



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
Düsselberger 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 Erftstadt
Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Umschlagfotos: © photosoup und Michael Rosskothen – fotolia.com
Druck: RCOM Print GmbH, 97222 Rimpar

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 <i>p</i>, <i>V</i>-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 <i>T</i>, <i>s</i>-Diagramm | 71 |
| A10 | Kreisprozesse im <i>h</i>, <i>s</i>-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 Spannungszeugern | 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 Ventilsteuering | 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 Peltoniturbinen (Freistrahlturbine) | 159 |
| 5.2.4 | Die Francisturbine (Spiralturbine) | 160 |
| 5.2.5 | Die Kaplaniturbinen (Propellerturbine) | 161 |
| 5.2.6 | Pumpturbinen | 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 | Gemischaufbereitung 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 Spannungs- und Leistungserzeugung | 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 | Laufräder | 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** auseinander zu setzen. 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 helfen, 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.



Kraftmaschine
Beispiel: Turbine



Arbeits-
maschine
Beispiel:
Gabelstapler

Bild 1: Beispiele für Kraft- und Arbeitsmaschinen

Begriff Kraftmaschine

Der Begriff Energieart wurde bereits erwähnt. Eine für den Betrieb von Arbeitsmaschinen unabdingbare Energieart ist die **mechanische Energie**. Sie kann Energie der Lage (**potenzielle Energie**) oder Bewegungsenergie (**kinetische Energie**) sein (→ A1.11, A1.16).

Eine Kraftmaschine ist eine Maschine, die andere als mechanische Energie (z.B. thermische Energie, Windenergie oder elektrische Energie) in mechanische Energie umwandelt.

Diese mechanische Energie wird zur Verwertung (Energieumwandlung) an Arbeitsmaschinen abgegeben.

Beispiele für Kraftmaschinen

Dampfmaschine, Dampfturbine, Verbrennungsmotor, Gasturbine, Wasserturbine, Windrad, Elektromotor u.a.

Eine Voraussetzung dafür, dass mechanische Energie von einer Kraftmaschine an eine Arbeitsmaschine abgegeben werden kann, ist die **konstruktive Verbindung** von Kraftmaschine und Arbeitsmaschine. Bild 1 zeigt am Beispiel einer Verbrennungskraftmaschine die Stelle des Energieübergangs, die **Kurbelwelle**. Mithilfe einer **Kupplung** erfolgt dort die Verbindung mit der antriebenden Arbeitsmaschine.

Im Kapitel C dieses Buches wird ausführlich auf **Energieumwandlungen** in Kraftmaschinen eingegangen. Bild 1 bietet aber schon jetzt Gelegenheit, eine solche Energieumwandlung an dem dort gewählten Beispiel zu zeigen. Während des sogenannten **Arbeitstaktes** wird die **chemische Energie** des Kraftstoffes in **Bewegungsenergie** umgewandelt.

Die bei diesem Vorgang in der Verbrennungskraftmaschine durchlaufenen **energetischen Stufen** werden in Bild 2 dargestellt:

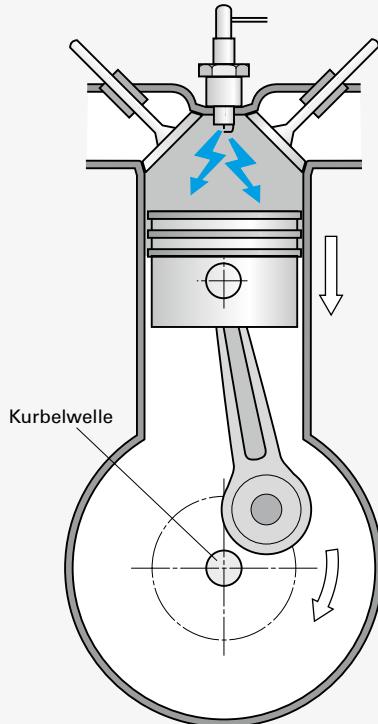


Bild 1: Arbeitstakt eines Viertakt-Ottomotors

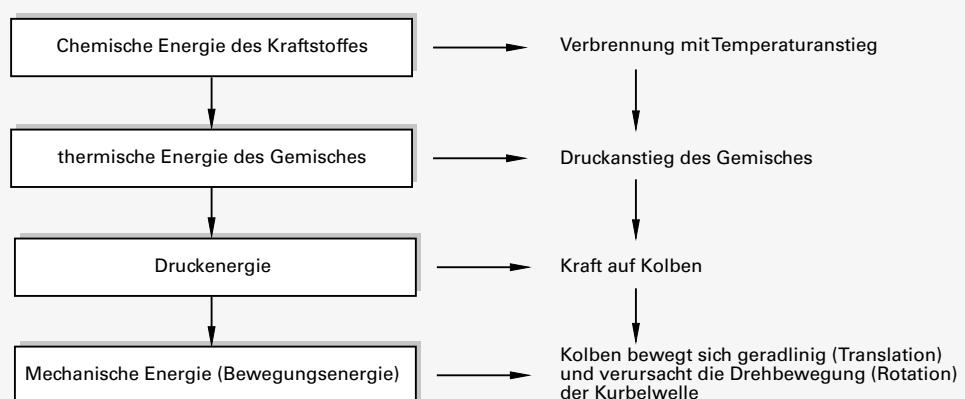


Bild 2: Energieumwandlung in einer Verbrennungskraftmaschine

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:

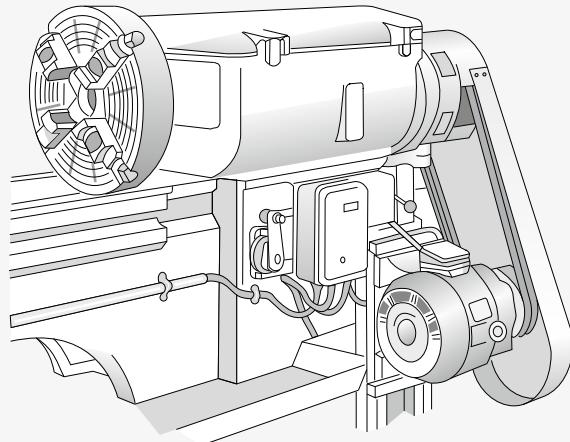


Bild 1: Koppelung von Kraftmaschine und Arbeitsmaschine

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:

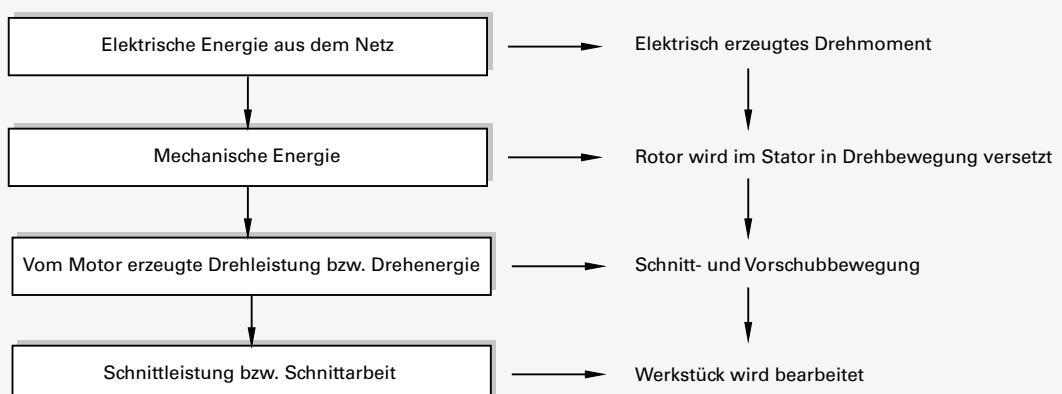


Bild 2: Energetische Stufen bei der Koppelung von Elektromotor und Drehmaschine

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.

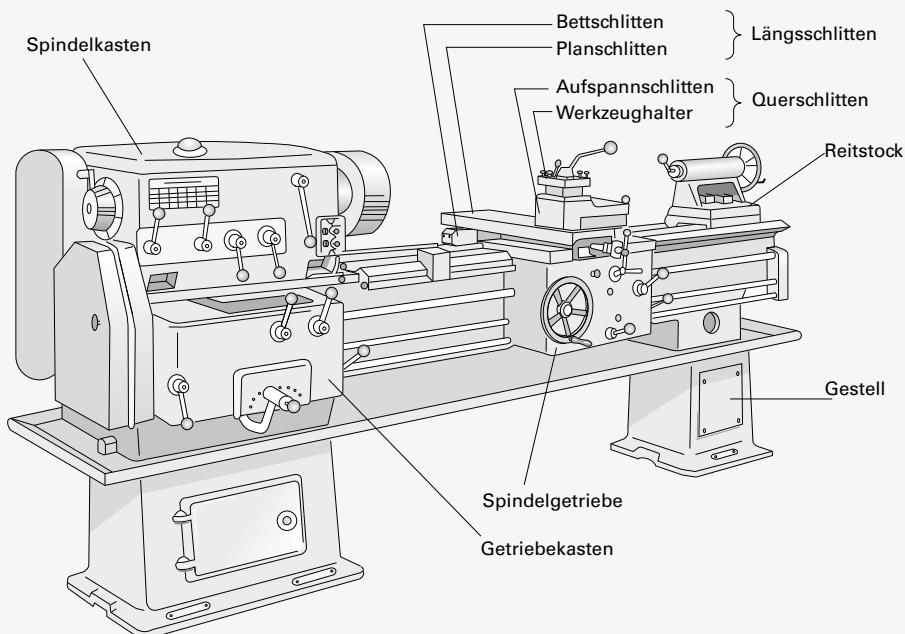


Bild 1: Drehmaschine, aus mehreren Baugruppen zusammengesetzt

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 **Basis-einheiten** (nebenstehende Tabelle).

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

Beispiel: Geschwindigkeit = $\frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$
 $v = \frac{s}{t} \longrightarrow [v] = \frac{[\text{s}]}{[\text{t}]} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$ z. B. $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

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

Tabelle 1: SI-Basisystem

| 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.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad 1 \quad \text{Geschwindigkeit in } \frac{\text{m}}{\text{s}}, \frac{\text{km}}{\text{h}}, \dots$$

$$v = \frac{s}{t} \quad 2 \quad s = v \cdot t \quad 3 \quad t = \frac{s}{v} \quad 4 \quad 1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad 5$$

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

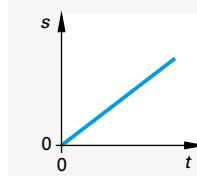


Bild 1: s,t-Diagramm

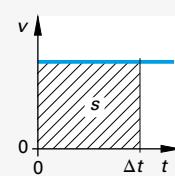


Bild 2: v,t-Diagramm

| | | |
|----------------|------------------------------|--------------|
| 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 | Beschleunigung (Verzögerung) | m/s^2 |
| Δv | Geschwindigkeitsänderung | m/s |
| Δt | Zeitspanne | s |

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad 6 \quad \begin{array}{l} a > 0: \text{Beschleunigung} \\ a < 0: \text{Verzögerung} \end{array} \quad \begin{array}{l} \xrightarrow{\hspace{1cm}} \text{Geschwindigkeitszunahme} \\ \xrightarrow{\hspace{1cm}} \text{Geschwindigkeitsabnahme} \end{array}$$

$a = \text{konstant}$ \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 |

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

$$\left. \begin{array}{l} s \triangleq h \text{ Fallhöhe bzw. Steighöhe} \\ a \triangleq g \text{ Fallbeschleunigung} \end{array} \right\} g_n = \text{Normfallbeschleunigung} = 9,80665 \text{ m/s}^2 \quad 7$$

$$g_{\max} \approx 9,83 \text{ m/s}^2 \quad \text{an den Erdpolen}$$

$$g_{\min} \approx 9,78 \text{ m/s}^2 \quad \text{am Äquator}$$

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

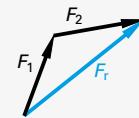
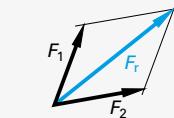


Bild 1: Kräfteparallelogramm

Bild 2: Kräftedreieck

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

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

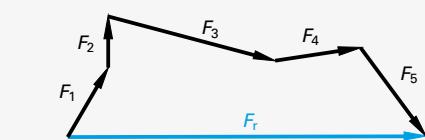


Bild 3 : Kräftepolygon

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

$$F = m \cdot a \quad 1 \quad \text{Massenträgheitskraft}$$

F Kraft
m Masse
a Beschleunigung
g Fallbeschleunigung

$$F_G = m \cdot g \quad 2 \quad \text{Gewichtskraft}$$

N
kg
m/s²
m/s²

Die Krafteinheit

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

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.

$$1 \frac{\text{kgm}}{\text{s}^2} = 1 \text{ Newton} = 1 \text{ N} \quad 3$$

$1 \text{ daN} = 1 \text{ Dekanewton} = 10 \text{ N}$
 $1 \text{ kN} = 1 \text{ Kilonewton} = 10^3 \text{ N}$
 $1 \text{ MN} = 1 \text{ Meganewton} = 10^6 \text{ N}$

je nach
Größenordnung
der Kraft

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).

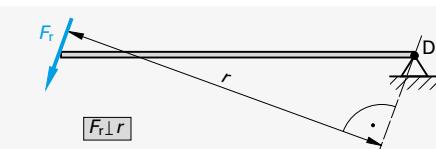


Bild 4: Kraftmoment

$$M_d = F_r \cdot r \quad 4 \quad \text{Kraftmoment bzw. Drehmoment}$$

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

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

Einheit des Drehmomentes: Newtonmeter (Nm)

Drehsinn und Vorzeichen von M_d (\rightarrow 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 (\rightarrow Bild 3).

Vorzeichenregel beachten! Somit:

$$M_{dr} = F_1 \cdot r_1 + F_2 \cdot r_2 + \dots \quad 1 \quad \text{resultierendes Drehmoment}$$

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

$$M_d = F \cdot r = F_y \cdot r_y \quad 2 \quad \text{Drehmoment bei Schrägkräften} \quad (\rightarrow \text{Bild 4})$$

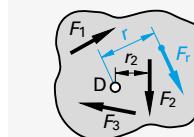


Bild 3

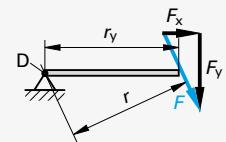


Bild 4

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

Hebelarten und Hebelgesetz

Einseitiger Hebel \longrightarrow der stabförmige Hebel hat seinen Drehpunkt an einem Ende

Zweiseitiger Hebel \longrightarrow der stabförmige Hebel hat seinen Drehpunkt zwischen seinen beiden Enden

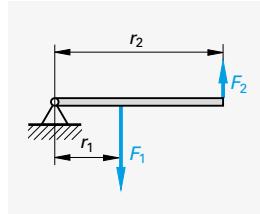


Bild 5: Einseitiger Hebel

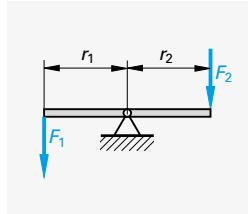


Bild 6: Zweiseitiger gleicharmiger Hebel

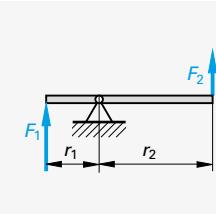


Bild 7: Zweiseitiger ungleicharmiger Hebel

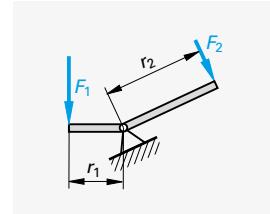


Bild 8: Winkelhebel

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

$$F_1 \cdot r_1 = F_2 \cdot r_2 \quad 3 \quad \text{Hebelgesetz}$$

F_1, F_2 Kräfte
 r_1, r_2 Hebelarme

N
m

$$\sum M_d = 0 \quad 4 \quad \text{Momentengleichgewicht}$$

1.8 Standfestigkeit und Kippsicherheit

$F_1 \cdot r_1 \longrightarrow$ Kippmoment $\longrightarrow M_K$ in Nm
 $F_G \cdot r, F_2 \cdot r_2 \longrightarrow$ Standsmomente $\longrightarrow M_S$ in Nm (\rightarrow Bild 9)

$$v_K = \frac{\sum M_S}{\sum M_K} \quad 5 \quad \text{Kipsicherheit}$$

Stabiles Gleichgewicht bei $v_K > 1$

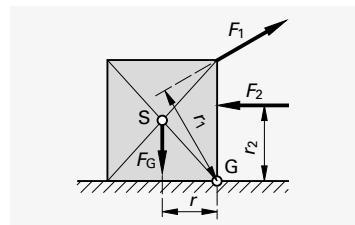


Bild 9: Stand- und Kippmoment

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

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

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

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

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

| | | |
|------------|-----------------------------|----------------|
| 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 | kurzeitig 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

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

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

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

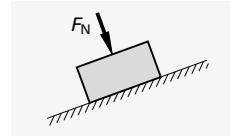


Bild 1: Normalkraft

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

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

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

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

Rollreibung (→ Bild 2)

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

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

| | | |
|---------------|--|----|
| f | Hebelarm der Rollreibung (siehe Tabelle unten) | cm |
| $y \approx r$ | 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 |

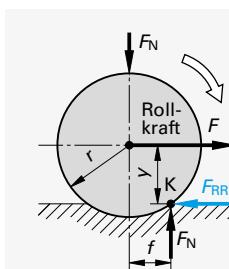


Bild 2: Rollreibungskraft

Fahrwiderstand

$$F_F = \mu_F \cdot F_N \quad 1$$

Fahrwiderstandskraft in N

Seilreibung (\rightarrow Bild 1)

$$F_1 = F_2 \cdot e^{\mu\alpha} \quad 2$$

übertragbare Seilkraft in N

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

Seilreibungskraft in N

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

Seilreibungskraft in N

$e = \text{Euler'sche Zahl} = 2,718\dots$ α in rad

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

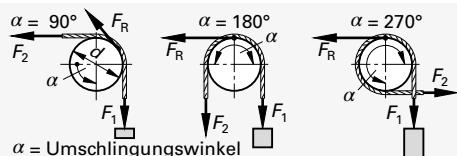


Bild 1: Seilreibung

| | | |
|----------|---------------------|-----|
| μ | Reibungszahl | 1 |
| F_2 | Zugkraft | N |
| α | Umschlingungswinkel | rad |

1.11 Arbeit und Energie

Die mechanische Arbeit

$$W = F \cdot s \quad 5$$

mechanische Arbeit F und s gleichgerichtet

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

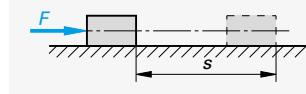


Bild 2: Mechanische Arbeit

| | | |
|-----|----------------------|----|
| 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 $F = 1$ N in Richtung der Kraft um $s = 1$ m verschoben wird (\rightarrow Bild 2).

Die Arbeitskomponente der Kraft (\rightarrow Bild 3)

Als Arbeitskomponente wird die Kraftkomponente in Wegrichtung bezeichnet.

$$F_x = F \cdot \cos \alpha \quad 7$$

Arbeitskomponente (\rightarrow Bild 3)

$$W = F \cdot \cos \alpha \cdot s \quad 8$$

mechanische Arbeit

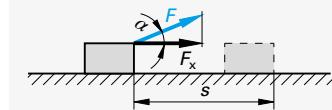


Bild 3: Arbeitskomponente

Hubarbeit und potentielle Energie (\rightarrow Bild 4)

$$W_h = F \cdot h \quad 9$$

Hubarbeit in Nm

$$W_{pot} = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h \quad 10$$

potentielle Energie = Energie der Lage

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

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

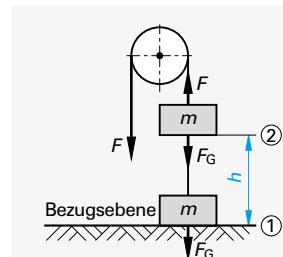


Bild 4: Hubvorrichtung

Beschleunigungsarbeit und kinetische Energie (\rightarrow Bild 5)

$$W_a = m \cdot a \cdot s = \frac{m}{2} \cdot v_t^2 - \frac{m}{2} \cdot v_0^2 \quad 11$$

Beschleunigungsarbeit aus der Ruhe in Nm

$$W_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v^2 \quad 12$$

kinetische Energie = Bewegungsenergie in Nm

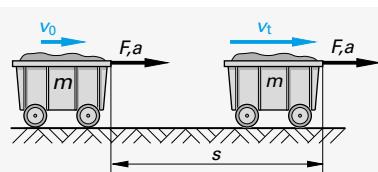


Bild 5: Beschleunigte Masse