



EUROPA-FACHBUCHREIHE
Verfahrenstechnik der Kunststoffberufe

Fachkunde

Kunststofftechnik

7. erweiterte und verbesserte Auflage

Erarbeitet von Lehrern an beruflichen Schulen

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

Europa-Nr.: 13802

Autoren:

Die Autoren sind Fachlehrer der technischen Ausbildung.

Fritsche, Cornelia	Dipl.-Ing.-Päd., Studienrätin	Massen
Fritsche, Hartmut	Dipl.-Ing. (FH)	Massen
Gradl, Werner	Ing. BEd.	Wartberg, Österreich
Kolbinger, Jörg	Dipl.-Ing. (FH), Studiendirektor	Windelsbach
Küspert, Karl-Heinz	Fachoberlehrer	Hof
Rudolph, Ulrike	Dipl.-Ing.	Sonneberg
Schmidt, Albrecht	Fachoberlehrer	Selbitz
Schwarze, Frank	Dipl.-Ing.-Päd., Studienrat	Sonneberg

Lektorat: Dennis Erhard Kriwald

Bildentwürfe: Die Autoren, unter Mitwirkung der Arbeitskreise „Fachkunde Metall“, „Rechenbuch Metall“, „Der Werkzeugbau“, „Fenster, Türen und Fassadentechnik“, „Metallbau und Fertigungstechnik Grundbildung“, „Metallbautechnik Fachbildung“, „Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik“, „Steuern und Regeln“, „Qualitätsmanagement“, „Industrielle Fertigung“, „Handbuch der Metallbearbeitung“, „Fachkunde Elektrotechnik“, „Physik für Schule und Beruf“, „Technische Mathematik für Chemieberufe“, „Zerspantechnik Fachbildung“ sowie „Fachkunde Mechatronik“

Fotos: Leihgaben der Firmen (Verzeichnis siehe Seite 700 ff.) sowie Bilder der Autoren

Bildbearbeitung: Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

7. Auflage 2024
Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind im Unterricht einsetzbar, da sie bis auf korrigierte Druckfehler und kleine Änderungen identisch sind.

ISBN 978-3-7585-1183-7

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

© 2024 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar
Umschlaggestaltung: MediaCreativ, G. Kuhl, 40724 Hilden
Umschlagfoto: „ASB-Formteil-Füllstudie“: Werner Gradl, A-4224 Wartberg
Druck: Himmer GmbH, 86167 Augsburg

Vorwort zur 7. Auflage

Die im Verlag **Europa-Lehrmittel** überarbeitete **Fachkunde Kunststofftechnik** ist sowohl für die Ausbildung des Facharbeiternachwuchses in der Kunststofftechnik der Bundesrepublik Deutschland sowie für die Lehrberufe Kunststofftechnik/Kunststoffformgebung in Österreich als auch zur Fort- und Weiterbildung in der Meister- und Techniker Ausbildung konzipiert.

Der Inhalt des Lehrbuches **Fachkunde Kunststofftechnik** untergliedert sich in **19 Kapitel**. Die fachlichen Inhalte der Kapitel sind dem zu vermittelnden Lehrstoff der Lernfelder angepasst. Die Kapitel **1 bis 5** beinhalten die Grundlagenausbildung des 1. Ausbildungsjahres. Die Kapitel **3 bis 5** sind in den Lernfeldern des 2. Ausbildungsjahres zu vermitteln. Überschneidungen zur Grundausbildung sind gewollt und erforderlich. Für die Spezialisierungsrichtungen in der Ausbildung zum Kunststoff- und Kautschuktechnologe/-in im 3. Ausbildungsjahr sind die Kapitel **6 bis 19** zu vermitteln.

Alle Lehrplaninhalte der **Lernfelder**, die sich aus

- der Verordnung über die Berufsausbildung zum Kunststoff- und Kautschuktechnologe / zur Kunststoff- und Kautschuktechnologin vom 22. März 2012,
- der Rahmenlehrplan der Kultusministerkonferenz (31.03.2023) und
- Lehrplänen der einzelnen Bundesländer

ableiten, sind für die Auszubildenden die theoretische Grundlage für den Ausbildungsberuf Kunststoff- und Kautschuktechnologe / Kunststoff- und Kautschuktechnologin.

Basierend auf diesen verbindlichen Vorgaben wurde dieses Fachbuch von erfahrenen Berufsschullehrern aus verschiedenen Einrichtungen erarbeitet.

In der 7. Auflage wurden die Themen Recycling, Rotationsformen (Kapitel 10) und Herstellung von Fördergurten neu hinzugefügt. Die Kapitel „Toleranzen und Passungen“ und „Elektrische Grundlagen“ haben eine umfangreiche Überarbeitung erfahren. Gleichzeitig wurde das Themengebiet „Sonderverfahren zur Verarbeitung von Formmassen“ erweitert (Pressen von Thermoplasten). Des Weiteren wurde eine Vielzahl an Bildern und Zeichnungen ausgetauscht und aktualisiert.

Ergänzend für den theoretischen Unterricht mit praxisorientierten Lernsituationen ist der Einsatz weiterer Fachbücher und Arbeitsunterlagen des Verlages sinnvoll, wie z. B.:

Tabellenbuch Kunststofftechnik, Arbeitsblätter Kunststofftechnik Lernfelder 1 bis 4 und 5 bis 8 und PRÜFUNGSVORBEREITUNG AKTUELL Kunststofftechnik.

Der Verlag und die Autoren der Fachkunde Kunststofftechnik sind für Anregungen und kritische Hinweise, die der Verbesserung der folgenden Auflagen dienen, dankbar. Verbesserungsvorschläge können dem Verlag und somit dem Autorenteam über

lektorat@europa-lehrmittel.de übermittelt werden.

Für die umfangreiche und kompetente Unterstützung danken wir allen Unternehmen, Verbänden und Institutionen, die uns mit zahlreichen praxisbezogenen Unterlagen bei der Erarbeitung des Lehrbuches unterstützt haben.

Interpretation zu Inhalt und der Zuordnung der Lernfelder

Die Gliederung der Inhalte dieses Lehrbuchs wurde auf den Rahmenlehrplan vom 31.03.2023 für Kunststoff- und Kautschuktechnologien im berufsbezogenen Unterricht der Berufsschulen abgestimmt. Die untenstehende Tabelle zeigt die Zuordnung der einzelnen Kapitel zu den Lernfeldern. Die gemeinsamen Grundlagen bei der Ausbildung in der Kunststoff- und Kautschuktechnik stellen die Lernfelder 1 bis 8 in der 1. und 2. Jahrgangsstufe dar. Die Spezialisierung in der 3. Jahrgangsstufe wird durchgeführt in den Fachrichtungen Formteile (**FT**), Halbzeuge (**HZ**), Compound- und Masterbatchherstellung (**CM**), Mehrschicht-Kautschukteile (**MK**), Bauteile (**BT**), Faserverbundstoffe (**FV**) und Kunststofffenster (**KF**).

Lernfelder			Kapitel im Lehrbuch
1. Jahr	1	Werkstoffe nach anwendungsbezogenen Kriterien auswählen	1
	2	Bauelemente aus berufsbezogenen Werkstoffen herstellen	2
	3	Einfache Baugruppen herstellen	3, 7, 16
	4	Anlagenbezogene Steuerungstechniken anwenden	4, 5
2. Jahr	5	Fertigungsvoraussetzungen für die Polymerverarbeitung schaffen	6
	6	Werkzeuge, Maschinen und Zusatzgeräte instand halten	4
	7	Eigenschaften von polymeren Werkstoffen prüfen und analysieren	3
	8	Steuerungstechnische Systeme für die Be- und Verarbeitung von Polymeren anwenden und prüfen	5
FT	9	Formteile durch Spritzgießen herstellen	7, 10
	10	Formteile durch Pressen herstellen	8
	11	Formteile durch Blasformen herstellen	9
	12	Formteile durch Thermoformen herstellen	16
	13	Formteile durch Schäumen herstellen	11
	14	Produkt- und Prozessqualität überwachen und optimieren	3
	9	Halbzeuge durch Extrudieren herstellen	12
HZ/CM	10	Halbzeuge durch Kalandrieren herstellen	13
	11	Halbzeuge durch Beschichten herstellen	14
	12	Compounds und Masterbatches herstellen	6
	13A	Halbzeuge durch Schäumen herstellen	11
	13B	Compounds und Masterbatches herstellen, prüfen und modifizieren	6
	14	Produkt- und Prozessqualität überwachen und optimieren	3
	9	Halbzeuge für Mehrschicht-Kautschukteile herstellen	15
MK	10	Mehrschicht-Kautschukteile durch Pressen herstellen	15
	11	Mehrschicht-Kautschukteile durch ausgewählte Verfahren herstellen	15
	12	Mehrschicht-Kautschukteile prüfen und recyceln	3
	13	Produkt- und Prozessqualität überwachen und optimieren	3
BT	9	Fertigungsvoraussetzungen für Bauteile schaffen	2
	10	Bauteile durch Bearbeiten von Halbzeugen schaffen	16
	11	Produkte durch Fügen schaffen	3, 16
	12	Produkte durch Laminieren schaffen	17
	13	Produkt- und Prozessqualität überwachen und optimieren	3
FV	9	Faserverbundwerkstoffe prüfen und recyceln	3
	10	Bauteile durch Bearbeiten von Faserverbundwerkstoffen schaffen	2, 17
	11	Produkte durch Fügen herstellen	2, 16
	12	Bauteile durch Laminieren schaffen	17
	13	Produkt- und Prozessqualität überwachen und optimieren	3
KF	9	Fertigungsvoraussetzungen für Kunststofffenster schaffen	19
	10	Bauteile durch Bearbeiten von Halbzeugen schaffen	2, 16
	11	Produkte durch Fügen schaffen	2, 16
	12	Bauelemente montieren, demontieren und instand setzen	19
	13	Produkt- und Prozessqualität überwachen und optimieren	3

1 Aufbau und Eigenschaften der Werkstoffe

1.1	Physikalische Grundlagen	10			
1.1.1	Grundbegriffe	10	1.5.1	Einteilung nach der Bildungsreaktion	66
1.1.2	Masse und Gewichtskraft	11	1.5.2	Einteilung nach dem thermischen Verhalten	66
1.1.3	Länge, Fläche, Volumen und Dichte	13	1.6	Wärmeverhalten von Kunststoffen	68
1.1.4	Zeit und Geschwindigkeit	15	1.6.1	Wärmeverhalten von amorphen Thermoplasten	68
1.1.5	Weitere wichtige physikalische Größen	17	1.6.2	Wärmeverhalten von teilkristallinen Thermoplasten	69
1.1.6	Aggregatzustand, Adhäsion, Kohäsion und Kapillarwirkung	20	1.6.3	Wärmeverhalten von Duroplasten	70
1.1.7	Gemenge	22	1.6.4	Wärmeverhalten von Elastomeren	70
1.1.8	Kräfte und ihre Wirkungen	24	1.7	Kunststoffe – Eigenschaften und Anwendungen	72
1.2	Werkstofftechnik	26	1.7.1	Thermoplaste	72
1.2.1	Einteilung der Werkstoffe	26	1.7.2	Polymerblends	86
1.2.2	Eigenschaften der Werkstoffe	28	1.7.3	Elastomere	88
1.2.3	Einteilung der Eisen-Werkstoffe	32	1.7.4	Thermoplastische Elastomere	94
1.2.4	Handelsformen der Stähle	36	1.7.5	Duroplaste	97
1.2.5	Wärmebehandlung von Stählen	37	1.7.6	Biokunststoffe	104
1.2.6	Normung der Eisen-Werkstoffe	38	1.8	Verstärkungsstoffe	108
1.2.7	Nichteisenmetalle	40	1.8.1	Verbundwerkstoffe	108
1.2.8	Verbundstoffe	41	1.8.2	Verstärkungsfasern	109
1.3	Chemische Grundlagen	42	1.8.3	Bauformen der Fasern (Roving)	109
1.3.1	Aufbau der Atome	42	1.8.4	Faserhalbzeuge	110
1.3.2	Das Periodensystem der Elemente	43	1.8.5	Vorimprägnierte Halbzeuge	110
1.3.3	Aufbau der Moleküle	45	1.9	Zuschlag- und Hilfsstoffe	111
1.3.4	Chemische Formeln	48	1.9.1	Anforderungen an Additive	111
1.3.5	Organische Kohlenwasserstoffe	49	1.9.2	Additive für Thermoplaste und Duroplaste	111
1.4	Bildung von Makromolekülen	53	1.9.3	Additive für Kautschuke	113
1.4.1	Vom Erdöl zum Monomer	53			
1.4.2	Vom Monomer zum Polymer	55			
1.4.3	Makromoleküle	60			
1.5	Einteilung der Kunststoffe	66			

2 Fertigungs- und Prüftechnik für Kunststoffe und Metalle

2.1	Grundlagen der Prüftechnik	114			
2.1.1	Grundbegriffe	114	2.2.4	Oberflächenprüfmittel	142
2.1.2	Messmittelgenauigkeit	117	2.2.5	Farb- und Glanzprüfung	145
2.1.3	Messabweichungen	118	2.2.6	Gewichts-, Dichte- und Feuchtigkeitsprüfung	146
2.1.4	Toleranzen und Passungen	119	2.3	Fertigungshauptgruppen	147
2.1.5	Form- und Lagetoleranzen	125	2.3.1	Verfahren der Fertigungshauptgruppen	149
2.1.6	Toleranzen für Kunststoff-Formteile	127	2.4	Vorschriften des Arbeits- und Gesundheitsschutzes	185
2.2	Aufbau, Funktion und Anwendung von Prüfmitteln	130	2.4.1	Sicherheitszeichen EN ISO 7010:2012-10	185
2.2.1	Längenprüfmittel	130	2.4.2	Sicherheitsmaßnahmen	186
2.2.2	Lehren	140	2.5	Umweltschutzvorschriften	187
2.2.3	Winkelprüfgeräte	141	2.6	Industrie 4.0	188

3 Verarbeitung und Prüfung von Kunststoffen

3.1	Qualitätsmanagement	190			
3.1.1	Qualitätsregelkreis	191	3.3	Recycling	201
3.1.2	Methoden des Qualitätsmanagements	191	3.3.1	Werkstoffliches Recycling	202
3.1.3	Statistische Verfahren des Qualitätsmanagements	194	3.3.2	Rohstoffliches Recycling	204
3.2	Qualitätssicherungsmaßnahmen	199	3.3.3	Energetisches Recycling	205
3.2.1	Qualitätssichernde Elemente	199	3.3.4	Biologisches Recycling	206
3.2.2	Lieferantenbewertung	199	3.4	Werkstoffprüfverfahren der Kunststofftechnik	208
3.2.3	Kundenzufriedenheit	199	3.4.1	Kunststofferkennung	209
3.2.4	Produkthaftung	200	3.4.2	Rieselfähigkeit	213
			3.4.3	Roh- und Schüttdichte	215
			3.4.4	Härteprüfungen	217

3.4.5	Feuchteprüfung	219	3.4.8	Schlag- und Kerbschlagprüfung	222
3.4.6	Schmelzindex (MFR)/(MVR) nach DIN EN ISO 1133:2022-10	220	3.4.9	Formbeständigkeit in der Wärme	223
3.4.7	Zugprüfung, E-Modul	221	3.4.10	Infrarotspektalanalyse	224
			3.4.11	Spannungsoptik	225

4 Maschinentechnische Grundfunktionen an kunststoffverarbeitenden Maschinen

4.1	Systemanalyse	226	4.5.2	Schraubverbindungen	250
4.2	Antriebseinheiten	228	4.5.3	Stiftverbindungen	252
4.2.1	Elektromotor	228	4.5.4	Nietverbindungen	253
4.2.2	Hydromotor	229	4.6	Elektrotechnische Grundlagen	254
4.2.3	Druckluftmotor	229	4.6.1	Elektrische Leitfähigkeit von Metallen	254
4.3	Übertragungseinheiten	230	4.6.2	Elektrische Spannung	254
4.3.1	Wellen	230	4.6.3	Elektrischer Strom	255
4.3.2	Achsen	230	4.6.4	Elektrischer Widerstand	256
4.3.3	Zapfen	231	4.6.5	Ohm'sches Gesetz	258
4.3.4	Kupplungen	232	4.6.6	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	258
4.3.5	Kugelgewindetrieb	235	4.6.7	Widerstände in Stromkreisen – Einzel-, Reihen- und Parallelschaltung	259
4.3.6	Riementriebe	236	4.6.8	Elektrische Leistung und Arbeit	260
4.3.7	Kettentriebe	237	4.6.9	Elektrische Energie	260
4.3.8	Zahnradtriebe	238	4.7	Gefahren des elektrischen Stroms	261
4.3.9	Getriebe	239	4.8	Instandhaltung	262
4.4	Stütz- und Trageinheiten	242	4.8.1	Wartung	263
4.4.1	Gehäuse und Gestelle	242	4.8.2	Inspektion	265
4.4.2	Lager	243	4.8.3	Instandhaltungsstrategien	265
4.4.3	Führungen	245			
4.5	Verbindungseinheiten	247			
4.5.1	Welle-Nabe-Verbindungen	247			

5 Steuerungs- und Regelungstechnik

5.1	Steuerungs- und Regelungsvorgänge	268	5.5	Elektropneumatische Steuerungen	302
5.1.1	Der automatische Prozess	268	5.5.1	Elektrische Signaleingabeelemente	302
5.1.2	Grundlagen der Steuerungstechnik	269	5.5.2	Relais, Schütze und Magnetventile	303
5.1.3	Grundlagen der Regelungstechnik	271	5.5.3	Grundsaltungen	304
5.1.4	Bauelemente von Steuerungen	273	5.6	Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS)	308
5.1.5	Darstellungsformen von Steuerungen	278	5.6.1	Aufbau einer SPS	308
5.2	Pneumatische Anlagen	281	5.6.2	Arbeitsweise und Programmierung einer SPS	309
5.2.1	Drucklufterzeugung	281	5.6.3	Programmieren einer Verknüpfungs- bzw. Ablaufsteuerung	312
5.2.2	Ventile	285	5.7	Handhabungseinrichtungen	313
5.3	Steuerungen entwerfen	290	5.7.1	Einteilung von Handhabungseinrichtungen	313
5.3.1	Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile der Pneumatik	290	5.7.2	Funktionseinheiten und die Programmierung von Industrierobotern	314
5.3.2	Aufbau von Schaltplänen	290	5.7.3	Besonderheiten und Schutzvorkehrungen bei Industrierobotern	316
5.3.3	Bezeichnung der Bauteile und pneumatische Grundsaltungen	291			
5.3.4	Signalüberschneidungen	293			
5.4	Hydraulische Steuerungen	296			
5.4.1	Gegenüberstellung der Vorteile und Nachteile der Hydraulik	296			
5.4.2	Hydraulikflüssigkeiten und Bauteile	296			

6 Fertigungsspezifische Vor- und Nachbehandlungsmaßnahmen

6.1	Vor- und Aufbereitungsmaßnahmen	318	6.1.7	Trocknung	330
6.1.1	Zerkleinern	318	6.1.8	Lagerung und Transport	332
6.1.2	Mischen	321	6.2	Nachbehandlungsmaßnahmen	334
6.1.3	Plastifizieren	323	6.2.1	Tempern	334
6.1.4	Granulieren	325	6.2.2	Konditionieren	335
6.1.5	Masterbatch	328	6.2.3	Oberflächenvorbehandlung	335
6.1.6	Compoundierung	329	6.2.4	Oberflächenveredelung	338

7 Herstellen von Formteilen durch Spritzgießen

7.1 Systemanalyse der Maschine und des Prozesses	343	7.2.3 Werkzeugarten	370
7.1.1 Arbeitsstellungen der Maschine	344	7.2.4 Werkzeugtemperierung	373
7.1.2 Zyklusablauf bei der Thermoplastverarbeitung	345	7.2.5 Werkzeugentlüftung	375
7.1.3 Verarbeitungsparameter	346	7.2.6 Entformung	376
7.1.4 Schließeinheit	347	7.3 Fertigungsverfahren	381
7.1.5 Spritzeinheit	358	7.3.1 Spritzgießen von Thermoplasten	381
7.2 Aufbau von Spritzgießwerkzeugen	364	7.3.2 Spritzgießen von Elastomeren	387
7.2.1 Angussysteme	365	7.3.3 Spritzgießen von Duroplasten (Duromeren)	389
7.2.2 Angussformen	366	7.3.4 Sonderverfahren	391
		7.4 Spritzgießfehler	406

8 Herstellen von Formteilen durch Pressen

8.1 Systemanalyse der Maschine und des Prozesses	410	8.2 Pressen und Pressautomaten	425
8.1.1 Formpressen	410	8.2.1 Nachbearbeiten von Formteilen	427
8.1.2 Spritzpressen	418	8.2.2 Sonderverfahren zur Verarbeitung von Formmassen	428
8.1.3 Presswerkzeuge	420		
8.1.4 Fehler und ihre Ursachen beim Verarbeiten von Formmassen	424		

9 Herstellen von Formteilen durch Blasformen

9.1 Systemanalyse der Maschine und des Prozesses	432	9.2.3 Formentlüftung	449
9.1.1 Plastifiziereinheit	435	9.2.4 Formkühlung	450
9.1.2 Schlauchköpfe	436	9.2.5 Formunterbau	450
9.1.3 Wanddickensteuerung	440	9.2.6 Entformungshilfen	451
9.1.4 Schließeinheit	442	9.2.7 Zusatzeinrichtungen	451
9.1.5 Schlauchtrennvorrichtung	443	9.3 Fertigungsverfahren	452
9.1.6 Blasstation	444	9.3.1 Verfahren mit kontinuierlichem Schlauchaustritt	452
9.1.7 Nachfolgestationen	446	9.3.2 Verfahren mit diskontinuierlichem Schlauchaustritt	454
9.2 Aufbau von Blaswerkzeugen	447	9.3.3 Streckblasen und Spritzblasen	456
9.2.1 Werkstoffe	447	9.3.4 Bottlepack-Verfahren	457
9.2.2 Trennkanten	448		

10 Herstellen von Formteilen durch Rotationsformen

10.1 Systemanalyse der Maschine und des Prozesses	458	10.4 Werkzeuge für das Rotationsformen	462
10.2 Formmassen für das Rotationsformen	459	10.4.1 Konstruktionskriterien	462
10.3 Aufbau der Rotationsanlage	460	10.5 Verfahrensablauf beim Rotationsformen	464
10.3.1 Bauarten von Rotationsanlagen	460	10.6 Verfahrensablauf beim Rotationsformen	465
10.3.2 Beheizung der Werkzeuge	461		
10.3.3 Kühlung der Werkzeuge	461		

11 Herstellen von Formteilen und Halbzeugen durch Schäumen

11.1 Allgemeines über Schäume	466	11.3 Schäume aus reaktionsfähigen flüssigen Ausgangskomponenten	477
11.2 Schäume aus blähfähigen Einzelteilchen	468	11.3.1 PUR-Schaum	477
11.2.1 Expandierfähiges Polystyrol EPS	468	11.3.2 Melaminharzschaumstoff	485
11.2.2 Expandierfähiges Polypropylen EPP	474		

12 Herstellen von Halbzeugen durch Extrudieren

12.1 Systemanalyse der Maschine und des Prozesses	486	12.2 Einschnockenextruder	488
12.1.1 Aufbau einer Extrusionsanlage	487	12.2.1 Extruderschnecken	489
12.1.2 Aufgaben des Extruders	487	12.2.2 Plastifizierzylinder	492
12.1.3 Extruderbauarten	488	12.2.3 Einfülltrichter, Förder- und Mischgeräte	496
		12.2.4 Antriebseinheit	496

12.2.5	Temperiersystem	496	12.4 Extrusionswerkzeuge	505
12.2.6	Glattrohretruder (konventioneller Extruder)	496	12.4.1 Werkzeuge mit kreisringspaltförmigem Austrittsquerschnitt	505
12.2.7	Nutbuchsenextruder (Extruder mit genuteter Einzugsbuchse)	498	12.4.2 Profilverkzeuge Profile	509
12.3 Doppelschneckenextruder		499	12.4.3 Flachfolien- und Plattenwerkzeuge	510
12.3.1	Gleichläufiger Doppelschneckenextruder (Gleichläufer)	499	12.4.4 Coextrusionswerkzeuge für Thermoplaste	511
12.3.2	Gegenläufiger Doppelschneckenextruder (Gegenläufer)	502	12.5 Nachfolgeeinrichtungen	512
12.3.3	Planetwalzenextruder	504	12.6 Produktionslinien	514
			12.6.1 Blasfolienanlagen	514
			12.6.2 Flachfolienanlage	517
			12.7 Fehler an Extrudaten	519

13 Herstellen von Halbzeugen durch Kalandrieren

13.1 Systemanalyse der Kalandieranlage und des Prozesses	520	13.3.4 Abzugs-, Kühl- und Aufwickeleinrichtung	528
13.2 Kalandrierbare Kunststoffformmassen	521	13.4 Nachbehandlung	528
13.3 Aufbau der Kalandierstraße	521	13.5 Besonderheiten beim Kalandrieren von Kautschuk	529
13.3.1 Materialaufbereitung beim Kalandrieren	522	13.5.1 Kalandrierbare Kautschuke	529
13.3.2 Die Kalandereinheit	523	13.5.2 Besonderheiten der Kalandereinheit	530
13.3.3 Der Kalandriervorgang bei Thermoplasten	524		

14 Herstellen von Halbzeugen durch Beschichten

14.1 Beschichten mit fließfähigen Materialien	532	14.4 Beschichten aus der Schmelze	542
14.1.1 Trägerstoffe	532	14.5 Oberflächenbehandlung beschichteter Trägerbahnen	544
14.1.2 Beschichtungsmassen	533	14.5.1 Prägen	544
14.1.3 Arbeitsablauf von PVC-Beschichtungsverfahren	534	14.5.2 Überfärben	545
14.1.4 Beschichtungsverfahren und -maschinen	536	14.5.3 Lackieren	545
14.2 Das Tauchverfahren und Imprägnieren	538	14.6 Umweltschutzmaßnahmen	545
14.3 Kaschieren von Trägerbahnen	539		
14.3.1 Hotmelt-Kaschierung	542		

15 Herstellen von Mehrschicht-Kautschukteilen

15.1 Mischen und Kneten	546	15.7.6 Nachfolgeeinrichtungen	556
15.2 Mischverfahren	547	15.8 Herstellung von Reifen	558
15.3 Der Innenmischer	548	15.8.1 Reifenherstellung mit der „Single-Stage“-Reifenaufbaumaschine	561
15.4 Das Walzwerk	551	15.8.2 Reifenheizpressen	562
15.5 Nachfolgeeinrichtungen	552	15.9 Herstellung von Keilriemen	566
15.6 Mischsaalsystem mit zentralem Innenmischer	553	15.10 Herstellung von Fördergurten	569
15.7 Herstellung von Platten und gummierten Festigkeitsträgern	554	15.11 Vulkanisation	571
15.7.1 Gummieren von Gewebe	554	15.11.1 Grundlagen der Vulkanisation	571
15.7.2 Skimmen	555	15.11.2 Vulkanisationsverlauf	572
15.7.3 Belegen von Stahlkord und Geweben	555	15.11.3 Vulkanisationsverfahren	573
15.7.4 Profilieren	555	15.11.4 Kontinuierliches Vulkanisationsverfahren unter Druck	573
15.7.5 Roller-Head-Verfahren (Extrudierverfahren)	556	15.11.5 Kontinuierliches Vulkanisationsverfahren ohne Druck	574

16 Herstellen von Bauteilen durch Bearbeitung von Halbzeugen

16.1 Umformverfahren	576	16.1.2 Umformbereiche	579
16.1.1 Werkstoffverhalten beim Umformen	577	16.1.3 Biegeumformen	581

16.1.4	Positivformung	583	16.3.1	Technologie des Klebens	605
16.1.5	Negativformung	584	16.3.2	Klebstoffe	606
16.1.6	Druckumformen	585	16.3.3	Gestaltung von Klebeverbindungen	608
16.1.7	Spezielle Umformverfahren	586	16.3.4	Vorbehandlung der Klebeflächen	610
16.1.8	Umformwerkzeuge	587	16.3.5	Der Klebevorgang	611
16.1.9	Vor- und Nachbearbeitung der Halbzeuge	588	16.3.6	Vor- und Nachteile von Klebeverbindungen	612
16.2	Schweißen von Kunststoffen	590	16.4	Mechanische Verbindungen von Kunststoffen	613
16.2.1	Grundlagen des Kunststoffschweißens	590	16.4.1	Schnappverbindungen	613
16.2.2	Heizelementschweißen – Schweißen durch Wärmeleitung	592	16.4.2	Schraubverbindungen	614
16.2.3	Warmgasschweißen – Schweißen durch Konvektion	594	16.4.3	Nietverbindungen	615
16.2.4	Schweißen durch Strahlung	598	16.4.4	Steck- und Pressverbindungen	615
16.2.5	Schweißen durch Reibung	599	16.5	Elemente und Baugruppen des Behälter- und Apparatebaus	616
16.2.6	Schweißen durch Induktion	603	16.5.1	Absperr-, Regel- und Sicherheitsarmaturen	616
16.2.7	Anwendung der Schweißverfahren und Schweißsymbole	604	16.5.2	Rohrleitungssysteme und Rohrverbindungen	617
16.3	Kleben von Kunststoffen	605			

17 Herstellen von Bauteilen durch Laminieren

17.1	Werkstoffkomponenten für Faserverbundwerkstoffe	618	17.9.1	Handlaminierverfahren	625
17.2	Duroplastische Matrixharze	619	17.9.2	Vakuumsackverfahren	627
17.3	Reaktionsmittel	620	17.9.3	Faserharzspritzen	627
17.4	Härtung von Reaktionsharzen	620	17.9.4	Wickelverfahren	628
17.5	Thermoplastische Matrices	620	17.9.5	Harzinjektionsverfahren	630
17.6	Verstärkungsmaterialien	621	17.9.6	Pressen	631
17.6.1	Ausführungsformen der Verstärkungsmaterialien	622	17.9.7	Schleudern	631
17.6.2	Stützkernwerkstoffe und Sandwichmaterialien	624	17.9.8	Pultrusion	632
17.7	Additive	624	17.9.9	Autoklav-Verfahren	633
17.8	Vor- und Zwischenprodukte	624	17.10	Nachbearbeitung	633
17.9	Formgebungsverfahren	625	17.11	Bauteilgestaltung	633
			17.11.1	Leichtbauprinzipien	634
			17.11.2	Werkstoffgerechte Bauteilgestaltung	634
			17.11.3	Verfahrensgerechte Gestaltung	635
			17.12	Fügen von Bauteilen	636

18 Auskleiden und Abdichten

18.1	Auskleidewerkstoffe	638	18.2	Auskleidetechniken	641
-------------	----------------------------	------------	-------------	---------------------------	------------

19 Technik und Herstellung von Kunststofffenstern

19.1	Fenstersysteme und ihre Elemente	646	19.3	Montage und Befestigung von Fenstersystemen	668
19.1.1	Glas- und Scheibenarten	646	19.3.1	Arbeitsplan für die Montage eines unverglasten Drehkipp-Fensters	670
19.1.2	Profil- und Konstruktionsarten	652	19.3.2	Grundlagen der Bauphysik	671
19.1.3	Aufbau und Maßbezeichnungen von Fenstern	655	19.4	Reparatur und Wartung von Fenstersystemen	675
19.1.4	Fensterbeschläge	657	19.4.1	Beseitigung von Oberflächenschäden	675
19.2	Herstellung von Fensterrahmen	659	19.4.2	Wartung der Fenster	675
19.2.1	Profilzuschnitt und -bearbeitung	661			
19.2.2	Verbinden der Profilduschnitte	663			
19.2.3	Klotzung und Dichtung der Scheibe	665			

Fachwörterbuch Deutsch – Englisch, Sachwortverzeichnis	676
Fachwörterbuch Englisch – Deutsch, Sachwortverzeichnis	689

Firmenverzeichnis	700
Bildquellenverzeichnis	703

1 Aufbau und Eigenschaften der Werkstoffe

Der Begriff „**Werkstoff**“ beinhaltet alle Materialien, die in eine **bestimmte** Form gebracht werden können und für den **technischen** Gebrauch geeignet sind. Der angehende Facharbeiter in der Kunststofftechnik hat tagtäglich mit einer Vielzahl von **Kunststoffen**, aber auch mit einer Reihe **metallischer** Werkstoffe zu tun. Aus diesem Grund ist es für ihn von grundlegender Bedeutung, die wichtigen Eigenschaften dieser Werkstoffe zu kennen. Für das bessere Verständnis ist es notwendig, zuerst einige Grundlagen aus der **Physik** und der **Chemie** zu betrachten.

1.1 Physikalische Grundlagen

Die Naturwissenschaft **Physik** leitet sich ab von dem griechischen Wort „*physis*“ – der Körper. Sie beschäftigt sich mit den **Eigenschaften** unbelebter Körper und den **Vorgängen**, die die Lage, den Zustand oder die Form von Körpern verändern. Bei **physikalischen Vorgängen** bleibt der Stoff **unverändert**.

1.1.1 Grundbegriffe

Um die **Eigenschaften** von Körpern physikalisch zu beschreiben, bedarf es bestimmter **Messverfahren** und vorher festgelegter **Einheiten**. Solche **quantitativ** erfassbaren Eigenschaften bezeichnet man als **physikalische Größen**, wie z. B. die Masse oder die Dichte. Sie geben an, wie oft eine Einheit in der Größe vorkommt.

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$$

So beträgt z. B. die Masse eines Körpers:

$$m = 3 \cdot 1 \text{ kg} = 3 \text{ kg}$$

Angaben von physikalischen Eigenschaften **ohne** Einheit machen somit keinen Sinn. Die Einheiten sind im **internationalen Einheitensystem (SI-Einheiten)** festgelegt. Hierin sind die **Basisgrößen** mit ihren **Basiseinheiten** und ihrem **Formelzeichen** vermerkt (**Tabelle 1**).

Alle weiteren Größen und Einheiten können hieraus **abgeleitet** werden, z. B. die Geschwindigkeit oder die Dichte.

Um sehr kleine bzw. sehr große Angaben physikalischer Größen überschaubarer zu machen, verwendet man für das Vielfache bzw. Teile der Basiseinheiten griechische Vorsatzzeichen oder entsprechende **Zehnerpotenzen** (**Tabelle 2**).

Beispiel: 1 Millionstel Meter = $10^{-6} \text{ m} = 1 \mu\text{m}$

Tabelle 1: Basisgrößen und Basiseinheiten

Basisgröße	Formelzeichen	Basiseinheit
Länge	l	1 Meter = 1 m
Masse	m	1 Kilogramm = 1 kg
Zeit	t	1 Sekunde = 1 s
Temperatur	T (ϑ)	1 Kelvin = 1 K (1 Grad Celsius = 1 °C)
Elektrische Stromstärke	I	1 Ampere = 1 A
Lichtstärke	I_V	1 Candela = 1 cd
Stoffmenge	n	1 Mol = 1 mol

Tabelle 2: Vorsatzzeichen der Basiseinheiten

Faktor	Zehnerpotenz	Vorsatz	Vorsatzzeichen
Millionen	10^6	Mega	M
Tausend	10^3	Kilo	k
Hundert	10^2	Hekto	h
Zehn	10^1	Deka	da
Basiseinheit	$10^0 = 1$	–	–
ein Zehntel	10^{-1}	Dezi	d
ein Hundertstel	10^{-2}	Zenti	c
ein Tausendstel	10^{-3}	Milli	m
ein Millionstel	10^{-6}	Mikro	μ

Typische **physikalische** Vorgänge sind z. B. das **Schmelzen** oder **Verdampfen** eines Stoffes, bei denen sich nur die **Form** bzw. der **innere Zusammenhalt** des Stoffes verändert. Auch Fertigungsverfahren wie Sägen, Bohren, Gießen oder Biegen verändern den Stoff selbst **nicht**. **Stoffänderungen** bewirken nur **chemische** Vorgänge, wie z. B. die Verbrennung von Holz, die Korrosion von Eisen oder die Herstellung von Kunststoffen aus Erdöl.

1.1.2 Masse und Gewichtskraft

Bei der Herstellung von Spritzgussprodukten werden die hergestellten Teile häufig gewogen. So kann man beispielsweise sehr einfach Gutteile von Ausschussteilen unterscheiden. Dazu wird oft eine **Waage** eingesetzt, die mit einem Förderband ausgerüstet ist. Auch zur Optimierung des Spritzgussprozesses werden meist Präzisionswaagen (**Bild 1**) eingesetzt, weil mit ihnen komplizierte Bauteile ohne großen Aufwand gewogen werden können. Beim Wiegen muss man grundsätzlich die Masse und die Gewichtskraft unterscheiden. Der in der Alltagssprache häufig verwendete Ausdruck **Gewicht** kann sowohl die Masse als auch die Gewichtskraft meinen. In der Technik sollte dieser Begriff vermieden werden, denn während die **Masse** ortsunabhängig ist, ist die **Gewichtskraft** nicht an jedem Ort gleich. Eine Messung am Standort A führt also bei der Gewichtskraft am Standort B zu anderen Ergebnissen, bei der Masse hingegen sind die Ergebnisse für den Standort A und B identisch. Im Folgenden wird die Unterscheidung von Masse und Gewichtskraft ausführlich erklärt.



Bild 1: Präzisionswaagen

■ Die Masse m

Mit der Masse ist die Stoffmenge eines Körpers gemeint. Sie wird grundsätzlich durch den Vergleich mit Masseeinheiten bestimmt. Dazu kann man eine **Balkenwaage** oder eine **Hebelwaage** (**Bild 2**) verwenden. Hebelwaagen werden häufig zur Bestimmung der Masse von Sportlern eingesetzt, um die korrekte Einteilung der Gewichtsklassen an jedem Ort der Welt sicherzustellen.



Bild 2: Hebelwaage

Die Basiseinheit der **Masse** (m) ist das **Kilogramm** (kg).

Im metrischen System war das Kilogramm zunächst als die Masse definiert, die ein Kubikdezimeter reines Wasser bei 4 °C hat (Temperatur der maximalen Dichte von Wasser). Hierzu wurde ein Zylinder aus der besonders haltbaren Legierung **Platin-Iridium** (Höhe und Durchmesser betragen 39 mm) mit derselben Masse hergestellt – das sogenannte **Ur-Kilogramm**. Die Physikalisch-Technische-Bundesanstalt (PTB) hat diese Definition weiterentwickelt: ab Mai 2019 sollte das Kilogramm auf **Naturkonstanten** wie die Atommasse einer Siliziumkristall-Kugel (**Bild 3**) festgelegt werden. Endgültig wird das Kilogramm aber jetzt über die PLANCK-Konstante $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$ (kg · m²)/s ausgedrückt.



Bild 3: Silizium-Kugel zur Kilogramm-Definition

Die **Masse** eines Körpers ist vom **Ort unabhängig**.

Ein **Gegenstand** würde also auf dem **Mond** und auf der **Erde** die **gleiche Masse** haben. Die Gewichtskraft desselben Gegenstandes betrüge auf dem Mond dagegen nur ein Sechstel wie auf der Erde.

■ Die Gewichtskraft F_G

Die Gewichtskraft ist ein **Maß für die Anziehungskraft**, z. B. der Erde auf eine Masse.

Sie wird üblicherweise mit einem **Kraftmesser (Bild 1)** bestimmt. Umgangssprachlich wird häufig der Begriff **Federwaage** verwendet, der streng genommen nicht ganz richtig ist, weil ein Kraftmesser mithilfe des Federwiderstandes nur eine Kraft messen kann. Wiegen kann man dagegen nur Massen.

Die **Einheit** für die Gewichtskraft ist das **Newton (N)**.

Die Anziehungskraft auf einen Körper ist auch auf der Erde nicht überall gleich. Die Erde ist nämlich an den Polen abgeflacht und hat am Äquator ihren größten Durchmesser.

Am **Normort Paris** beträgt der Ortsfaktor bzw. die **Fallbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$** (bzw. N/kg). Am **Nordpol** ist die Anziehungskraft **höher**, weil bei gleicher Erdmasse der Abstand zum Erdmittelpunkt geringer ist. Sie beträgt dort $9,83 \text{ N/kg}$. Am **Äquator** ist die Erdanziehung wegen des großen Abstandes zum Erdmittelpunkt mit $9,78 \text{ m/s}^2$ **geringer**.

Noch niedriger ist die Gewichtskraft auf dem Mond. Wegen der deutlich kleineren Masse des Mondes beträgt die Fallbeschleunigung dort nur $g = 1,62 \text{ N/kg}$ (**Bild 2**).

Im Gegensatz zur Masse ist die Gewichtskraft vom Ort, an dem gemessen wird, abhängig (**Tabelle 1**).

Formel:

$$F_G = m \cdot g$$

Einheit: $[F_G] = [m] \cdot [g] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 1 \text{ Newton} = 1 \text{ N}$

m Masse in kg

g Fallbeschleunigung in m/s^2 (Erde: $9,81 \text{ m/s}^2$)

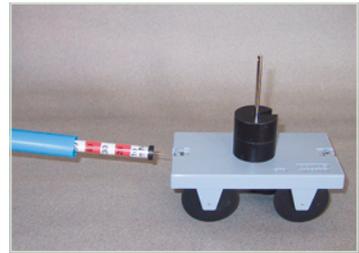


Bild 1: Kraftmesser



Bild 2: Erde und Mond

Tabelle 1: Fallbeschleunigung

Paris	$9,81 \text{ m/s}^2$
Nordpol	$9,83 \text{ m/s}^2$
Äquator	$9,78 \text{ m/s}^2$
Mond	$1,62 \text{ m/s}^2$
Sonne	273 m/s^2
Jupiter	$24,8 \text{ m/s}^2$

Gedankenversuch: Würde man einen Gegenstand mit der Masse 5 kg auf dem Mond und auf der Erde (Paris) mit der Balkenwaage wiegen, so hätte dieser Gegenstand jeweils 5 kg . Bestimmt man allerdings die Gewichtskraft, dann würde der Kraftmesser auf der Erde $F_G = 5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ N/kg} = 49,05 \text{ N}$ anzeigen. Auf dem Mond liest man dagegen $F_G = 5 \text{ kg} \cdot 1,62 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 8,1 \text{ N}$ ab. Die Gewichtskraft ist also auf dem Mond rund sechsmal geringer.

Die **Gewichtskraft** ist vom **Ort** abhängig.

Wiederholungsfragen:

- Nennen Sie Messgeräte zur Bestimmung
 - der Masse,
 - der Gewichtskraft.
- Warum ist die Masse vom Ort unabhängig?
- Welche Definition für ein Kilogramm ist ab Mai 2019 festgelegt?
- Erklären Sie, weshalb die Gewichtskraft auf der Erde nicht überall gleich ist.
- Warum ist die Gewichtskraft ortsabhängig?

1.1.3 Länge, Fläche, Volumen und Dichte

■ Die Länge *l*:

Formelzeichen: *l* Einheit: [*l*] = 1 Meter = 1 m

Unter der Länge versteht man die Ausdehnung einer Strecke in einer Richtung – **in einer Dimension** – von einem bestimmten Anfangspunkt bis zu einem bestimmten Endpunkt. Dabei spielt die Richtung selbst keine Rolle, d. h., auch die sog. Breite, Höhe, Tiefe oder Dicke fallen unter den Oberbegriff **Länge**. Das sog. **Urmeter** aus Platin-Iridium (**Bild 1**) ist 1875 als der 40millionste Teil des Erdumfangs festgelegt worden und stellt die **Einheit** der Länge dar, nach der sich alle Messinstrumente richten müssen. Da selbst dieses Urmeter aufgrund von Temperaturschwankungen nicht immer exakt die gleiche Länge aufweist, hat man 1960 eine neue Definition festgesetzt:



Bild 1: Urmeter aus Platin-Iridium

Ein **Meter** ist die Strecke, die das Licht im luftleeren Raum in einer 299 729 458-stel Sekunde durchläuft.

In **Tabelle 1** sind die gebräuchlichsten Unterteilungen der Einheit 1 m dargestellt. In der Kunststofftechnik spielen vor allem die Einheiten mm und µm eine wesentliche Rolle.

Tabelle 1: Unterteilungen der Längeneinheit			
Faktor	Zehnerpotenz	Einheit	Abkürzung
Tausendfach	10 ³ m	1 Kilometer	1 km
Zehntel	10 ⁻¹ m	1 Dezimeter	1 dm
Hundertstel	10 ⁻² m	1 Zentimeter	1 cm
Tausendstel	10 ⁻³ m	1 Millimeter	1 mm
Millionstel	10 ⁻⁶ m	1 Mikrometer	1 µm

Zum Messen von Längen verwendet man vor allem **Messschieber** und **Bügelmessschrauben**.

Grundsätzlich gilt: Längen können nicht **100-prozentig** genau gemessen werden. Messschieber schaffen +/- 50 µm, Bügelmessschrauben bis +/- 10 µm.

Beim **Messen** wird eine bestimmte Länge, z. B. die Länge eines Röhrchens, mit der Einheit 1 mm verglichen. Das Ergebnis stellt eine **physikalische Größe** dar, z. B. *l* = 35 mm (**Bild 2**).



Bild 2: Messen einer Länge

■ Die Fläche *A*:

Formelzeichen: **A** (von engl. *area*)
 Einheit: 1 Quadratmeter = 1 m² = 100 dm² = 10⁴ cm² = 10⁶ mm²

Unter der **Fläche** versteht man die Ausdehnung eines Punktes in 2 Richtungen – **in 2 Dimensionen**, in der Regel in eine Länge und eine Breite. Die Fläche leitet sich aus der Länge ab und sie gibt die Anzahl der Flächeneinheiten einer beliebigen Fläche an.

Beispiel: $A = l \cdot b = 5 \text{ m} \cdot 4 \text{ m} = 20 \text{ m}^2$

Flächen spielen in der Technik vor allem als **Querschnittsflächen** von Profilen, sogenannten Halbzeugen, und als **Oberflächen** von Körpern eine wichtige Rolle (**Bild 3**).

Flächen werden in der Regel berechnet, sie sind aber auch direkt durch einen sogenannten **Planimeter** messbar.

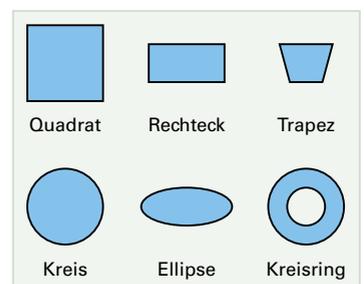


Bild 3: Querschnitte

Das Volumen V:

Das Volumen stellt die Ausdehnung eines Punktes in **3 Dimensionen** dar, einer Länge, einer Breite und einer Höhe (oder Tiefe). Es gibt die Anzahl der Volumeneinheiten eines beliebigen Rauminhaltes wieder.

Formelzeichen: V
Einheiten: 1 Kubikmeter = $1 \text{ m}^3 = 10^3 \text{ dm}^3 = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^9 \text{ mm}^3$
Für Flüssigkeiten: 1 Liter = $1 \text{ l} = 1 \text{ dm}^3$

Beispiel: Volumen eines Quaders (**Bild 1**)
 $V = l \cdot b \cdot h = 2 \text{ cm} \cdot 1 \text{ cm} \cdot 2 \text{ cm} = 4 \text{ cm}^3$

Bei den Volumen unterscheidet man zwischen **prismatischen, spitzen** und **abgestumpften** Grundkörpern.

Volumen von klar begrenzten Körpern werden meist berechnet, unregelmäßige Rauminhalte können auch durch **Flüssigkeitsverdrängung** direkt gemessen werden. Dabei macht man sich zunutze, dass ein untergetauchter Körper genauso viel Flüssigkeit verdrängt, wie er selbst an Volumen einnimmt. Die aus dem **Überlaufgefäß** ① auslaufende Flüssigkeit kann mit einem **Messzylinder** ② gemessen werden (**Bild 2**).

Die Dichte ρ:

Formelzeichen: ρ (griech. *rho*) Einheit: $[\rho] = 1 \text{ kg/dm}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$

Verschieden große Körper unterscheiden sich in ihrer Masse und ihrem Volumen. Zum Vergleich solcher Körper macht es Sinn, für diese Körper die **Masse pro Volumeneinheit** anzugeben. Auf diese Weise erhält man als neue Größe die **Dichte**, welche ein Kennzeichen für den **Werkstoff** des Körpers darstellt.

Wortgleichung: **Dichte** = $\frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}}$ Formelgleichung: $\rho = \frac{m}{V}$

Die Einheit leitet sich direkt aus der Formel ab, allerdings verwendet man nur für **gasförmige** Stoffe die direkt abgeleitete Einheit 1 kg/m^3 , für **flüssige** und **feste** Körper dagegen 1 kg/dm^3 oder 1 g/cm^3 . Die Dichte von Flüssigkeiten und Gasen ist abhängig von der Temperatur und dem Umgebungsdruck. Als Vergleichswert für Dichtewerte gilt die Dichte von Wasser bei **4 °C**: 1 kg/dm^3 . Alle Stoffe mit einer geringeren Dichte als 1 kg/dm^3 **schwimmen** auf dem Wasser, Stoffe mit einer höheren Dichte **gehen unter** (**Tabelle 1**).

Die Dichte von festen Körpern kann nicht direkt bestimmt werden, sondern muss nach der Formel berechnet werden. Bei Flüssigkeiten kann sie direkt aufgrund des von der Dichte abhängigen **Auftriebes** durch sogenannte **Dichtespindeln** gemessen werden.

Tabelle 1: Dichte ρ verschiedener Stoffe in kg/dm³ bzw. g/cm³

Stoff	Dichte	Stoff	Dichte	Stoff	Dichte
Fichtenholz	0,5	Wasser bei 4 °C	1	Stahl, unlegiert	7,85
Maschinenöl	0,91	Polystyrol	1,05	Blei	11,34
Polyethylen	0,91 ... 0,97	Aluminium	2,7	Platin	21,5

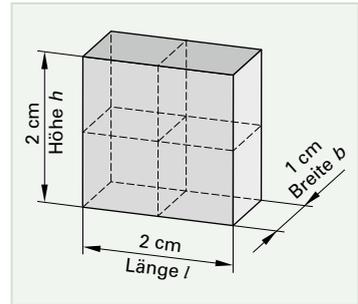


Bild 1: Quader mit 4 cm³

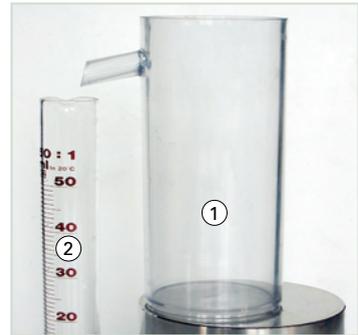


Bild 2: Überlaufgefäß

Über die Dichte kann man auch den Werkstoff eines Körpers bestimmen. Hierzu bestimmt man seine Masse durch Wiegen und sein Volumen durch Berechnung oder Flüssigkeitsverdrängung. Daraus berechnet man seine Dichte und vergleicht diesen Wert mit entsprechenden **Tabellenwerten**.

1.1.4 Zeit und Geschwindigkeit

Die Zeit t :

Formelzeichen: t (von engl. *time*)

Einheit: $[t] = 1 \text{ Sekunde} = 1 \text{ s} = 1000 \text{ ms}$

Seit 1967 gilt für die Sekunde folgende Definition:

1 Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der Strahlung von Cäsium 133 beim Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturen dieses Atoms.

Umrechnungen:

1 Tag (d) = 24 Stunden (h)
 1 h = 60 min = 3600 s

Es gibt **nur** für die **Sekunde** Vorsätze für dezimale Teile und Vielfache. Die Zeit wird durch periodisch verlaufende Vorgänge gemessen, z. B. in einer Pendeluhr, Stoppuhr oder Atomuhr (**Bild 1**).

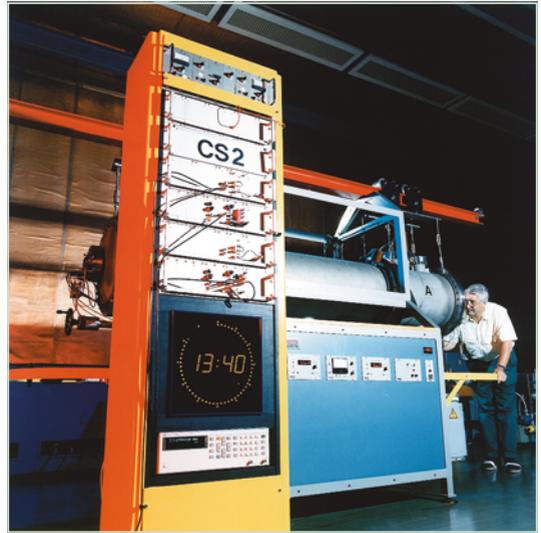


Bild 1: Atomuhr

Die Geschwindigkeit v :

Formelzeichen: v (von engl. *velocity*)

Einheiten: $[v] = 1 \text{ m/s} = 60 \text{ m/min} = 3,6 \text{ km/h}$

Ein Körper befindet sich entweder in **Ruhe** oder in einer Form von **Bewegung**. Bei der **gleichförmigen** Bewegung legt der Körper in gleichen Zeiten gleiche Wege zurück.

Unter der Geschwindigkeit v versteht man die **pro Zeiteinheit** zurückgelegte Strecke.

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Strecke}}{\text{Zeit}} \quad v = \frac{s}{t}$$

Beispiel: Ein Pkw legt in 3 Stunden 270 km zurück. Damit beträgt seine Durchschnittsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{s}{t} = 270 \text{ km} / 3 \text{ h} = 90 \text{ km/h}$$

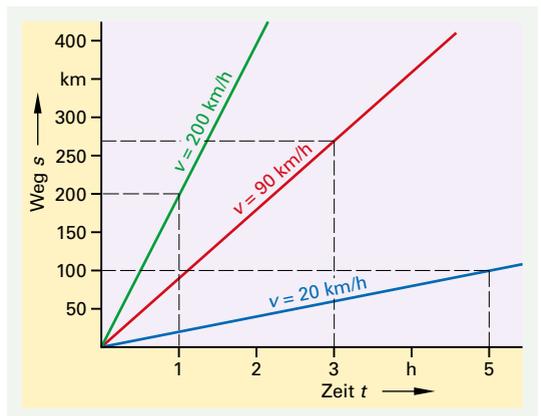


Bild 2: Gleichförmige Bewegung (s-t-Diagramm)

Je steiler die Gerade im **s-t-Diagramm** verläuft, desto höher ist die Geschwindigkeit (**Bild 2**).

Kreisförmige Bewegung

In der Technik kommt der **kreisförmigen Bewegung** eine große Bedeutung zu. Sehr viele Maschinenelemente **drehen** sich um eine bestimmte **Achse**, z. B. Zahnräder, Bohrer, Schauflräder von Pumpen oder Schnecken von Extrudern. Diese Drehbewegungen werden durch die **Drehzahl n** erfasst.

Die Drehzahl gibt die **Anzahl** der Umdrehungen U pro **Zeiteinheit** an.

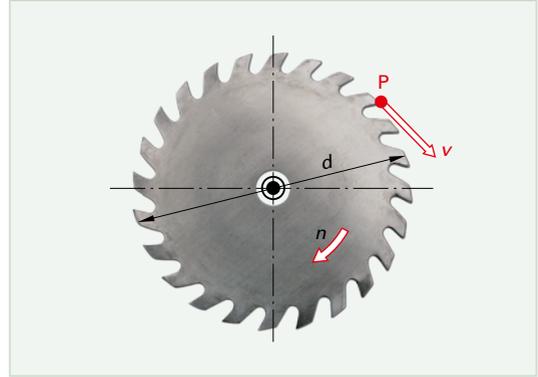


Bild 1: Kreisförmige Bewegung eines Sägeblattes

Ein Punkt P auf dem Rand einer Scheibe legt dabei den Weg $d \cdot \pi$ zurück, seine **Umfangsgeschwindigkeit** ist dabei **n -mal** so groß. Je weiter **außen** der Punkt liegt (d also größer wird), desto **schneller** bewegt er sich (**Bild 1**). Sie entspricht bei schneidenden Werkzeugen der Schnittgeschwindigkeit v_c .

Umfangsgeschwindigkeit: $v = d \cdot \pi \cdot n$ Einheit: meist **m/min**

Ungleichförmige Bewegung

Ändert sich die Geschwindigkeit eines Körpers, so ist seine Bewegung ungleichförmig. Bei einer Zunahme der Geschwindigkeit spricht man von einer **Beschleunigung**, bei einer Abnahme von einer **Verzögerung**.

Unter der Beschleunigung **a (①)** bzw. Verzögerung **a (②)** versteht man die Geschwindigkeitszu- bzw. Geschwindigkeitsabnahme Δv pro Zeiteinheit Δt (**Bild 2**).

Beschleunigung,
Verzögerung: Einheit:
 $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ $[a] = 1 \text{ m/s}^2$

Beispiel: Ein Pkw beschleunigt von 0 auf 100 km/h in 10 s, so beträgt seine durchschnittliche Beschleunigung:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{100 \text{ km/h}}{10 \text{ s}} = \frac{27,78 \text{ m/s}}{10 \text{ s}} = 2,78 \text{ m/s}^2$$

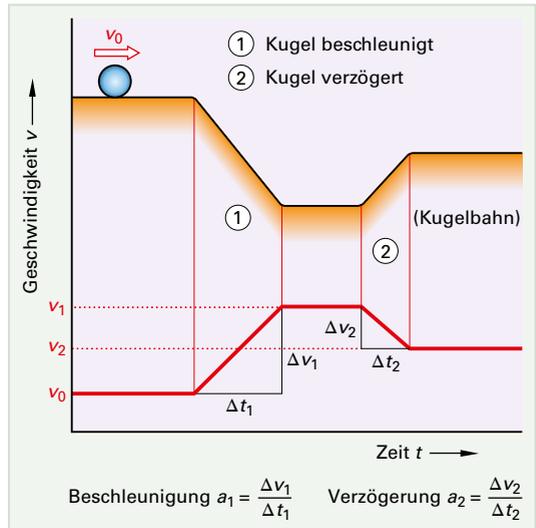


Bild 2: Bewegungsablauf im Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm

Wiederholungsfragen:

1. In welcher Einheit wird die Dichte von Stoffen angegeben?
2. Worin liegt der Unterschied zwischen einer gleichförmigen und einer ungleichförmigen Bewegung?
3. Wo spielen kreisförmige Bewegungen eine wichtige Rolle?
4. Wie kann das Volumen von unregelmäßigen Körpern bestimmt werden?

1.1.5 Weitere wichtige physikalische Größen

Temperatur

Formelzeichen: absolute Temperatur T	Einheit: $[T] = 1 \text{ Kelvin} = 1 \text{ K}$ (nicht Grad Kelvin)
Temperatur nach Celsius: ϑ (theta)	Einheit: $[\vartheta] = 1 \text{ Grad Celsius} = 1 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatur nach Fahrenheit: $t_F = 1,8 \cdot \vartheta + 32$	Einheit: $[t_F] = 1 \text{ Grad Fahrenheit} = 1 \text{ }^\circ\text{F}$

Der schwedische Astronom Anders **Celsius** (1701 – 1744) legte seine Temperaturskala durch den **Schmelz-** bzw. **Siedepunkt** von Wasser fest und teilte den Abstand dieser beiden Temperaturpunkte in 100 Teile. Da $0 \text{ }^\circ\text{C}$, also der Schmelzpunkt von Wasser, nicht die kälteste mögliche Temperatur ist, entstehen zwangsläufig **negative** Temperaturen. Der Physiker **Kelvin** stellte fest, dass es einen **absoluten Nullpunkt** bei $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ gibt, bei dem jegliche Bewegung der Stoffteilchen zum Erliegen kommt. Er bezeichnete diesen Punkt mit **0 Kelvin** (kurz **0 K**), behielt aber die Gradeinteilung von Celsius bei. Seine Temperaturen sind damit alle **absolut**, d.h. immer **positiv** (Bild 1). Auf dem amerikanischen Kontinent werden Temperaturen auch in **Grad Fahrenheit** ($^\circ\text{F}$) gemessen.

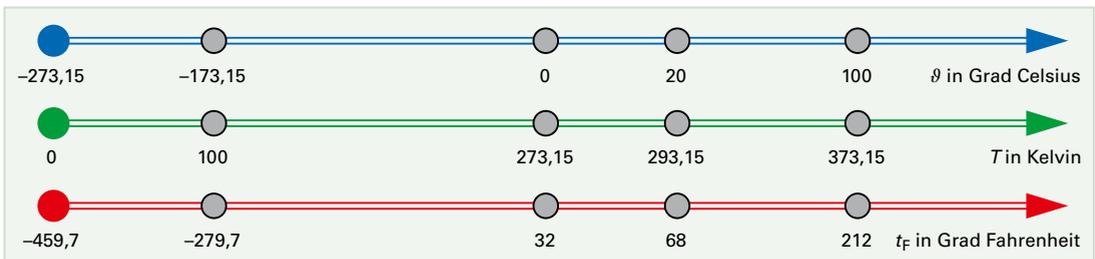


Bild 1: Vergleich von Celsius-, Fahrenheit- und Kelvin-Skala

Zur Messung der Temperatur nutzt man **temperaturabhängige** physikalische Größen:

- **Flüssigkeitsthermometer:** Die **Länge** der Flüssigkeitssäule (Alkohol, Pentan, bis 2017 Quecksilber) gibt die Temperatur an. Der Siede- bzw. Schmelzpunkt begrenzt den Messbereich (Bild 2).
- **Bimetallthermometer:** Zwei Streifen aus unterschiedlichen Metallen sind dabei miteinander verbunden. Aufgrund der unterschiedlichen **Längenänderung** bei Erwärmung (siehe S. 18) krümmt sich der Streifen. Diese Krümmung stellt dann ein Maß für die Temperatur dar.
- **Widerstandsthermometer:** Der **elektrische Widerstand R** von Metallen ändert sich mit der Temperatur, somit ist die Höhe des Widerstandes ein Maß für die Temperatur. Durch Verwendung von Keramik oder Halbleitern erhöht sich der Messbereich von $-200 \text{ }^\circ\text{C}$... $+800 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bild 3).
- **Infrarotthermometer (Pyrometer):** Alle Körper oberhalb des absoluten Nullpunktes geben **Infrarotstrahlung** ab, deren Intensität ein Maß für die Temperatur darstellt. Mit einem **Laserpointer** wird die Messstelle anvisiert. Der Messbereich liegt zwischen $-50 \text{ }^\circ\text{C}$... $5000 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bild 4).

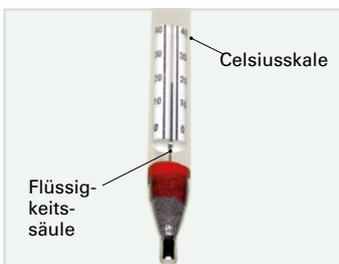


Bild 2: Flüssigkeitsthermometer



Bild 3: Widerstandsthermometer



Bild 4: Infrarotthermometer

■ Längenänderung

Aufgrund der **zunehmenden Teilchenbewegung** bei steigender Temperatur nimmt die **Länge** von festen Körpern oder auch von Flüssigkeitssäulen **zu**. Diese Längenänderung ist von der **Temperaturänderung ΔT** (sprich: *Delta T*), der **Ausgangslänge l_1** und dem **Material** abhängig (**Bild 1**).

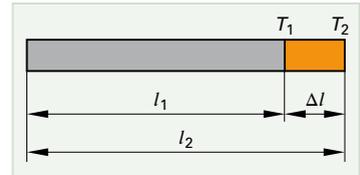


Bild 1: Längenausdehnung

Die Materialabhängigkeit wird durch den sog. **Längenausdehnungskoeffizienten α_1** ausgedrückt (**Tabelle 1**).

$$\text{Längenänderung: } \Delta l = l_1 \cdot \Delta T \cdot \alpha_1 \quad l_2 = l_1 + \Delta l$$

$$\Delta T = T_2 - T_1: \text{ Temperaturänderung in } ^\circ\text{C} \quad \alpha_1: \text{ Längenausdehnungskoeffizient in } 1/\text{K}$$

Diese Ausdehnung macht sich aber auch zweidimensional als **Flächenausdehnung** und dreidimensional als **Volumenausdehnung** bemerkbar. Bei einer Abkühlung zieht sich ein Körper zusammen, man spricht von einer **Schrumpfung** bzw. **Schwindung**, die z.B. beim Spritzgießen berücksichtigt werden muss, indem der Werkzeughohlraum (Kavität) um das Maß der Schwindung **größer** sein muss als die Endmaße.

■ Elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit

Auch diese beiden Größen sind entscheidend von der **Temperatur** abhängig. Grundsätzlich hängen die Fähigkeiten von Stoffen, elektrischen Strom oder Wärme zu leiten, zusammen. Ein Stoff, der die Wärme schlecht leitet, z.B. die Kunststoffe, leitet auch den elektrischen Strom nur sehr schlecht und umgekehrt. Als Kenngröße für die elektrische Leitfähigkeit wird meist der sog. **spezifische Widerstand** bei 20 °C ρ_{20} in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ verwendet. Der spezifische Widerstand ist der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit. Die **Wärmeleitfähigkeit λ** (lambda) wird in der Einheit **W/m · K** angegeben (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Wärmeleitfähigkeit, spezifischer Widerstand und Längenausdehnungskoeffizient

Werkstoff	Aluminium	Stahl, unlegiert	Polystyrol	Porzellan
Wärmeleitfähigkeit λ in W/m · K	204	48 ... 58	0,14 ... 0,16	1,6 (bei 800 °C)
Spezifischer Widerstand ρ_{20} in $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	0,027	0,14 ... 0,18	$\sim 10^{18}$	10^{18}
Längenausdehnungskoeffizient α_1 in 1/K (bzw. in 1/°C)	$2,38 \cdot 10^{-5}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5} \dots 8 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$

Kunststoffe haben in der Regel eine sehr **schlechte elektrische Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit**, sie werden als **Isolatoren** eingesetzt. Metalle dagegen leiten Strom und Wärme sehr gut, sie sind **Leiter**.

■ Druck

Formelzeichen: **p** (von engl. *pressure*) Einheiten: $[p] = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pascal} = 1 \text{ Pa}$; $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

$$\text{Druck} = \text{Kraft/Auflagefläche} \quad p = \frac{F}{A} = 10 \text{ N/cm}^2$$

Unter Druck versteht man die **Kraft**, die auf eine **Fläche von 1 m²** wirkt. Die Einheit 1 N/m² oder 1 Pa leitet sich direkt aus der Formel ab. Da ein Druck von 1 Pa sehr klein ist, verwendet man als Einheit üblicherweise **1 bar**, das **Hunderttausendfache** von einem Pascal.

Beispiele für Drücke:

- Luftdruck: 1013 mbar = 1013 hPa
- Druck in 10 m Wassertiefe: 1 bar
- Spitzendruck beim Spritzgießen: bis 2000 bar
- Pneumatische Steuerungen: bis ca. 14 bar
- Hydraulische Steuerungen: bis ca. 400 bar

Drücke werden durch sogenannte **Manometer** gemessen, hier kommen z. B. das **U-Rohr-Manometer**, das **Plattenfedermanometer** oder das **Rohrfedermanometer** zur Anwendung (**Bild 1**).



Bild 1: Rohrfeder- und Plattenfedermanometer

Vor allem in der Pneumatik (Lehre vom Verhalten der Gase, insbesondere der Luft) misst man in der Regel die **Abweichung** zum Luftdruck als sogenannten **Überdruck** oder **Unterdruck** (Vakuum). Ein 100-prozentiges Vakuum meint einen **absoluten Druck** von **0 bar**. Negative Drücke sind nicht möglich.

Pneumatische Drücke in Form von **Druckluft** werden durch **Verdichter** erzeugt und können in Druckbehältern gespeichert werden. Hydraulische Drücke werden mit entsprechenden **Hydraulikpumpen** erzeugt und aufrechterhalten.

■ Stoffmenge

Die **Stoffmenge** n gibt die Anzahl **gleichartiger** Atome oder Moleküle an, die in einem Körper enthalten ist. Sie wird in der Einheit **Mol** angegeben.

Ein **Mol** ist die Stoffmenge, in der so viele Teilchen enthalten sind wie Atome in 12 g des Kohlenstoffisotopes C-12. 1 Mol enthält damit $6,022045 \cdot 10^{23}$ Teilchen.

Oft ist es nützlich, das **Volumen** oder die **Masse** eines Stoffes auf die Stoffmenge zu **beziehen**. Man spricht dann vom sogenannten **molaren Volumen** V_m bzw. der **molaren Masse** M .

$$\text{Molares Volumen: } V_m = \frac{V}{n} \quad \text{Einheit: } [V_m] = \text{m}^3/\text{mol}$$

$$\text{Molare Masse: } M = \frac{m}{n} \quad \text{Einheit: } [M] = \text{kg/mol}$$

Wiederholungsfragen:

1. Geben Sie die Einheiten der Temperatur an.
2. Nennen Sie die Arten von Thermometern.
3. Was versteht man unter der Längenausdehnung?
4. Welche Stoffe haben eine hohe Wärme- bzw. elektrische Leitfähigkeit?
5. Nennen Sie die Einheiten des Druckes.
6. Welche Arten von Manometern unterscheidet man?
7. Erklären Sie den Unterschied zwischen Über- und Unterdruck.
8. Was versteht man unter der Stoffmenge?
9. Nennen Sie die Einheit der Stoffmenge.

1.1.6 Aggregatzustand, Adhäsion, Kohäsion und Kapillarwirkung

Wenn Kunststoffteile miteinander verbunden werden sollen, greift man häufig auf die Verfahren Kleben und Schweißen zurück. In diesem Zusammenhang fallen häufig die Begriffe **Adhäsion** (Anhangskraft), **Kohäsion** (Zusammenhangskraft) und **Kapillarwirkung**. Im Nachfolgenden sollen diese Begriffe genauer erklärt werden. Zum besseren Verständnis wird zunächst der Begriff Aggregatzustand erklärt.

■ Aggregatzustand

Der Begriff Aggregatzustand bezeichnet die **Erscheinungsform eines Stoffes**. Die Mehrzahl der Stoffe kann fest, flüssig und gasförmig vorkommen. Ausnahmen wie Holz, das z. B. nicht flüssig werden kann, sind eher selten.

Der Aggregatzustand hängt vom **äußeren Druck**, der **Temperatur** und von den **Eigenheiten des Stoffes** ab. Das Gas Helium bleibt beispielsweise bis zu einer Temperatur von minus 269 °C gasförmig, das Metall Wolfram ist dagegen bis zu einer Temperatur von 3370 °C fest.

Wasser kann in allen drei Aggregatzuständen (**Bilder 1 bis 3**) auftreten. Bei Temperaturen unterhalb von 0 °C (Gefrierpunkt) wird Wasser zu **Eis**. Zwischen 0 °C und 100 °C (Siedepunkt) ist **Wasser** flüssig, und bei Temperaturen oberhalb von 100 °C spricht man von **Wasserdampf** (gasförmig).



Bild 1: Eis

Bild 2: Wasser

Bild 3: Wasserdampf

■ Kohäsion

Der Begriff **Kohäsion** bezeichnet die **Zusammenhangskraft** innerhalb eines Stoffes. Die Kohäsion ist von den Eigenheiten des Stoffes und von seinem Aggregatzustand (**Bilder 4 bis 6**) abhängig.

Die Zusammenhangskräfte (Kohäsionskräfte) innerhalb eines Stoffes kann man sich modellhaft wie folgt vorstellen:

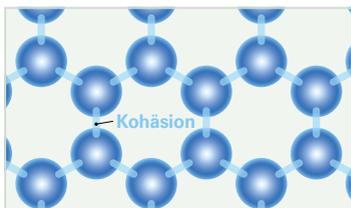


Bild 4: Eismoleküle

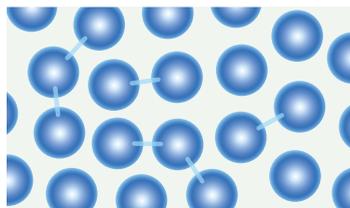


Bild 5: Wassermoleküle

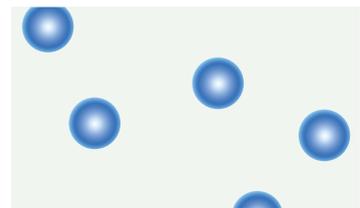


Bild 6: Wasserdampfmoleküle

Bei Feststoffen werden die Moleküle durch die **Kohäsion** zusammengehalten. Je größer diese Kraft ist, desto höher ist die **Festigkeit** des Stoffes.

Die Kräfte im Inneren eines Tropfens heben sich gegenseitig auf. => **freie Verschiebbarkeit** der Moleküle (sehr geringe Kohäsion).

Die Moleküle haben eine hohe Eigenbewegung. Wenn sie gegeneinanderprallen, stoßen sie sich gegenseitig ab. Diesen Vorgang nennt man **Expansion**.

Dieses Modell trifft auf die Mehrzahl aller Stoffe zu.