



Bibliothek des technischen Wissens

Werkstofftechnik für Elektroberufe

Eckhard Ignatowitz, Otto Spielvogel, Klaus Tkotz

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises: Klaus Tkotz

4. Auflage

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

Europa-Nr.: 51917

Autoren:

Ignatowitz, Eckhard

Dr. Ing.

Waldbronn

Spielvogel, Otto

Dipl.-Ing. (FH)

Ohmden

Tkotch, Klaus

Dipl.-Ing. (FH)

Kronach

Lektorat und Leitung des Arbeitskreises:

Klaus Tkotch

Bildentwürfe: Die Autoren

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, Ostfildern

Fotos:

Verschiedene Firmen und Institutionen (Verzeichnis: Seite 283)

4. Auflage 2010, korrigierter Nachdruck 2017

Druck 5

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-5194-3

Umschlaggestaltung unter Verwendung eines Fotos der Firma IBM Deutschland GmbH

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

© 2010 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Sperling Info Design GmbH, 30989 Gehrden
Druck: Medienhaus Plump GmbH, 53619 Rheinbreitbach

Vorwort

Das Buch **Werkstofftechnik für Elektroberufe** vermittelt anschaulich und umfassend die Grundlagen und das Fachwissen der modernen Werkstofftechnik der Elektroberufe.

Neben den werkstofftechnischen Grundlagen und den traditionellen Werkstoffen der Elektrotechnik und des Elektromaschinenbaus werden die modernen Werkstoffe der Elektronik vorgestellt sowie die Herstellungsverfahren verschiedener Elektronikbauelemente beschrieben. Zusätzlich sind aktuelle Hightech-Werkstoffe der Elektronik, der Informatik, Energietechnik und der Telekommunikation behandelt.

Dieses Lehr- und Arbeitsbuch vermittelt anschaulich das notwendige Grund- und Fachwissen der Werkstofftechnik und zeigt wesentliche Zusammenhänge auf. Das Buch ist nach bewährter und erprobter methodisch-didaktischer Konzeption erstellt.

Der Lehrstoff gliedert sich in

- **Naturwissenschaftliche Grundlagen**

Unterteilt in physikalische, chemische und werkstofftechnische Grundlagen.

- **Konstruktionswerkstoffe und Hilfsstoffe**

Sie umfassen die Stähle und Eisengusswerkstoffe, die Nichteisenmetalle, die Kunststoffe, die Sinterwerkstoffe, Lote, Klebstoffe und Schmierstoffe. Behandelt werden auch der innere Aufbau der Werkstoffe, die Wärmebehandlung, der Korrosionsschutz und die Werkstoffprüfung.

- **Werkstoffe der Elektrotechnik/Elektronik sowie deren Anwendung**

Leiter-, Kontakt-, Widerstands-, Isolier-, Halbleiter- und Magnetwerkstoffe, Halbleiterbauelemente, integrierte Schaltungen, gedruckte Schaltungen und SMD-Bauelemente.

- **Hightech-Werkstoffe**

Lichtwellenleiter, Flüssigkristalle und piezokeramische Werkstoffe.

- **Umweltschutz und Arbeitssicherheit**

Umweltbelastung durch die elektrotechnische Fertigung, Recycling und Entsorgung der Werk- und Hilfsstoffe, gefährliche Arbeitsstoffe.

Das Buch **Werkstofftechnik für Elektroberufe** ist geeignet für alle elektrotechnischen Handwerks- und Industrieberufe in Berufsschulen, Meisterschulen, sowie für Berufsfachschulen und technische Gymnasien.

Es vermittelt im Wesentlichen auch den Lehrstoff der Werkstofftechnik an den Fachschulen für Technik und für die betriebliche Fort- und Weiterbildung.

Für Studenten der technischen Hochschulen bietet es ein solides Grundwissen.

Das Buch eignet sich sowohl als unterrichtsbegleitendes Lehrbuch als auch zum Selbststudium.

Besonderer Wert wurde im vorliegenden Buch auf Übersichtlichkeit und Anschaulichkeit gelegt. Der Leser erhält einen Überblick über die verschiedenen Werkstoffe, deren Anwendung und Verarbeitung.

Merksätze und Wiederholungsfragen festigen das erworbene Wissen.

Selbstverständlich wurden bei der Bucherstellung die zur Zeit gültigen DIN-EN-, DIN- und VDE-Normen berücksichtigt.

Mit diesem Buch wurde eine häufig beklagte Lücke im Fachbereich Werkstofftechnik für Elektroberufe geschlossen.

Vorwort zur 4. Auflage

In der 4. Auflage wurden Fachinhalte, Lehrtext und Bilder weiter verbessert sowie die aktuellen DIN- und DIN EN-Normen eingearbeitet. Somit entspricht das Buch dem neuesten Stand der Technik und den fachbezogenen Vorschriften.

Für Verbesserungsvorschläge sind die Autoren und der Verlag dankbar.

Sommer 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Werkstoffe der Elektrotechnik	7	3.7	Wärmebehandlung der Stähle	79
2	Naturwissenschaftliche Grundlagen der Werkstoffkunde	10	3.7.1	Glühen	79
2.1	Physikalische Grundlagen	10	3.7.2	Härten	80
2.1.1	Körper und Stoff	10	3.7.3	Gittervorgänge und Gefügeveränderungen	81
2.1.2	Bewegung der Körper (Bewegungslehre)	13	3.7.4	Vergüten	82
2.1.3	Kräfte	16	3.7.5	Härten der Randzone	83
2.1.4	Mechanische Beanspruchung der Werkstoffe	20	3.7.6	Wärmebehandlung der Stahlgruppen	84
2.1.5	Aufbau der Stoffe	22	3.8	Kupfer und Kupferlegierungen	85
2.1.6	Mechanik der Flüssigkeiten und Gase	24	3.8.1	Kupfergewinnung	85
2.1.7	Ausdehnung der Körper beim Erwärmen	27	3.8.2	Allgemeine Eigenschaften und Verwendung	86
2.1.8	Temperatur	28	3.8.3	Kupfersorten (unlegiert)	86
2.1.9	Zustandsänderung der Stoffe	29	3.8.4	Niedrig legierte Kupferwerkstoffe	87
2.1.10	Ausbreitung der Wärme	31	3.8.5	Kupfer-Zink-Legierungen (Messing)	88
2.1.11	Wärmeenergie	32	3.8.6	Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronze)	89
2.2	Chemische Grundlagen	33	3.8.7	Kupfer-Nickel-Legierungen	90
2.2.1	Stoffe und Stoffänderungen	33	3.8.8	Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen (Neusilber)	90
2.2.2	Sauerstoff und Oxidation	33	3.9	Aluminium und Aluminiumlegierungen	91
2.2.3	Chemische Zeichensprache	35	3.9.1	Aluminium-Herstellung	91
2.2.4	Wasserstoff und Redox-Reaktion	37	3.9.2	Allgemeine Eigenschaften und Verwendung	92
2.2.5	Atome und Ionen	38	3.9.3	Aluminium-Werkstoffgruppen	93
2.2.6	Chemische Bindung	39	3.9.4	Nichtaushärtbare Aluminium-Werkstoffe	94
2.2.7	Säuren	41	3.9.5	Aushärtbare Al-Knetlegierungen	94
2.2.8	Basen (Laugen)	42	3.9.6	Aluminium-Gusswerkstoffe	94
2.2.9	Salze	43	3.10	Werkstoffe für Hochtemperatur- und Vakuumtechnik	95
2.2.10	Periodensystem der Elemente	44	3.11	Niedrigschmelzende Metalle	96
2.2.11	Kohlenwasserstoffe	46	3.12	Legierungsmetalle	97
2.2.12	Alkanole (Alkohole) und Alkanale (Aldehyde)	50	3.13	Edelmetalle	97
2.2.13	Carbonsäuren	51	3.14	Sinterwerkstoffe	98
2.2.14	Ester	52	3.14.1	Herstellung von Sinterteilen (Pulvermetallurgie)	98
2.2.15	Organische Stickstoffverbindungen	52	3.14.2	Typische Verwendung von Sintermetallen	99
2.2.16	Tabellarische Übersicht organischer Verbindungen	53	3.14.3	Hartmetalle	100
3	Konstruktionswerkstoffe	54	3.15	Korrosion und Korrosionsschutz	101
3.1	Einteilung der Konstruktionswerkstoffe	54	3.15.1	Elektrochemische Korrosionsarten	101
3.2	Roheisengewinnung und Stahlherstellung	56	3.15.2	Chemische Korrosion	104
3.3	Atomare Vorgänge bei der Metallerzeugung	58	3.15.3	Erscheinungsformen der Korrosion	104
3.4	Verarbeitung des Stahls zu Halbzeugen	59	3.15.4	Maßnahmen zur Korrosionsvermeidung	105
3.5	Eisen- und Stahl-Konstruktionswerkstoffe	62	3.15.5	Korrosionsschutz von Eisen- und Stahlwerkstoffen	105
3.5.1	Stahlbaustähle	63	3.15.6	Korrosion von Kupferwerkstoffen	107
3.5.2	Stähle in Elektromaschinen	66	3.15.7	Korrosion von Aluminiumwerkstoffen	108
3.5.3	Werkzeugstähle	69	3.15.8	Korrosionsverhalten weiterer Werkstoffe	108
3.5.4	Eisen- und Stahl-Gusswerkstoffe	70	3.16	Kunststoffe (Plaste)	109
3.6	Der innere Aufbau der Metalle	71	3.16.1	Eigenschaften und Verwendung	109
3.6.1	Gefüge und kristalline Struktur	71	3.16.2	Herstellung und innerer Aufbau	110
3.6.2	Die Kristallgittertypen der Metalle	72	3.16.3	Technologische Einteilung	111
3.6.3	Der reale kristalline Aufbau	72	3.16.4	Thermoplaste	112
3.6.4	Kristalline Struktur und Eigenschaften	73	3.16.5	Duroplaste	115
3.6.5	Gefüge und Eigenschaften	74	3.16.6	Elastomere (Elaste, Gummi, Kautschuk)	116
3.6.6	Gefügearten der Eisen- und Stahl-Werkstoffe	75	3.16.7	Formgebung der Kunststoffe	117
3.6.7	Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild	77	3.17	Verbundwerkstoffe	119
			3.17.1	Innerer Aufbau	119
			3.17.2	Verbundwerkstoffe auf Kunststoffbasis	119
			3.17.3	Trennscheiben, Schleifkörper, Hartmetalle	120
			3.17.4	Schichtverbundwerkstoffe	120

3.18 Werkstoffprüfung	121	7.1.3 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes	156
3.18.1 Technologische Eignungsprüfungen	121	7.1.4 Thermospannung	157
3.18.2 Kerbschlagbiegeversuch	121	7.1.5 Anforderungen an Widerstandswerkstoffe	158
3.18.3 Zugversuch (DIN EN 10002)	122	7.2 Heizleiterwerkstoffe	158
3.18.4 Weitere Festigkeitsprüfungen	123	7.3 Technische Widerstände	160
3.18.5 Härteprüfungen	124	7.4 Schichtschaltungen	162
3.18.6 Untersuchungen des inneren Aufbaus	125	7.4.1 Dickschicht-Technik	162
4 Hilfsstoffe	126	7.4.2 Dünnschicht-Technik	163
4.1 Lotwerkstoffe	126	7.4.3 Hybrid-Technik	164
4.1.1 Lötverfahren und Löttemperaturen	126	8 Isolierstoffe	165
4.1.2 Vorgänge beim Weichlöten	126	8.1 Einteilung und Anforderungen	165
4.1.3 Kurzbezeichnungen der Lotwerkstoffe	127	8.2 Elektrische Eigenschaften und ihre Messung	166
4.1.4 Weichlote	127	8.2.1 Durchgangswiderstand und spezifischer Durchgangswiderstand	166
4.1.5 Hartlote	129	8.2.2 Oberflächenwiderstand	166
4.2 Schmierstoffe und Kühlschmierstoffe	130	8.2.3 Durchschlagfestigkeit	167
4.2.1 Schmierstoffe	130	8.2.4 Lichtbogenfestigkeit	167
4.2.2 Kühlschmierstoffe	131	8.2.5 Kriechstromfestigkeit	168
4.3 Klebstoffe	132	8.2.6 Elektrostatische Aufladung	168
4.3.1 Physikalisch abbindende Klebstoffe	132	8.2.7 Permittivität	169
4.3.2 Reaktionsklebstoffe	133	8.2.8 Dielektrischer Verlustfaktor	169
4.3.3 Verarbeiten der Klebstoffe	134	8.3 Wichtige nichtelektrische Eigenschaften von Isolierstoffen	170
5 Leiterwerkstoffe	135	8.4 Feste Isolierstoffe	171
5.1 Elektrische Grundlagen	135	8.5 Organische Isolierstoffe	171
5.1.1 Leitungsvorgang in Metallen	135	8.5.1 Thermoplaste	172
5.1.2 Einflüsse auf den Leitungsvorgang	136	8.5.2 Duroplaste	175
5.1.3 Supraleitung	138	8.5.3 Elastomere	177
5.2 Leiterwerkstoff Kupfer	139	8.6 Anorganische Isolierstoffe	178
5.2.1 Unlegiertes Kupfer	139	8.6.1 Keramik-Isolierstoffe	178
5.2.2 Kupferlegierungen	140	8.6.2 Glas	180
5.3 Leiterwerkstoff Aluminium	142	8.6.3 Glaskeramik	181
5.3.1 Unlegiertes Aluminium	142	8.6.4 Glimmer	181
5.3.2 Aluminiumlegierungen	143	8.7 Flüssige Isolierstoffe	182
6 Kontaktwerkstoffe	144	8.7.1 Allgemeine Anforderungen	182
6.1 Einteilung der Kontakte	144	8.7.2 Mineralische Isolieröle	182
6.2 Anforderungen an Kontaktwerkstoffe	144	8.7.3 Synthetische Isolierflüssigkeiten	183
6.3 Begriffe der Kontakttechnik	145	8.8 Gasförmige Isolierstoffe	184
6.3.1 Kontaktwiderstand	145	8.8.1 Eigenschaften und Einteilung	184
6.3.2 Kontaktverschleiß	145	8.8.2 Natürliche Isoliergase	184
6.3.3 Kleben und Verschweißen von Kontakten	146	8.8.3 Synthetische Isoliergase	185
6.4 Eigenschaften von Kontaktwerkstoffen	147	9 Halbleiterwerkstoffe	186
6.4.1 Reine Metalle als Kontaktwerkstoffe	147	9.1 Stromleitung in Metallen und Halbleitern	187
6.4.2 Kontaktlegierungen und Sinter-Verbundkontakte	150	9.1.1 Leitungsvorgang in Metallen	187
6.5 Schichtverbundkontakte	152	9.1.2 Leitungsvorgang in Halbleitern	187
6.5.1 Kontaktbimetalle	152	9.1.3 Störstellenleitung	192
6.5.2 Thermobimetalle	152	9.1.4 Innerer Fotoeffekt	194
6.6 Kohlehaltige Kontaktwerkstoffe (Elektrokohle)	153	9.2 Ausgangsstoffe für Halbleiter	195
7 Widerstandswerkstoffe	155	9.2.1 Elementhalbleiter	195
7.1 Elektrotechnische Grundlagen	155	9.2.2 Verbindungshalbleiter	196
7.1.1 Spezifischer elektrischer Widerstand	155	9.3 Herstellung der wichtigsten Halbleiterwerkstoffe	199
7.1.2 Spezifische elektrische Leitfähigkeit	155	9.3.1 Silicium Si	199
		9.3.2 Germanium Ge	199

9.3.3	Galliumarsenid GaAs	200	10.9	Magnetisch weiche Werkstoffe	243
9.3.4	Indiumarsenid InAs	200	10.9.1	Magnetisch weiches Eisen und seine Legierungen	243
9.3.5	Indiumantimonid InSb	200	10.9.2	Magnetisch weiche Ferrite	246
9.3.6	Indiumantimonid-Nickelantimonid InSb-NiSb	201	10.9.3	Pulververbundwerkstoffe	247
9.4	Weiterverarbeiten des Halbleiterwerkstoffs	202	10.9.4	Amorphe Metalle (Metallgläser)	248
9.4.1	Reinigen durch Zonenschmelzen	202	10.10	Magnetisch harte Werkstoffe (Permanentmagnete)	249
9.4.2	Züchten von Halbleitereinkristallen	204	10.10.1	Metallische magnetisch harte Werkstoffe	250
9.4.3	Dotierverfahren	205	10.10.2	Seltenerdmetall-Magnete (Se-Legierungen)	252
9.5	Anwendungen	211	10.10.3	Keramische magnetisch harte Werkstoffe	253
9.5.1	Heißeleiter	211	10.10.4	Kunststoffgebundene Hartferrite	254
9.5.2	Kaltleiter	212	10.11	Magnetisch halbharte Werkstoffe	255
9.5.3	Spannungsabhängige Widerstände (Varistoren)	213	11	Gedruckte Schaltungen und SMD-Technik	256
9.5.4	Sperrschicht-Bauelemente	213	11.1	Gedruckte Schaltungen	256
9.5.5	Selen-Gleichrichter	213	11.1.1	Basismaterial	256
9.5.6	Optoelektronische Sperrschicht-Bauelemente	214	11.1.2	Erstellen des Leiterbildes	257
9.5.7	Fotowiderstände	214	11.1.3	Herstellung gedruckter Schaltungen	259
9.5.8	Hall-Generatoren	215	11.1.4	Mehrlagen-Leiterplatte (Multilayer)	262
9.6	Herstellen integrierter Schaltungen	216	11.2	Oberflächenmontage (SMD-Technik)	263
9.6.1	Reinigen der Oberfläche von Siliciumscheiben	218	11.2.1	Bauelemente zur Oberflächenmontage	263
9.6.2	Oxidieren der Siliciumscheiben	220	11.2.2	Bestückungsverfahren	263
9.6.3	Fotolack (Fotoresist)	222	11.2.3	Lötverfahren bei der SMD-Technik	264
9.6.4	Herstellen der Fotomasken	222	12	Besondere Werkstoffe der Elektrotechnik	265
9.6.5	Belichten mit der Fotomaske	223	12.1	Flüssigkristalle	265
9.6.6	Abätzen des Siliciumdioxids	225	12.1.1	Flüssigkristall-Anzeigen	265
9.6.7	Metallisierung	226	12.1.2	Ansteuerung und Anwendung von Flüssigkristall-Anzeigen	266
9.6.8	Endmontage der Chips	227	12.2	Solarzellen	267
10	Magnetwerkstoffe	230	12.2.1	Herstellung von Solarzellen	268
10.1	Magnetisches Feld	230	12.2.2	Anwendung von Solarzellen	268
10.2	Magnetische Eigenschaften der Stoffe	231	12.3	Lichtwellenleiter	269
10.3	Magnetisierung ferromagnetischer Stoffe	232	12.3.1	Physikalische Grundlagen der Übertragung von Licht	269
10.4	Ferrimagnetismus und Antiferromagnetismus	233	12.3.2	Herstellung von Lichtwellenleitern	270
10.5	Elektromagnetismus	234	12.3.3	Anwendung von Lichtwellenleitern	271
10.5.1	Leitermagnetfeld	234	12.4	Piezoelektrische Werkstoffe	272
10.5.2	Magnetfeld einer Spule	234	12.4.1	Piezoeffekt	272
10.6	Magnetische Größen und Begriffe	235	12.4.2	Direkter und indirekter Piezoeffekt	273
10.6.1	Durchflutung Θ	235	12.4.3	Werkstoffkennwerte piezoelektrischer Werkstoffe	273
10.6.2	Magnetische Feldstärke H	235	12.4.4	Herstellung piezokeramischer Werkstoffe	274
10.6.3	Magnetischer Fluss Φ	235	12.4.5	Anwendung piezoelektrischer Keramiken	275
10.6.4	Magnetische Flussdichte B	235	13	Umweltschutz, Arbeitssicherheit	277
10.6.5	Permeabilität μ	236	13.1	Umweltbelastung bei der Erzeugung der Werkstoffe	277
10.6.6	Magnetische Polarisation J	237	13.2	Umweltbelastungen bei der Fertigung	277
10.6.7	Hysteresekurve (Ummagnetisierungskennlinie)	237	13.3	Abwasserreinigung eines Elektrobetriebs	279
10.6.8	Energieprodukt bei Dauermagnetwerkstoffen	238	13.4	Wiederverwertung (Recycling)	279
10.6.9	Hystereseverluste	239	13.5	Entsorgung nicht verwertbarer Werkstoffe	281
10.6.10	Wirbelstromverluste	239	13.6	Gefährliche Arbeitsstoffe	281
10.6.11	Ummagnetisierungsverluste	240	Firmenverzeichnis		283
10.6.12	Magnetische Scherung	240	Sachwortverzeichnis		284
10.7	Entmagnetisierung	241			
10.7.1	Curie-Temperatur	241			
10.8	Magnetostriktion	242			

1 Werkstoffe der Elektrotechnik

Werden Naturstoffe, z.B. Erze, Kohle und Öl, gewonnen und aufbereitet, erhält man **Rohstoffe**.

Durch Weiterverarbeitung der Rohstoffe, z.B. bei der Eisengewinnung im Hochofen aus Eisenerz, entstehen die **Werkstoffe** als Produkte, aus denen man durch Be- und Verarbeitung Fertig- oder Halbfertigerzeugnisse herstellt.

Ein Stoff wird als Werkstoff verwendet, wenn er technisch verwertbare Eigenschaften zur Nutzbarmachung besitzt.

Die Werkstoffkunde basiert auf Grundlagen der Festkörperphysik, der Chemie und der Elektrochemie. Sie hat bestimmte Themen, Inhalte und Aufgaben (**Übersicht 1**). Die Werkstoffe der Elektrotechnik kann man nach ihrer Verwendung einteilen (**Übersicht 2**).

Konstruktionswerkstoffe (ab Seite 54) sind Werkstoffe für Bauelemente und Bauteile, z.B. Baugruppenträger, Antennenmasten und Gehäuse. Sie übertragen vor allem mechanische Kräfte und erfüllen eine Schutzfunktion.

Hilfsstoffe (ab Seite 126), z.B. Lote und Flussmittel, Öle, Brenngase und Klebstoffe, werden zur Herstellung von Fertigprodukten benötigt.

Leiterwerkstoffe (ab Seite 135), z.B. Kupfer und Aluminium, dienen dem Transport des elektrischen Stromes. Die elektrische Leitfähigkeit ist die wichtigste Eigenschaft dieser Metalle. Das Vermögen, den elektrischen Strom zu leiten, wird durch den spezifischen elektrischen Widerstand angegeben (**Bild**).

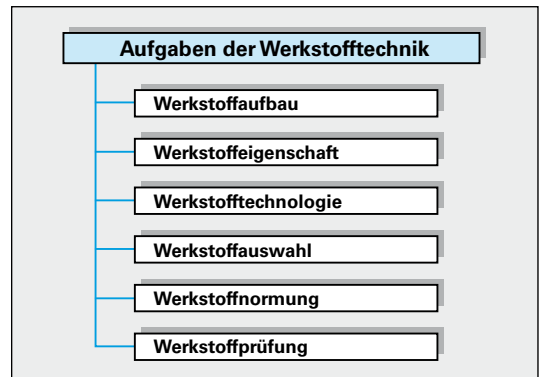
Kontaktwerkstoffe (ab Seite 144), z.B. Silber, Wolfram und Gold, verwendet man für elektrische Kontakte.

Widerstandswerkstoffe (ab Seite 155), z.B. Konstantan, hemmen gezielt den elektrischen Stromfluss.

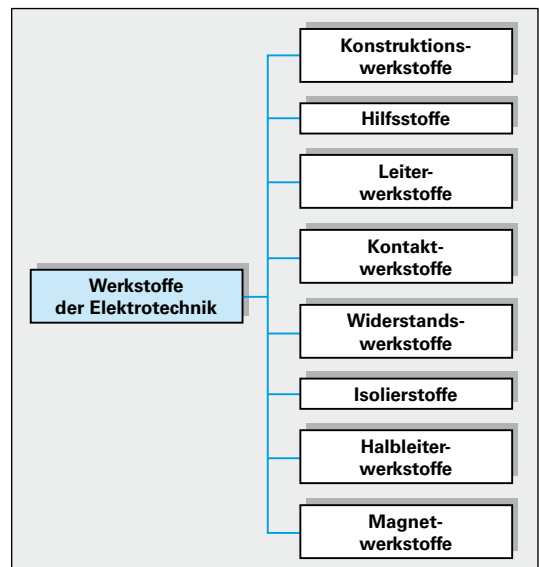
Isolierstoffe (ab Seite 165), z.B. Porzellan, sind nichtleitende Werkstoffe. Sie verhindern das Fließen eines elektrischen Stromes.

Halbleiterwerkstoffe (ab Seite 186), z.B. Silicium, sind Werkstoffe, deren elektrische Leitfähigkeit z.B. durch Dotierung beeinflusst werden kann.

Magnetwerkstoffe (ab Seite 230), z.B. Legierungen aus Eisen, Kobalt und Nickel, sind Werkstoffe, die magnetisiert werden können.



Übersicht 1: Aufgaben der Werkstoffkunde



Übersicht 2: Werkstoffe der Elektrotechnik

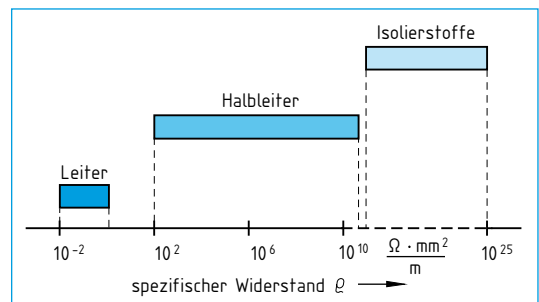
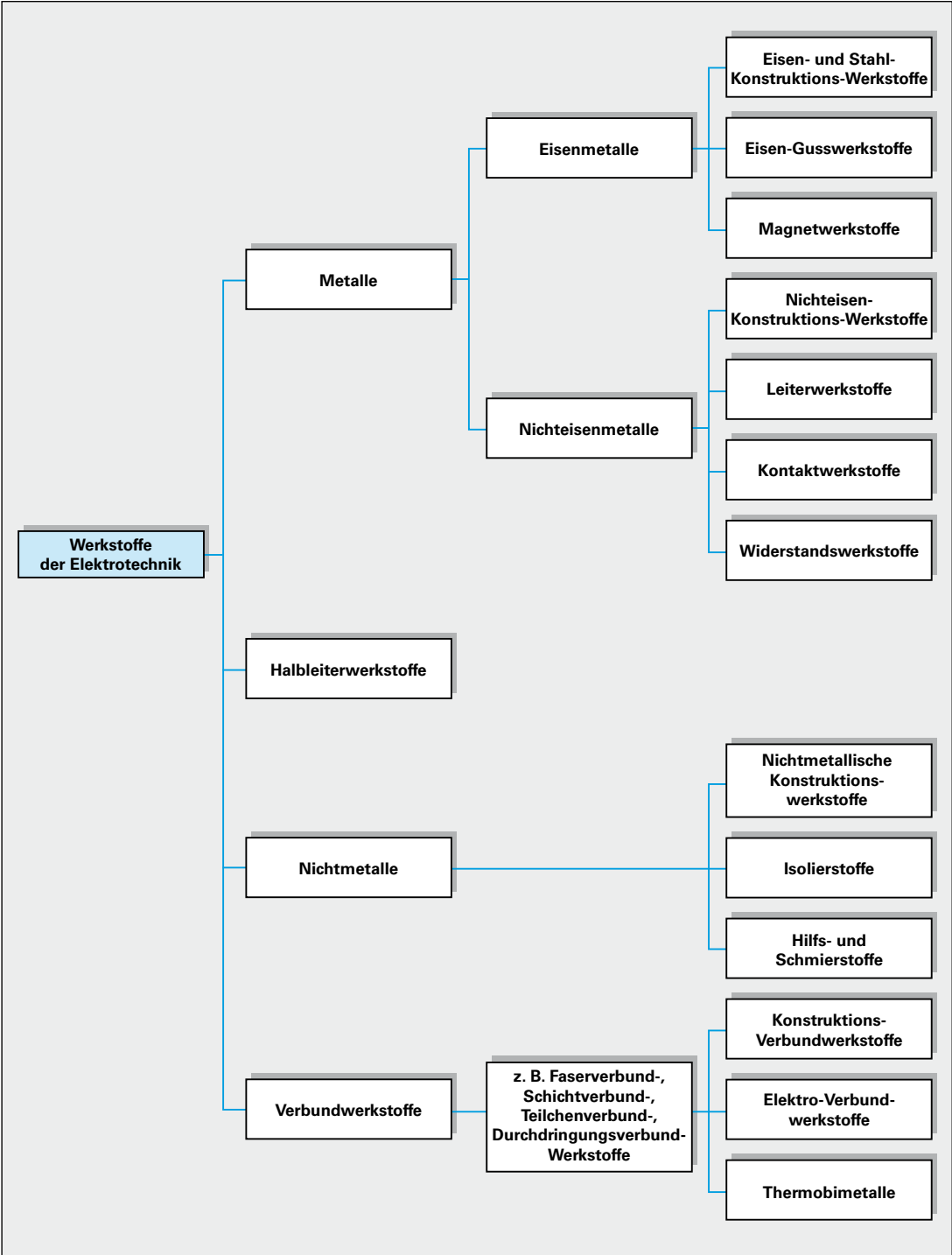


Bild: Spezifischer elektrischer Widerstand der Werkstoffe

Die Werkstoffe lassen sich nach Stoffgruppen in Metalle, Nichtmetalle, Halbleiterwerkstoffe und Verbundwerkstoffe unterteilen. Kombiniert man die Einteilung nach Stoffart und Verwendung, so erhält man eine Gesamtübersicht über die Werkstoffe der Elektrotechnik (**Übersicht**).



Übersicht: Werkstoffe der Elektrotechnik

Die Normung von Werkstoffen und Erzeugnissen

Normen haben im handwerklichen und industriellen Bereich eine große Bedeutung. Der überwiegende Teil der Werkstoffe und Werkstoffzeugnisse sind entweder direkt genormt oder unterliegen in der Zusammensetzung, den Abmessungen und Qualitätsanforderungen genormten Maßstäben.

Die Normung hat die Aufgabe, Vereinheitlichungen für Werkstoffe und deren Erzeugnisse (Halbzeuge), Massenteile, z. B. Schrauben, und Verfahren verbindlich festzulegen. Sie fördert die Rationalisierung in der Technik und Wirtschaft, schafft Qualitätsstandards und dient der Arbeits- und Planungssicherheit.

Erfüllt ein Werkstoff, ein Erzeugnis oder ein Verfahren die in der Norm vorgeschriebenen Anforderungen, so liegt eine Normenkonformität¹ vor.

Werkstoffe, Erzeugnisse oder Verfahren, die normenkonform sind, kennzeichnet man mit einem Zeichen (**Bild 1**). Es enthält z. B. das DIN-Symbol² oder das VDE³-Zeichen.

Normung gibt es auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene (**Übersicht**).

Die vom Deutschen Institut für Normung erarbeiteten Normen werden als DIN-Normen bezeichnet (deutsche Normen). Die EN-Norm ist eine europäische Norm. Sie wird vom europäischen Komitee für Normung (CEN⁴) erstellt und nach Prüfung durch die einzelnen europäischen Länder als nationale Norm übernommen. Für Deutschland heißt diese übernommene europäische Norm dann DIN-EN-Norm. Die nationalen Normen Europas, wie z. B. in Deutschland die DIN-Normen, werden im Laufe der Zeit von den DIN-EN-Normen abgelöst. Die internationalen ISO-Normen werden von der „International Organization for Standardization“ herausgegeben und haben weltweite Bedeutung. Werden sie in Deutschland Bestandteil der Normen, so heißen sie DIN-ISO-Normen.

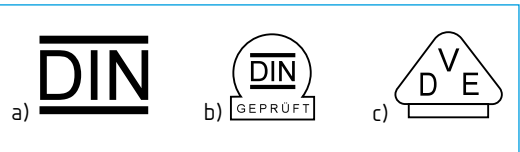
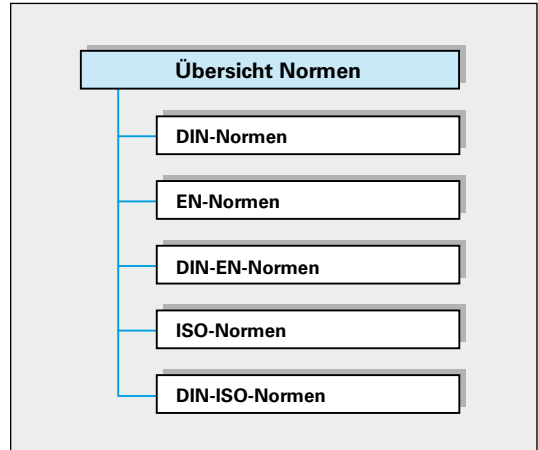


Bild 1: Norm-Kennzeichnungen (Auswahl)



Übersicht: Verschiedene Normen

- Baustahl: S235JR (St 37-2)
- Nichtrostender Stahl: X5CrNiMo 18-10
- Aluminiumlegierung: EN AW-5754 [AlMg3]
- Elektro-Kupfer: E-Cu58

Bild 2: Beispiele für Werkstoffkurzbezeichnungen

- 1.0037: Baustahl S235JR (St 37-2)
- 2.0061: Elektro-Kupfer E-Cu58
- 3.3207: Elektroaluminium
EN AW-6101B [AlMgSi(B)]

Bild 3: Beispiele für Werkstoffnummern

Normgerechte Bezeichnung von Werkstoffen

Ein großer Teil der Werkstoffe wird heute schon nach der europäischen Norm DIN EN bezeichnet, z. B. die Stähle nach DIN EN 10127 (**Bild 2**). Ein Stahl heißt z. B. S235JR. Häufig wird noch der alte Kurzname nach DIN in Klammern gesetzt, z. B. S235JR (St 37-2). Für die noch nicht auf die europäischen Normen umgestellten Werkstoffe gelten weiterhin die bislang gültigen Kurznamen gemäß den gültigen DIN-Normen.

Außerdem gibt es eine Kennzeichnung der Werkstoffe durch Nummern, z. B. für Stähle nach DIN EN 10 027. Die Werkstoffnummer besteht aus fünf oder sieben Ziffern und ist durch einen Punkt unterteilt (**Bild 3**).

¹ von con (lat.) = mit, zusammen und forma (lat.) = Form, Gestalt; Konformität = Übereinstimmung

² DIN, Abk. für: Deutsches Institut für Normung

³ VDE, Abk. für: Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V.

⁴ Abk. für Comité Européen de Normalisation (franz.)

2 Naturwissenschaftliche Grundlagen der Werkstoffkunde

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Körper und Stoff

Physikalische Größen

Die messbaren Eigenschaften eines Körpers, eines Zustands oder Vorgangs nennt man **physikalische Größen**, z. B. die Länge, die Masse oder die Zeit. Eine physikalische Größe setzt sich aus einer Zahl und einer Einheit zusammen:

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

Beträgt z. B. die Länge (Formelzeichen l) eines Werkstücks 0,6 Meter (Einheitenzeichen m), schreibt man statt Länge = 0,6 mal 1 Meter kurz: $l = 0,6 \text{ m}$. Zahlenwert und Einheit sind also durch Multiplikation miteinander verknüpft.

Alle physikalischen (und chemischen) Einheiten lassen sich auf nur 7 Grundeinheiten zurückführen (**Tabelle 1**). Sie heißen nach dem „Gesetz über die Einheiten im Messwesen“ auch SI¹-Basiseinheiten. Alle übrigen Einheiten sind aus den Basiseinheiten abgeleitet.

Einige der zusammengesetzten Einheiten tragen einen besonderen Namen. Diese Einheiten würden entweder zu unübersichtlich oder ein besonderer Einheitenname hat sich schon lange eingebürgert. So lautet z. B. die Einheit der Leistung eigentlich $\text{m}^2\text{kg/s}^3$. Man bezeichnet sie aber kurz als „Watt“ (Einheitenzeichen W).

Die Einheitenzeichen schreibt man groß, wenn sie von einem Eigennamen abgeleitet sind, z. B. Hertz (Hz), Siemens (S), Ohm (Ω) oder Volt (V). In allen anderen Fällen schreibt man sie klein, z. B. Meter (m), Sekunde (s) oder Liter (l).

Tabelle 1: SI-Basisgrößen und -einheiten

Basisgröße	Formelzeichen	SI-Einheit
Länge	l	Meter (m)
Masse	m	Kilogramm (kg)
Zeit	t	Sekunde (s)
elektrische Stromstärke	I	Ampere (A)
thermodynamische Temperatur	T	Kelvin (K)
Stoffmenge	n	Mol (mol)
Lichtstärke	I_v	Candela (cd)

Tabelle 2: Einheitenvorsätze (SI-Vorsätze)

Vorsatz	Vorsatzzeichen	Faktor
Für große Zahlenwerte		
Deka	da	10^1
Hekto	h	10^2
Kilo	k	10^3
Mega	M	10^6
Giga	G	10^9
Tera	T	10^{12}
Peta	P	10^{15}
Exa	E	10^{18}
Für kleine Zahlenwerte		
Dezi	d	10^{-1}
Zenti	c	10^{-2}
Milli	m	10^{-3}
Mikro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Piko	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}

Einheitenvorsätze für dezimale Teile und Vielfache

Vorsätze vor den Einheiten für dezimale Teile oder für dezimale Vielfache (**Tabelle 2**) ergeben bei der Angabe von Größen zweckmäßige und begreifbare Zahlenwerte zwischen 0,1 und 1 000, also z. B. 257,3 km statt 257 300 m oder 34 ns statt 0,000 000 034 s.

Vorsätze und Vorsatzzeichen darf man nur zusammen mit einem Einheitennamen und mit dem Einheitenzeichen verwenden. Eine Längeneinheit 1μ (ein „Mü“) z. B. gibt es nicht, man muss $1 \mu\text{m}$ (ein Mikrometer) sagen.

Das Vorsatzzeichen wird ohne Zwischenraum vor das Einheitenzeichen geschrieben, weil beide zusammen eine neue Einheit bilden. Ein Exponent am Einheitenzeichen gilt auch für das Vorsatzzeichen, z. B. $1 \text{ mm}^3 = 1 (\text{mm})^3 = 1 \cdot (10^{-3} \text{ m})^3 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$.

¹ Système International d'Unités (franz.) = Internationales System der Einheiten

Mehrere Vorsätze dürfen nicht kombiniert werden; z.B. für $1 \cdot 10^{-12}$ F muss man 1 pF schreiben, 1 μ F ist falsch. Auf die SI-Basiseinheit 1 kg (Kilogramm) kann man daher keine Vorsätze anwenden, sondern nur auf die Einheit g (Gramm). Es heißt also 1 mg und nicht 1 μ kg.

Sind bei Produkten von Einheiten Verwechslungen mit Vorsatzzeichen möglich, so schreibt man einen Malpunkt zwischen die Einheiten; z.B. $1 \text{ m} \cdot \text{N}$ (1 Meternewton) anstelle von 1 mN (1 Millinewton). Verwechslungen vermeidet man noch besser mit 1 Nm (1 Newtonmeter) für das Kraftmoment.

Grundeigenschaften der Körper

Jeder Körper besteht aus Stoff, auch Materie¹ oder Substanz² genannt, z.B. aus Stahl, Holz, Glas, aus einem Kunststoff, Gummi, Wasser oder Luft. Ein Körper beansprucht Raum und besitzt eine Masse.

Volumen: Den Rauminhalt (das Volumen V) kann man als Längen in den drei Richtungen des Raumes messen, die senkrecht aufeinander stehen. Diese Längen haben die Einheit Meter. Das Volumen besitzt daher als Einheit $\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{m}$, also ein Kubikmeter (m^3). Die Volumeneinheit ist als der Rauminhalt eines Würfels mit 1 m Kantenlänge festgelegt. Für Flüssigkeiten und Gase verwendet man die Einheit Liter, wobei 1 Liter so groß ist wie 1 Kubikdezimeter ($1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$).

Das Volumen regelmäßiger Körper, z.B. Quader, Prisma oder Zylinder, kann man aus ihren Abmessungen berechnen. Länge, Breite und Höhe sind Längen. Man misst sie z.B. mit einem Maßstab oder genauer mit einem Messschieber. In allen Fällen wird eine Strecke mit der Längeneinheit verglichen.

Messen bedeutet das Vergleichen mit einer Einheit.

Die Einheit der Länge, das Meter, ist eine SI-Basiseinheit. Physikalisch exakt ist sie festgelegt als die Strecke, die das Licht in $1/299\,792\,458$ Sekunden im Vakuum zurücklegt (17. CGPM³ 1983).

Körper können einander verdrängen. Taucht man z.B. einen Stein unregelmäßiger Form vollständig in Wasser, verdrängt er gerade so viel von der Flüssigkeit, wie sein Volumen ausmacht.

Masse: Jeder Körper besitzt Masse (Formelzeichen m), eine weitere Grundeigenschaft aller Materie. Masse äußert sich in zwei Formen: einmal als schwere und einmal als träge Masse.

Die große Masse der Erde zieht jeden Körper an, der sich auf der Erdoberfläche oder in Erdnähe befindet. Diese Eigenschaft nennt man **Schwere** (Gravitation⁴).

Ändert sich der Bewegungszustand eines Körpers, wird also seine Geschwindigkeit oder seine Bewegungsrichtung verändert, setzt der Körper dieser Änderung einen Widerstand entgegen. Die **Trägheit**, auch als Beharrungsvermögen bezeichnet, wird durch die Masse verursacht.

Die Einheit der Masse ist das Kilogramm ($1 \text{ kg} = 10^3 \text{ g}$).

Genau die Masse von 1 kg hat der internationale Kilogramm-Prototyp⁵, ein Zylinder von 39 mm Durchmesser und 39 mm Höhe aus einer Platin-Iridium-Legierung, der in Sèvres bei Paris aufbewahrt wird.

Die Masse eines Körpers misst man durch Vergleich mit der Masse von Wägestücken auf einer Waage, z.B. einer Balkenwaage (**Bild**). Auch für das Gewicht einer Warenmenge verwendet man die Einheit Kilogramm als Ergebnis einer Wägung.

Neben dem Kilogramm sind als weitere Einheiten der Masse die Tonne ($1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg} = 1 \text{ Mg}$) und das metrische Karat ($1 \text{ Karat} = 1 \text{ Kt} = 0,2 \text{ g}$) in Gebrauch. In der Atomphysik und in der Chemie benutzt man die Masseneinheit: $1 \text{ u} = 1,660\,565\,5 \cdot 10^{-24} \text{ g}$.

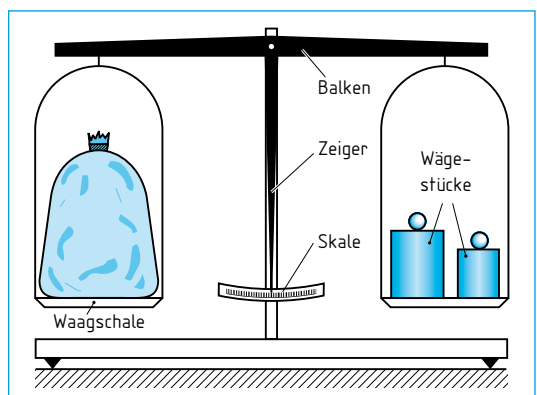


Bild: Balkenwaage

¹ materia (lat.) = Stoff

² substantia (lat.) = Wesenheit, Bestand

³ Conférence Générale des Poids et Mesures (franz.) = Generalkonferenz für Maß und Gewicht

⁴ gravitas (lat.) = Schwere

⁵ Vorbild, Muster von protos (griech.) = der Erste und typus (lat.) = Gepräge, Muster

Dichte: Aus der Masse und dem Volumen eines Körpers ergibt sich eine seiner kennzeichnenden Eigenschaften: seine Dichte (**Formel 1**).

Die Einheiten der Dichte sind von den SI-Basiseinheiten abgeleitet: Für feste Stoffe gibt man die Dichte in kg/m^3 bzw. kg/dm^3 oder g/cm^3 an ($1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3 = 10^{-3} \text{ kg/m}^3$).

Für Flüssigkeiten verwendet man kg/l oder g/ml und für Gase g/l : ($1 \text{ g/l} = 10^{-3} \text{ kg/dm}^3$).

Allgemein versteht man unter Dichte das Verhältnis einer physikalischen Größe zum Volumen, z. B. in der Elektronik die Raumladungsdichte (= elektrische Ladung / Volumen). Am häufigsten rechnet man mit der Massendichte (**Tabelle**), kurz nur **Dichte** geheißen: $\rho = \text{Masse} / \text{Volumen}$.

Besondere Dichte-Benennungen: Die **Normdichte** eines Gases ist die Dichte (meist in g/l) bei Normbedingungen, d.h. bei einer Temperatur von 0°C und einem Druck von $1\,013,25 \text{ mbar}$ (= $101\,325 \text{ Pa}$). Unter der **Rohdichte** eines porösen Stoffes versteht man den Quotienten aus Masse und Volumen, das die Hohlräume mit einschließt. Ähnlich spricht man von der **Schüttdichte**, z. B. bei einer Ladung Kies. Die **relative Dichte**, d. h. das Verhältnis der Dichte ρ eines Stoffes zur Dichte ρ_0 eines Bezugstoffes, wird nur noch bei Gasen benutzt. Als Bezugsdichte wählt man häufig die Dichte der trockenen Luft im Normzustand $\rho_L = 1,293 \text{ g/l}$.

Aggregatzustände: Je nach Druck und Temperatur ist ein Körper fest, flüssig oder gasförmig. Diese Zustandsform, in der sich der Körper befindet, nennt man seinen **Aggregatzustand**¹ (**Übersicht**).

Feste Körper haben eine feste, eindeutige Form und ein bestimmtes Volumen. Ihre kleinsten Teile sind entweder ungeordnet (amorph²) oder regelmäßig angeordnet (kristallin).

Flüssigkeiten haben keine feste Gestalt, sondern passen sich der Form des jeweiligen Gefäßes an, besitzen aber ein konstantes Volumen. Die Teilchen der Flüssigkeit lassen sich sehr leicht verschieben. Dadurch nehmen sie die Form des Gefäßes an und bilden durch die Erdgravitation eine horizontale Oberfläche.

Gase wollen sich ausdehnen und nehmen Form und Volumen des Gasbehälters an.

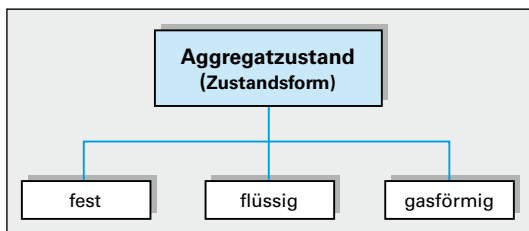
Den Molekülen eines Gases kann man ihre äußere Elektronenhülle wegnehmen, wenn man viel Energie zuführt, z. B. durch eine Gasentladung. Die Teilchen zerfallen in positiv geladene Ionen und freie Elektronen. Das Gas ist dann in einem **Plasmazustand**, der oft auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet wird. Das Gasplasma besitzt eine hohe elektrische Leitfähigkeit. Das Plasma erzeugt man z. B. in Gasentladungslampen oder mit Lichtbögen. Das Magnetfeld, das sich bei der Entstehung des Plasmas bildet, schnürt es zu einem engen Schlauch zusammen.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

ρ (rho) Dichte
 m Masse
 V Volumen

Tabelle: Massendichte einiger Stoffe

Stoff	Dichte in g/cm^3
Kork	0,2
Holz	0,5 ... 1,2
Aluminium	2,70
Stahl	7,86
Kupfer	8,96
Silber	10,50
Blei	11,34
Gold	19,30
Alkohol	0,789
Wasser (bei 4°C)	1,00
Erdöl	1,65... 1,02
Quecksilber	13,55
Wasserstoff	0,000 089
Luft (bei 1013 mbar)	0,001 293



Übersicht: Aggregatzustände

Wiederholungsfragen

- 1 Zählen Sie die sieben SI-Basisgrößen der Physik und Chemie auf.
- 2 Was versteht man unter zusammengesetzten Einheiten physikalischer Größen?

3 Wozu dienen die Einheitenvorsätze für dezimale Teile und Vielfache?

4 Was versteht man unter der Trägheit eines Körpers?

5 Wodurch unterscheiden sich die Aggregatzustände der Materie?

¹ von aggregatus (lat.) = das Zu- oder Beigesellte

² formlos, gestaltlos; von a- (griech.) = nicht und morphe (griech.) = Gestalt

2.1.2 Bewegung der Körper (Bewegungslehre)

Ein Körper ist in **Bewegung**, wenn er in einer bestimmten Zeit seinen Ort gegenüber der ruhenden Umgebung verändert, z.B. eine fahrende Lokomotive gegenüber den stillstehenden Schienen. Neben der Beschreibung und Messung seiner Bahn, auf der sich der Körper bewegt, gehört das genaue Messen der **Zeit** der Bewegung zu ihrer exakten Untersuchung.

Uhren messen die Zeit. Mit ihnen kann man Zeitpunkte und Zeitabstände bestimmen. Als Zeitmaß dienen periodische¹ Vorgänge, z.B. die Schwingungen eines Pendels oder eines Quarzkristalls.

Die SI-Basiseinheit der Zeit ist die **Sekunde**. Sie dauert 9 192 631 770 Perioden einer bestimmten Strahlung von Cäsium-Atomen (¹³³Cs).

Für größere Zeitspannen verwendet man die Minute (min), die Stunde (h), den Tag (d) und das Gemeinjahr (a) als Einheit (**Tabelle 1**), für kurze die Sekunde (s) mit Vorsätzen, z. B. ms oder μ s.

Ein **Zeitabstand** von 2,805 Stunden wird als 2 h 48 min 18 s geschrieben, der **Zeitpunkt** 7 Uhr 15 Minuten 6 Sekunden als 7^h 15^{min} 6^s.

Die Bewegungslehre (Kinematik²) teilt die Bewegungen in mehrere Bewegungsformen und Bewegungsarten ein (**Tabelle 2**).

Geradlinig gleichförmige Bewegung: Ein Körper bewegt sich gleichförmig, wenn er in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurücklegt. Kennzeichen dieser Bewegung ist die **Geschwindigkeit**. Bei geradlinig gleichförmiger Bewegung berechnet man die Geschwindigkeit v aus dem zurückgelegten Weg s geteilt durch die dafür benötigte Zeit t (**Formel 1**).

Die abgeleitete SI-Einheit der Geschwindigkeit³ ist $[v] = \text{m/s}$. Bei dieser Bewegung bleibt die Geschwindigkeit stets gleich (**Bild**).

Für die Angabe von Fahrzeuggeschwindigkeiten benutzt man auch Kilometer je Stunde (km/h): $1 \text{ km/h} = 5/18 \text{ m/s} = 0,277 \dots \text{ m/s}$, und für überschallschnelle Flugzeuge das Mach (M). Mach (oder Machzahl) ist das Verhältnis der Geschwindigkeit des Flugkörpers zur Schallgeschwindigkeit in derselben Luft: $1 \text{ M} = 340 \text{ m/s} = 1 \text{ 200 km/h}$.

Gleichförmig beschleunigte Bewegung: Bei einer gleichförmig **beschleunigten** Bewegung vergrößern sich die in gleichen Zeitabständen zurückgelegten Wege (Bild), die Geschwindigkeit nimmt also stetig zu. Verkürzen sich dagegen die Wege in gleichen Zeitintervallen, nennt man eine solche Bewegung **verzögert**. Für den gesamten Ablauf der Bewegung kann man aus dem ganzen zurückgelegten Weg und der dafür nötigen Zeit eine **Durchschnittsgeschwindigkeit v** berechnen: $v = s/t$. Dabei macht es keinen Unterschied, ob die Bewegung beschleunigt oder verzögert ist, oder ob sie sich aus beschleunigter, gleichförmiger und verzögerter Bewegung zusammensetzt. Eine längere Autofahrt z. B. ist in verschiedene Bewegungsarten unterteilt.

Tabelle 1: Zeiteinheiten

Name	Einheitenzeichen	Erklärung
Minute	min	1 min = 60 s
Stunde	h	1 h = 60 min
Tag	d	1 d = 24 h
Normaljahr	a	1 a = 365 d

Tabelle 2: Bewegungsformen und -arten

Bewegungsform	Bewegungsart
geradlinige Bewegung	gleichförmige Bewegung
krummlinige Bewegung	beschleunigte Bewegung
periodische Bewegung	verzögerte Bewegung

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} \quad v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

v Geschwindigkeit s Weg t Zeit

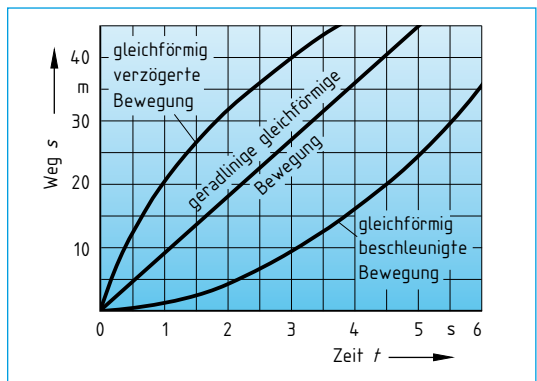


Bild: Weg-Zeit-Diagramm

¹ von periodos (griech.) = das Herumgehen, regelmäßige Wiederkehr

² von kinema (griech.) = Bewegung

³ $[v]$ = Einheit von v (der Geschwindigkeit)

Eine genauere Beschreibung des jeweiligen Bewegungszustandes liefert die **Momentangeschwindigkeit** für jeden Zeitpunkt der Bewegung (Bild 1). Zu ihrer Berechnung greift man eine genügend kleine Wegstrecke¹ Δs heraus und misst den zugehörigen Zeitabschnitt Δt .

Die zeitliche Änderung der Geschwindigkeit nennt man **Beschleunigung** a (Formel 1). Eine verzögerte Bewegung drückt man durch eine negative Beschleunigung aus. Die SI-Einheit der Beschleunigung ist $(\text{m/s})/\text{s} = \text{m/s}^2$.

Bleibt während einer Bewegung die Beschleunigung a konstant, spricht man von einer **gleichmäßig beschleunigten Bewegung**. Gleichmäßig beschleunigt wird z. B. ein Körper im freien Fall. Hierbei erteilt die Erdanziehung jedem Körper eine Fallbeschleunigung (Formelzeichen g) von durchschnittlich $g = 9,806\,65 \text{ m/s}^2$. Die Fall- oder Erdbeschleunigung hängt auch vom Ort ab. Am Äquator ist die Fallbeschleunigung etwas geringer ($g = 9,78 \text{ m/s}^2$) als an den Polen ($g = 9,83 \text{ m/s}^2$).

Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist die Durchschnittsgeschwindigkeit nur halb so groß wie die Endgeschwindigkeit (Bild 1). Daraus erhält man das Weg-Zeit-Gesetz (Formel 2).

Kreisbewegungen: Die Geschwindigkeit, mit der ein Körper auf einer Kreisbahn umläuft (Bild 2), nennt man seine **Umfangsgeschwindigkeit**.

Die Kreisbewegung ist gleichförmig, wenn der Körper oder ein Massepunkt am Umfang z. B. einer Scheibe in gleichen Zeiten gleiche Strecken zurücklegt (Formel 3). Die Anzahl der Umdrehungen je Zeiteinheit heißt **Drehfrequenz** f (Einheit $1/\text{s}$ oder Hertz – Hz), früher auch als Drehzahl bezeichnet. Das Produkt $2 \cdot \pi \cdot f$ kann man zu einer neuen Größe zusammenfassen, der **Winkelgeschwindigkeit** ω . Auf einer krummlinigen Bahn wird ein Körper ebenfalls „beschleunigt“, auch wenn er sie mit gleich bleibender Geschwindigkeit durchläuft. Die **Änderung der Bewegungsrichtung** entspricht nämlich einer Beschleunigung. Bewegt sich ein Körper z. B. auf einer Kreisbahn mit Radius r und gleich bleibender Umfangsgeschwindigkeit v , wird er zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt (**Radialbeschleunigung** a_r , Formel 4).

Zusammengesetzte Bewegungen: In der Technik sind einfache Bewegungen selten, meist überlagern sich mehrere Bewegungen. Durchquert z. B. ein Ruderboot einen Fluss, bemüht sich der Ruderer, das Boot auf kürzestem Wege zum gegenüberliegenden Ufer zu bewegen. Das strömende Wasser treibt aber auch das Boot flussabwärts.

Die resultierende Bewegung setzt sich aus zwei Bewegungen unterschiedlicher Richtung zusammen.

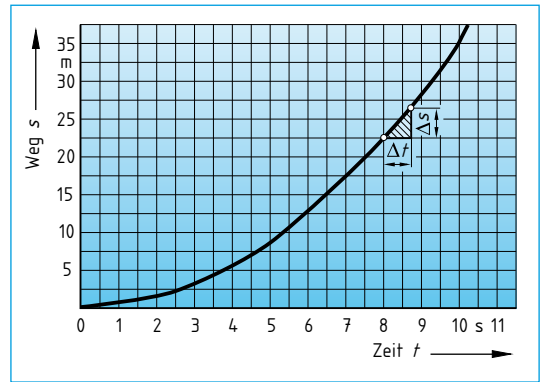


Bild 1: Momentangeschwindigkeit

$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1)$	a Beschleunigung Δv Geschwindigkeitsänderung Δt Zeitänderung
---	--

$s = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (2)$	s Weg a Beschleunigung t Zeit
---------------------------------------	---

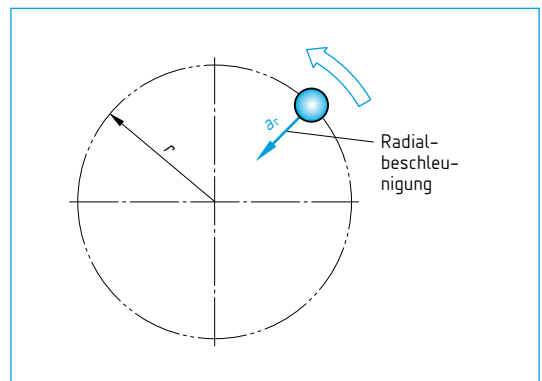


Bild 2: Kreisbewegung

$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r$ $v = \omega \cdot r \quad (3)$	v Umfangsgeschwindigkeit f Drehfrequenz r Radius
--	--

$a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 \cdot r \quad (4)$	ω Winkelgeschwindigkeit a_r Radialbeschleunigung
--	--

¹ Δ (Delta) ist das Zeichen für eine Differenz, also $\Delta s = s_2 - s_1$

Das Boot bewegt sich im Ergebnis in einer bestimmten Zeit, z.B. in 1 s, bis zu einem Ort, der auch erreicht würde, wenn die beiden Bewegungen nacheinander in je 1 s erfolgten (**Bild 1**).

Überlagerungsprinzip: Führt ein Körper mehrere Teilbewegungen gleichzeitig aus, überlagern sich diese Bewegungen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Die Teilgeschwindigkeiten zeichnet man in Betrag und Richtung als Pfeillinien, z.B. im Maßstab 1 cm $\hat{=}$ 1 m/s. Dann lassen sich diese Geschwindigkeiten geometrisch addieren (**Bild 2**).

Diese Art der geometrischen Addition gilt auch für das Zusammensetzen von Beschleunigungen. Für die zeichnerische Lösung benutzt man dabei z.B. einen Maßstab von 1 cm $\hat{=}$ 1 m/s².

Ein gutes Beispiel für zusammengesetzte Bewegungen ist der waagrechte Wurf (**Bild 3**). Ein Körper (Punkt P) wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_x waagrecht weggeschleudert. Er behält diese Geschwindigkeit bei, wenn man die Luftreibung vernachlässigt. Auf die Masse wirkt gleichzeitig die Erdbeschleunigung nach unten, in y-Richtung. Der Körper bewegt sich also waagrecht mit der Geschwindigkeit $v_x = x/t$, und senkrecht nach unten legt er den Weg $y = g \cdot t^2/2$ zurück. Mit $t = x/v_x$ ergibt sich $y = g \cdot x^2/(v_x^2 \cdot 2)$, also $y = [g/(2 \cdot v_x^2)] \cdot x^2$. Dies ist die Gleichung einer Parabel.

Weitere Beispiele für zusammengesetzte Bewegungen sind senkrechter und schräger Wurf, die Berechnung der ballistischen¹ Bahn von Geschossen oder von Raketen.

Das Überlagerungsprinzip (Superpositionsprinzip) gilt in der Natur z.B. auch für Schwingungen, die sich am gleichen Ort überlagern. Bei Licht- oder anderen elektromagnetischen Wellen treten dann z.B. Interferenzen² auf. Dabei verstärken sich bei gleicher Phase die Wellen und werden bei entgegengesetzter Phase geschwächt.

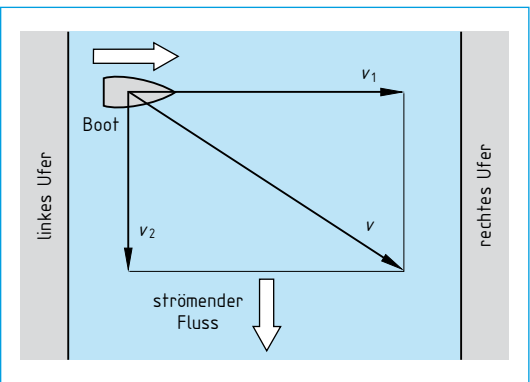


Bild 1: Zusammengesetzte Bewegungen

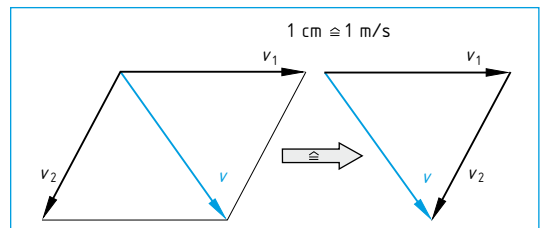


Bild 2: Geometrisches Zusammensetzen von Teilbewegungen

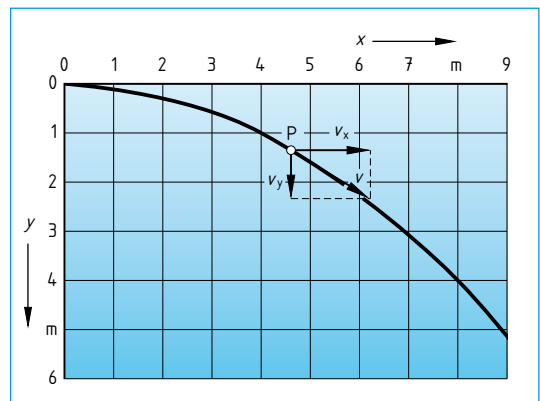


Bild 3: Waagrechter Wurf

Wiederholungsfragen

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1 Welche physikalischen Vorgänge nutzt man zum Messen der Zeit? 2 Wodurch ist eine geradlinig gleichförmige Bewegung gekennzeichnet? 3 Geben Sie Beispiele an für eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung. 4 Erklären Sie den Begriff „Beschleunigung“. 5 Geben Sie das Weg-Zeit-Gesetz der gleichmäßig beschleunigten Bewegung an. | <ol style="list-style-type: none"> 6 Wie verändert die Höhe über der Erde die Fallbeschleunigung? 7 Wie wirkt sich die Strömung eines Flusses auf ein Motorschiff aus, das stromaufwärts fährt? 8 Weshalb ist die gleichförmige Kreisbewegung eine beschleunigte Bewegung? 9 Welche Größen kennzeichnen eine gleichförmige Kreisbewegung? |
|---|---|

¹ von ballista (lat.) = Wurf-, Schleudermaschine; Ballistik = Lehre von den Flugbahnen der Körper

² von inter- (lat.) = dazwischen und ferre (lat.) = tragen; Interferenz = Überlagerung, Beeinflussung

2.1.3 Kräfte

Messen von Kräften: Eine Kraft bewirkt die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers, sie beschleunigt oder verzögert seine Bewegung. Wirkt keine Kraft mehr auf den Körper ein, beharrt er wegen seiner Trägheit im Zustand der Ruhe oder der geradlinig gleichförmigen Bewegung. Eine Kraft kann auch einen Körper verformen, z. B. beim Pressen oder Schmieden. Die Verformung kann bleibend (plastische¹ Verformung) oder nur vorübergehend sein (elastische² Verformung).

Eine Kraft ändert die Geschwindigkeit eines Körpers oder seine Form.

Eine Kraft (Formelzeichen F) kann man mit einem Federkraftmesser bestimmen (**Bild 1**). In diesem Messgerät dehnt die zu messende Kraft eine Schraubenfeder. Die Längendehnung ist der Kraft proportional.

Die Einheit der Kraft ist das Newton³ (N). 1 Newton beschleunigt eine Masse von 1 kg um 1 m/s^2 :
 $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$.

Gewichtskraft (Schwerkraft): Die Erde zieht jeden Körper an. Diese Anziehungskraft verursacht das Gewicht des Körpers.

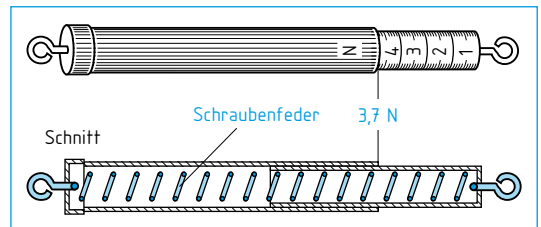


Bild 1: Federkraftmesser

Das Gewicht eines Körpers ist die Kraft, mit der er von der Erde angezogen wird.

Die Erdanziehung beschleunigt jeden Körper im freien Fall mit $9,806 \text{ 65 m/s}^2$ (Norm-Fallbeschleunigung). Eine Masse von 1 kg drückt also mit einer Kraft von $9,806 \text{ 65 N}$ ($\approx 10 \text{ N}$) auf ihre Unterlage.

Kraftrichtung: Eine Kraft hat immer auch eine **Richtung**, in der sie wirkt. Eine physikalische Größe, die durch ihren Betrag und zusätzlich durch ihre Richtung (sowie ihren Richtungssinn) gekennzeichnet ist, nennt man eine **vektorielle Größe**. Den Vektor⁴ kann man durch eine Pfeillinie (**Bild 2**)

veranschaulichen. Für die Zeichnung muss man noch einen Maßstab festlegen, z. B. $1 \text{ cm} \triangleq 5 \text{ N}$. Die Pfeillinie liegt in der Richtung der Kraft und die Pfeilspitze gibt den Richtungssinn an. Der Beginn der Pfeillinie markiert den Angriffspunkt der Kraft. Der Angriffspunkt darf bei einem starren Körper entlang der Wirkungslinie (**Bild 2**) verschoben werden: Dadurch ändert sich die Kraftwirkung nicht.

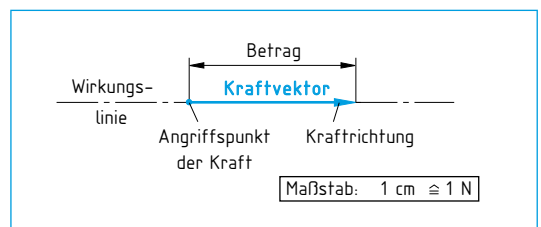


Bild 2: Kraft als Vektor

Jede Kraft hat eine Gegenkraft zur Folge. Ein Stein z. B., der auf der Erde liegt, drückt mit seiner Gewichtskraft auf den Boden und der Erdboden hält mit gleich großer Auflagekraft dagegen.

Zu jeder Kraft entsteht eine Gegenkraft von gleicher Größe, aber entgegengesetzter Richtung.

Zusammensetzen von Kräften: Greifen mehrere Kräfte an einem Körper an, lassen sie sich zu einer Gesamtkraft zusammenfassen. Diese Gesamtkraft nennt man resultierende Kraft oder kurz **Resultierende**⁵. Die Kräfte würden den Körper je nach ihren Richtungen beschleunigen, hielte ihn nicht eine Gegenkraft fest. Deshalb lassen sich Kräfte wie Bewegungen zusammensetzen.

Kraftpfeile kann man vektoriell addieren.

¹ von plastos (griech.) = gebildet, geformt

³ Sir Isaac Newton, 1643 bis 1727

⁵ von résulter (franz.) = sich aus etwas ergeben, die Folge von etwas sein

² von elastos (griech.) = dehnbar, biegsam

⁴ von vector (lat.) = Träger, Fahrer

Die Kraft F kennzeichnet man als vektorielle Größe mit einem Pfeil über dem Formelzeichen (**Bild 1**).

Der resultierende Vektor lässt sich durch Aneinanderreihen der Teilvektoren ermitteln. Umgekehrt kann man eine Kraft in Teilkräfte zerlegen. Durch Kräftezerlegungen bestimmt man z.B. Zug- und Druckkräfte in Maschinenteilen.

Die Gewichtskraft F_G einer Straßenlampe (**Bild 2**) z.B. zerfällt in Teilkräfte (**Komponenten**¹), die als Zugkräfte in den Aufhängeseilen wirken.

Die Seilzugkräfte F_1 und F_2 erhält man zeichnerisch mit Parallelen zu den Seilstücken durch die Pfeilspitze der Gewichtskraft F_G .

Eine Kraft lässt sich in Teilkräfte zerlegen, wenn deren Wirkungslinien bekannt sind.

Kraft und Beschleunigung: Wirkt eine Kraft auf einen frei beweglichen Körper, wird er in die Richtung der Kraft beschleunigt. Die Kraft F ist proportional der Körpermasse m und der Beschleunigung a (**Formel 1**).

Ist die Resultierende aller Kräfte, die auf den Körper einwirken, gleich null, so ist er im Kräftegleichgewicht, d. h., er bleibt in Ruhe oder in geradlinig gleichförmiger Bewegung (Trägheit).

Greift bei einem Körper außerhalb seiner Drehachse eine Kraft an, will er sich drehen. Dieses Drehbestreben nennt man **Drehmoment** (**Bild 3**). Das Drehmoment M nimmt proportional der Größe der Kraft F und mit dem senkrechten Abstand d von der Drehachse zu. Als Einheit des Drehmoments erhält man das Newtonmeter (Nm).

Die **Bahngeschwindigkeit** v der Kreisbahn jedes Punktes außerhalb der Drehachse hängt von der Drehfrequenz f und vom Radius r der Kreisbahn ab: $v = 2 \pi \cdot r \cdot f$.

Bei gleich bleibender Bahngeschwindigkeit, also bei konstanter Drehfrequenz, entsteht eine **gleichförmige Kreisbewegung**. Dabei ändert sich dauernd die Richtung der Geschwindigkeit und daher treten Kräfte auf. Die **Radialkraft** F_r greift am Körper oder an einem Teil davon an und zwingt ihn in die Kreisbahn (**Formel 2**). Zu dieser Radialkraft gehört die **Radialbeschleunigung** $a_r = v^2/r$.

Die Massenträgheit verursacht eine Gegenkraft zur Radialkraft, die **Zentrifugalkraft** F_z (Fliehkraft). Sie ist gleich groß wie die Radialkraft, jedoch entgegengesetzt gerichtet (**Bild 4**).

Zentrifugalkräfte nutzt man z.B. zum Trennen von Flüssigkeiten unterschiedlicher Dichte in Zentrifugen.

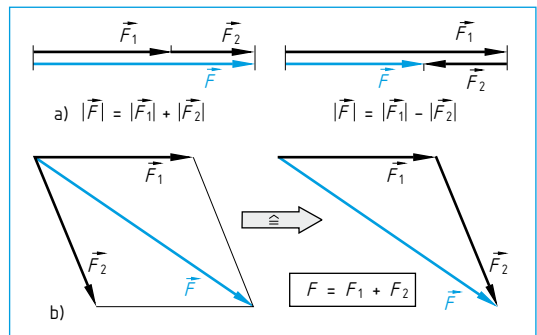


Bild 1: Vektorielle Addition von Kräften
a) in gleicher Wirkungslinie, b) nicht parallel

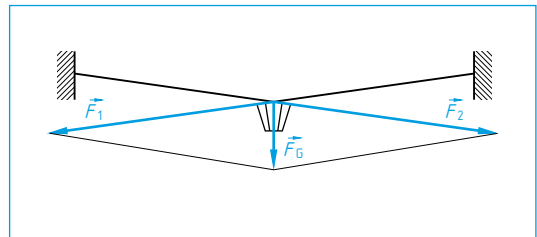


Bild 2: Zerlegung einer Kraft in Seilkräfte

$F = m \cdot a$ (1)	F Kraft
$[F] = \text{N} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$	m Masse
	a Beschleunigung

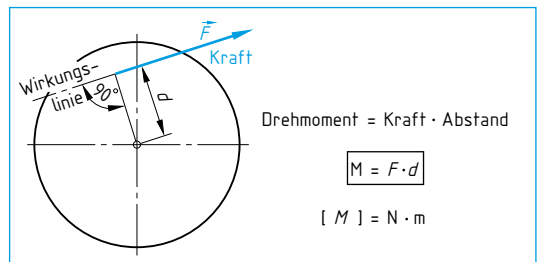


Bild 3: Drehmoment

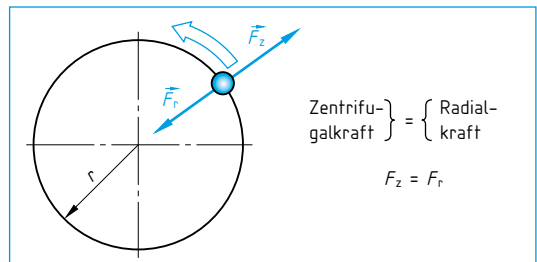


Bild 4: Zentrifugalkraft (Fliehkraft)

$F_r = \frac{m \cdot v^2}{r}$ (2)	F_r Kraft
	m Masse
	v Bahngeschwindigkeit
	r Radius

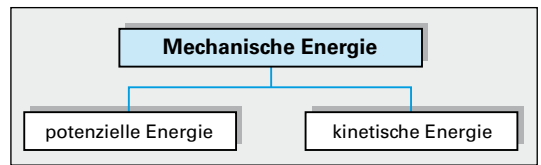
¹ von componere (lat.) = zusammensetzen

Bei einer Kreiselpumpe versetzt ein Schaufelrad die Flüssigkeit in schnelle Rotation. Die Fliehkraft treibt sie nach außen, wodurch in Achsennähe ein Unterdruck entsteht.

Die Drehfrequenz einer Schleifscheibe darf eine Höchstgrenze nicht überschreiten, weil sonst die Fliehkräfte die Scheibe zerstören können.

Mechanische Arbeit und Energie: Beim Hochheben z. B. einer Kiste verrichtet man eine Arbeit W , die umso größer ist, je schwerer die Kiste ist und je höher sie angehoben wird (**Formel 1**).

Mechanische Arbeit W wird verrichtet, wenn eine Kraft F längs eines Weges s wirkt.



Übersicht: Mechanische Energieformen

$$W = F \cdot s \quad (1)$$

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

W Mechanische Arbeit
 F Kraft
 s Weg

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2)$$

m Masse
 v Geschwindigkeit

Die **mechanische Arbeit** W wird in Newtonmeter (Nm) gemessen, wie auch das Drehmoment. Diese beiden Größen darf man aber nicht verwechseln: Bei der mechanischen Arbeit wirkt die Kraft in Richtung des Weges, beim Drehmoment jedoch senkrecht zum Hebelarm.

Die hochgehobene Kiste hat **mechanische Energie** gespeichert (**Übersicht**). Man nennt sie Energie der Lage oder **potenzielle¹ Energie**. Energie hat daher dieselbe Einheit wie die Arbeit, mechanische Energie misst man also in Newtonmeter (Nm).

Die Energie eines bewegten Körpers heißt **kinetische² Energie** (Energie der Bewegung). Ein Körper der Masse m und der Geschwindigkeit v besitzt kinetische Energie (**Formel 2**). Die Einheit der kinetischen Energie berechnet sich zu: $[W] = [m \cdot v^2/2] = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot \text{m} = \text{N} \cdot \text{m}$.

Es gibt verschiedene Formen der Energie: mechanische Energie (potenzielle und kinetische), elektrische Energie, chemische Energie, Wärmeenergie, Lichtenergie und Kernenergie (Energie des Atomkerns).

Energieerhaltungssatz: Energie ist Arbeitsvermögen. Jede Energieform kann man in eine andere umwandeln. Dabei geht keine Energie verloren. Allerdings kann Energie auch nicht aus dem Nichts entstehen (Unmöglichkeit des perpetuum mobile³).

Einfache Maschinen

Schiefe Ebene: Auf einer gegen die Waagrechte geneigten Ebene lässt sich eine schwere Last F_G mit kleiner Kraft F hochschieben (**Bild**). Vernachlässigt man dabei die Reibung, ist die an der schiefen Ebene aufgewendete Arbeit $W = F \cdot s$ gleich der Hubarbeit $F_G \cdot h$. Aus $F \cdot s = F_G \cdot h$ kann man die Hangabtriebskraft F berechnen (**Formel 3**). Sie muss beim Hochschieben überwunden werden. Je geringer diese Hangabtriebskraft gegenüber der Last F_G sein soll, desto größer muss der Weg s im Verhältnis zur Höhe h sein.

Anwendungen: Spalten von Werkstoffen mit dem Keil, z. B. mit dem Messer oder einem Beil; Verkeilen von Maschinenteilen; Schrauben (auf einen Zylinder gewickelte schiefe Ebene).

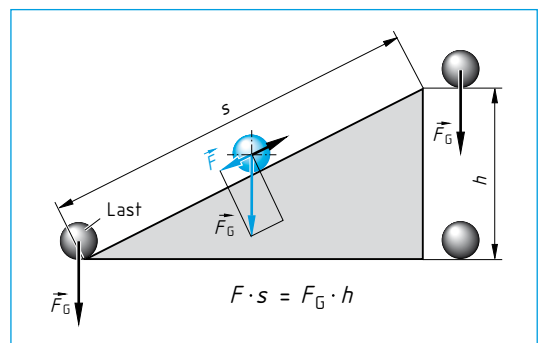


Bild: Schiefe Ebene

$$F = \frac{F_G \cdot h}{s} \quad (3)$$

F Hangabtriebskraft
 F_G Gewichtskraft der Last
 h Höhe der schiefen Ebene
 s Länge der schiefen Ebene

¹ von potens (lat.) = mächtig, kräftig

² von kinema (griech.) = Bewegung

³ von perpetuus (lat.) = ununterbrochen und mobilis (lat.) = beweglich

Hebel: Bei einem Hebel (**Bild 1**) verursacht die Last F_2 über den Lastarm l_2 ein Drehmoment, das z.B. im Uhrzeigersinn gerichtet ist (rechtsdrehendes Moment). Diesem Moment wirkt die Kraft F_1 über den Kraftarm l_1 , entgegen, d.h. ein Drehmoment entgegen dem Uhrzeigersinn (linksdrehendes Moment). Je nachdem, von welcher Seite der Drehachse die Kräfte angreifen, unterscheidet man ein- und zweiseitige Hebel (**Bild 1**). Bei beiden Hebelarten herrscht dann Gleichgewicht, wenn sich die Drehmomente aufheben (**Formel 1**).

linksdrehendes Moment = rechtsdrehendes Moment
Kraft · Kraftarm = Last · Lastarm

Anwendungen: Brechstange, Hebeisen, Schraubenschlüssel, Zange, Schere, Kurbelwelle, Zahnrad sowie bei Rollen oder Flaschenzügen.

Mit Hebeln, schiefen Ebenen oder mit Flaschenzügen kann man zwar Kräfte sparen, aber keine mechanische Arbeit – also keine Energie.

Goldene Regel der Mechanik: Was an Kraft gewonnen wird, geht an Weg verloren.

Reibung: Eine Reibungskraft F_R tritt immer auf, wenn sich zwei Körper berühren und sich relativ zueinander bewegen (**Bild 2**).

Soll ein ruhender Körper in Bewegung gesetzt werden, so versucht ihn die **Haftreibung** daran zu hindern. Ein bewegter Körper muss die **Gleitreibung** überwinden. Auch ein runder Körper, der rollt, wird ein wenig in seiner Bewegung durch die **Rollreibung** gehemmt. Bei gleichem Werkstoff und gleicher Oberflächenbeschaffenheit gilt:

Haftreibung > Gleitreibung > Rollreibung.

Die Reibungskraft F_R hängt von den Werkstoffen und den Oberflächenbeschaffenheiten der aneinander reibenden Körper ab. Ferner ist die Reibungskraft proportional der Kraft, die senkrecht auf die Berührungsfläche einwirkt (Normalkraft F_N). Die Reibungskraft ist aber unabhängig von der Größe der Berührungsfläche.

Ein Proportionalitätsfaktor, die Reibungszahl μ , fasst den Einfluss von Werkstoff und Rauigkeit der Oberfläche zusammen (**Formel 2**). Für Haft-, Gleit- und Rollreibung gibt es unterschiedliche Reibungszahlen (**Tabelle**).

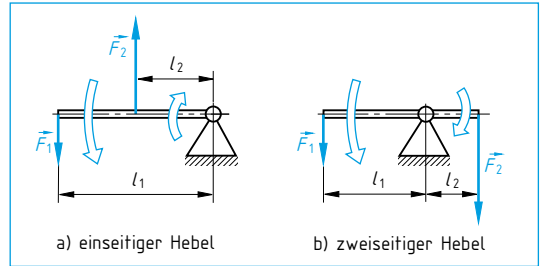


Bild 1: Hebelarten

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2 \quad (1)$$

F_1 Kraft
 F_2 Last
 l_1 Kraftarm
 l_2 Lastarm

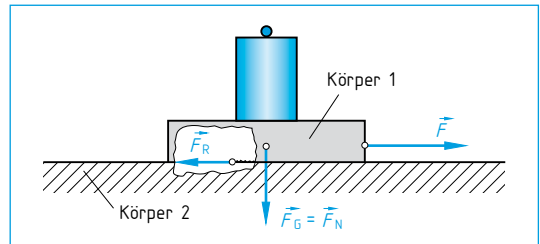


Bild 2: Gleitende Reibung

$$F_R = \mu \cdot F_N \quad (2)$$

F_R Reibungskraft
 μ Reibungszahl
 F_N Normalkraft

Tabelle: Beispiele für Reibungszahlen

Beispiel	Haftreibung	Gleitreibung
Bremsbelag auf Stahl	0,6	0,6
Leder auf Grauguss	0,56	0,28
Polyamid auf Stahl	0,3	0,3
Cu-Sn-Leg. auf Stahl	0,18	0,16
Stahl auf Stahl	0,15	0,1

Wiederholungsfragen

- 1 Welche Wirkungen haben Kräfte?
- 2 Mit welchem Messgerät misst man den Betrag einer Kraft?
- 3 Wodurch unterscheiden sich Masse und Gewicht?
- 4 Welche Wirkungen hat die Erdanziehungskraft?
- 5 Was versteht man unter potenzieller und was unter kinetischer Energie?

- 6 Mit welcher Formel berechnet man die Reibung?
- 7 Vergleichen Sie Haftreibung und Gleitreibung.
- 8 Welche Neigung muss eine schiefe Ebene haben, damit bei gegebener Reibungszahl eine aufgelegte Last sofort gleitet?

2.1.4 Mechanische Beanspruchung der Werkstoffe

Beanspruchungsarten

Kräfte können einen Körper belasten, z. B. ein Bau- oder Maschinenteil, sei es durch Zug oder Druck, durch Biegung, Torsion oder Scherung (**Tabelle**).

Zug, Druck, Biegung, Torsion (Verdrehung) oder Scherung können einen Werkstoff mechanisch beanspruchen (belasten).

Zug: Auf den Werkstoff wirken zwei entgegengesetzt gerichtete, auseinander strebende Kräfte ein.

Druck: Auf einen Körper wirken zwei entgegengerichtete, aufeinander zustrebende Kräfte ein. Bei langen, schlanken Körpern kann dabei außerdem eine Knickbelastung auftreten.

Biegung: Eine Kraft oder ein Kraftmoment quer zur Stabachse will ein Blech oder einen Stab biegen.

Torsion (Verdrehung): Gleich große, aber entgegengerichtete Kräfte (ein Kräftepaar) senkrecht zur Stabachse sind bestrebt, die Querschnitte senkrecht zur Achse zu drehen.

Scherung (Schub): Zwei entgegengerichtete Kräfte versuchen, nebeneinander liegende Querschnitte gegeneinander zu verschieben.

Die Beanspruchung kann auf Dauer **ruhend** (statisch) oder **schwingend** (dynamisch) sein.

Mechanische Festigkeit: Unter **Festigkeit** versteht man die Größe einer mechanischen Spannung (**Formel 1**), die ein Werkstoff aushält, bis er bricht (**Bild 1**). Die SI-Einheit der mechanischen Spannung ist wie beim Druck das Pascal ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$ oder $\text{N/mm}^2 = \text{MPa}$). Je nach Art der Belastung unterscheidet man Zug- und Druckfestigkeit, Schubfestigkeit gegen Scherung und gegen Torsion.

Spröde Werkstoffe brechen unter Belastung, ohne sich vorher nennenswert plastisch zu verformen. **Elastische Werkstoffe** ändern ihre Form unter der Belastung, nehmen aber nach Ende der Krafteinwirkung wieder ihre ursprüngliche Gestalt an (**Bild 3**). Geringfügige Formänderungen sind bei den meisten Metallen und Legierungen der einwirkenden Kraft proportional. Als Folge der mechanischen Spannung wird z. B. ein Stahldraht gedehnt (**Bild 2**). Die **Dehnung** ε_l , auch Längendehnung genannt, ist das Verhältnis der Längenänderung Δl zur ursprünglichen Länge l (**Formel 2**). Die SI-Einheit der Dehnung ist m/m oder $\mu\text{m/m}$, auch % oder ‰.

Bis zur Elastizitätsgrenze eines Werkstoffs gilt das **Hooke'sche¹ Gesetz**.

Tabelle: Beanspruchungsarten

Zug	Druck
Biegung	Torsion
Scherung	

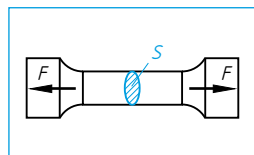


Bild 1: Zugfestigkeit

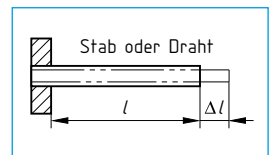


Bild 2: Längsdehnung

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

σ Mechanische Spannung
 F Kraft
 S Querschnittsfläche

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

ε_l Längsdehnung
 Δl Längenänderung
 l ursprüngliche Länge

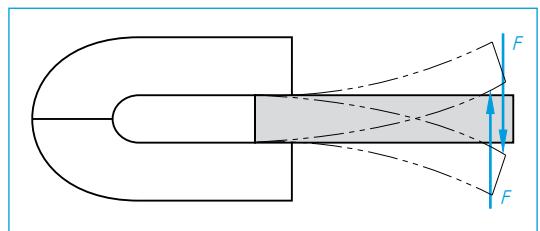


Bild 3: Elastizität

Die in einem Werkstoff herrschende Spannung ist der Dehnung verhältnismäßig (proportional): $\sigma \sim \varepsilon$

¹ Robert Hooke, englischer Physiker, 1635 bis 1703