0,015 \dots 0,03$	

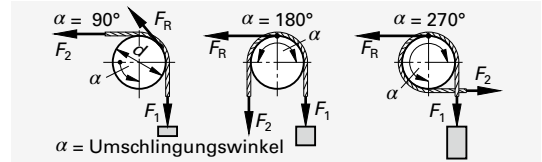
Seilreibung (→ Bild 1)

$$F_1 = F_2 \cdot e^{\mu \alpha} \quad \text{2} \quad \text{übertragbare Seilkraft in N}$$

$$F_R = F_2 \cdot (e^{\mu \alpha} - 1) \quad \text{3} \quad \text{Seilreibungskraft in N}$$

$$F_R = F_1 \cdot \frac{e^{\mu \alpha} - 1}{e^{\mu \alpha}} \quad \text{4} \quad \text{Seilreibungskraft in N}$$

e = Euler'sche Zahl = 2,718... α in rad

**Bild 1: Seilreibung**

μ	Reibungszahl	1
F_2	Zugkraft	N
α	Umschlingungswinkel	rad

1.11 Arbeit und Energie**Die mechanische Arbeit**

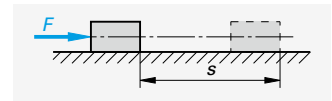
$$W = F \cdot s \quad \text{5} \quad \text{mechanische Arbeit} \quad F \text{ und } s \text{ gleichgerichtet}$$

$$[W] = [F] \cdot [s] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Nm}$$

Arbeits- und Energieeinheiten

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} \quad \text{6} \quad \text{Energieäquivalenz}$$

J	Joule	→ bevorzugt in Wärmelehre
Nm	Newtonmeter	→ bevorzugt in Mechanik
Ws	Wattsekunde	→ bevorzugt in Elektrotechnik

**Bild 2: Mechanische Arbeit**

W	mechanische Arbeit	Nm
F	Kraft	N
s	Kraft in Wegrichtung	m

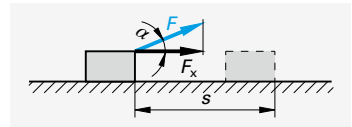
Die abgeleitete SI-Einheit für die mechanische Arbeit ist das **Joule** (Einheitenzeichen: J). 1 J ist gleich der Arbeit, die verrichtet wird, wenn der Angriffspunkt der Kraft $F = 1 \text{ N}$ in Richtung der Kraft um $s = 1 \text{ m}$ verschoben wird (→ Bild 2).

Die Arbeitskomponente der Kraft (→ Bild 3)

Als Arbeitskomponente wird die Kraftkomponente in Wegrichtung bezeichnet.

$$F_x = F \cdot \cos \alpha \quad \text{7} \quad \text{Arbeitskomponente (→ Bild 3)}$$

$$W = F \cdot \cos \alpha \cdot s \quad \text{8} \quad \text{mechanische Arbeit}$$

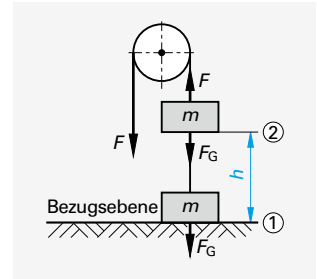
**Bild 3: Arbeitskomponente****Hubarbeit und potenzielle Energie (→ Bild 4)**

$$W_h = F \cdot h \quad \text{9} \quad \text{Hubarbeit in Nm}$$

$$W_{\text{pot}} = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h \quad \text{10} \quad \text{potenzielle Energie = Energie der Lage}$$

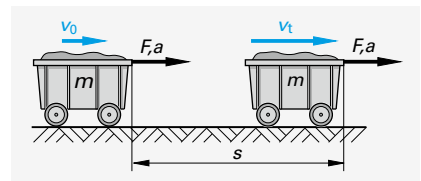
Bei Vernachlässigung der Zapfen- und Seilreibung ist $F = F_G$. Dann ist bei gleichem Weg $W_h = W_{\text{pot}}$.

Die zugeführte Hubarbeit W_h entspricht der Zunahme an potenzieller Energie W_{pot} .

**Bild 4: Hubvorrichtung****Beschleunigungsarbeit und kinetische Energie (→ Bild 5)**

$$W_a = m \cdot a \cdot s = \frac{m}{2} \cdot v_t^2 \quad \text{11} \quad \text{Beschleunigungsarbeit aus der Ruhe in Nm}$$

$$W_{\text{kin}} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad \text{12} \quad \text{kinetische Energie = Bewegungsenergie in Nm}$$

**Bild 5: Beschleunigte Masse**