



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Metallberufe

Werkstoffkunde für Praktiker

**Catrin Kammer
Ulrich Kammer**

10., überarbeitete Auflage

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

Europa-Nr.: 13217

Autoren:

Dr. Catrin Kammer Goslar
Dr. Ulrich Kammer Goslar

Verlagslektorat:

Dr. Astrid Grote-Wolff

Bildbearbeitung:

Verlag Europa-Lehrmittel, Abt. Bildbearbeitung, 73760 Ostfildern
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpfing

10. Auflage 2025
Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-1515-6

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte an produktsicherheit@europa-lehrmittel.de

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

© 2025 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpfing

Umschlag: Verlag Europa-Lehrmittel, Abt. Bildbearbeitung, 73760 Ostfildern

Umschlagfoto: Frau Dr. Catrin Kammer, Herr Dr. Ulrich Kammer, Goslar

Druck: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

Moderne, auf die jeweilige Anwendung exakt zugeschnittene Werkstoffe sind die Voraussetzung für Weiterentwicklungen in der Solartechnik, der Elektromobilität, der Kommunikation, aber auch in altbekannten Bereichen wie der Automobiltechnik, dem Bauwesen sowie dem Maschinen- und Anlagenbau. Doch die Werkstoffkunde hat ihre eigene Sprache. Zahlreiche Fachbegriffe können die Kommunikation zwischen Praktikern, Ingenieuren, Kaufleuten, Metallhändlern und Anwendern erschweren. Das Lehrwerk „**Werkstoffkunde für Praktiker**“ bietet vor diesem Hintergrund einen anschaulichen Einstieg in die Werkstoffkunde für **alle metalltechnischen Berufe**. Es ist aufgrund seines sachlogischen Aufbaus, seiner guten Verständlichkeit und der zahlreichen Illustrationen und Fotos sowohl für den Einsatz im Unterricht als auch für das Selbststudium geeignet.

Das Lehrwerk beinhaltet folgende fachlichen Schwerpunkte:

- **Aufbau und Eigenschaften von Metallen**

Metalle stellen die wichtigste Gruppe innerhalb der Konstruktionswerkstoffe dar. Deshalb werden die Eisenmetalle und die Nichteisenmetalle ausführlich dargestellt. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem Schlüsselwerkstoff des 21. Jahrhunderts: Stahl. Weitere Schwerpunkte sind Aluminium- und Kupferlegierungen.

- **Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffen**

Kunststoffe haben als organische Werkstoffe ein ganz anderes Eigenschaftsprofil als Metalle. Das Kapitel verdeutlicht, wie die wichtigsten Kunststoffe aufgebaut sind, und leitet daraus ab, welche Eigenschaften zu erwarten sind.

- **Aufbau und Eigenschaften von Keramiken**

Keramiken sind eine bewährte Werkstoffgruppe, die sich in die Struktur- und Funktionskeramiken gliedert. Dank neuer Entwicklungen punkten Keramiken sogar im Bereich der Hochleistungswerkstoffe. Vorgestellt werden Herstellungsverfahren und Eigenschaften.

- **Werkstoffprüfung**

Die Prüfung von Werkstoffen erfolgt unter verschiedenen Zielvorgaben. Kennwerte sind zur Auslegung von Konstruktionen sowie für die Einschätzung von neuen Werkstoffentwicklungen, für die Qualitätssicherung sowie für eine eventuelle Schadensfallanalyse notwendig. Das Lehrwerk stellt ausgewählte Werkstoffprüfverfahren vor.

- **Ressourcenschonung und Umweltschutz**

Angesichts der großen Bedeutung von Werkstoffen für den gesellschaftlichen Fortschritt ist die Verfügbarkeit von umweltschonend produzierten Rohstoffen eines der vieldiskutierten Hauptthemen der Gegenwart und damit auch Thema dieses Lehrwerks geworden.

In dieser **10. Auflage** wurden die Texte aktualisiert, insbesondere in Bezug auf das zur Ressourcenschonung wichtige Recycling. Die Ausführungen zur Metallgewinnung und zum Werkstoffeinsatz wurden um wichtige Aspekte ergänzt, beispielsweise zur Minderung von Emissionen sowie zur Substitution bewährter, aber toxischer Werkstoffe. Aktuelle Werkstoffentwicklungen für moderne Elektronikanwendungen werden vorgestellt. Hinzugekommen sind neue aussagekräftige Abbildungen, insbesondere im Bereich der Werkstoffprüfung. Das Lehrwerk bezieht sich mit allen Beispielen auf gültige europäische Normen.

Unseren Lesern wünschen wir viel Freude und Erfolg beim Aufbau und der Erweiterung ihrer Kenntnisse im Bereich der Werkstoffkunde. Hinweise und Anregungen, die zur Weiterentwicklung des Buches beitragen, nehmen Autoren und Verlag gerne unter der Verlagsanschrift sowie per E-Mail unter lektorat@europa-lehrmittel.de entgegen.

Das Periodensystem der Elemente (PSE)

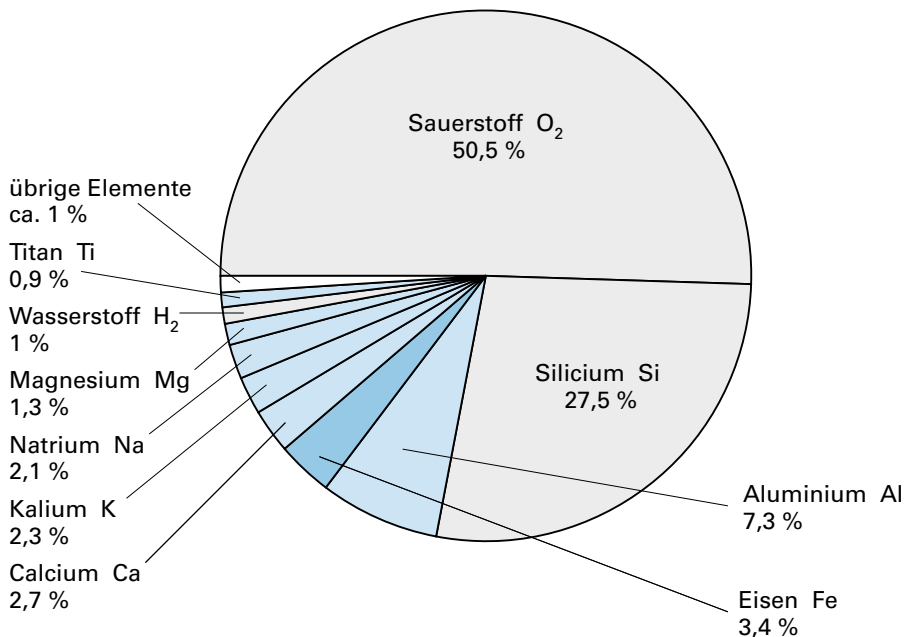
Hauptgruppen 1 2 I A II A		Hauptgruppen																	
		13 III A		14 IV A		15 V A		16 VI A		17 VII A		18 VIII A							
Periode	1																	2 He Helium	
	2	3 Li Lithium																	4 Be Beryllium
	3	11 Na Natrium	12 Mg Magnesium	Nebengruppen										5 B Bor	6 C Kohlenstoff	7 N Stickstoff	8 O Sauerstoff	9 F Fluor	10 Ne Neon
	4	19 K Kalium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titan	23 V Vanadium	24 Cr Chrom	25 Mn Mangan	26 Fe Eisen	27 Co Kobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Kupfer	30 Zn Zink	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsen	34 Se Selen	35 Br Brom	36 Kr Krypton
	5	37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirkon	41 Nb Niob	42 Mo Molybdän	43 Tc Technetium	44 Ru Ruthenium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Silber	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Zinn	51 Sb Antimon	52 Te Tellur	53 I Iod	54 Xe Xenon
	6	55 Cs Caesium	56 Ba Barium	57 La Lanthan	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantal	74 W Wolfram	75 Re Rhenium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platin	79 Au Gold	80 Hg Quecksilber	81 Tl Thalium	82 Pb Blei	83 Bi Bismut	84 Po Polonium	85 At Astat	86 Rn Radon
	7	87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 Ts Tennessin	118 Og Oganesson

Ordnungszahl (Protonenzahl) → 26 → Elementsymbol → Fe → Elementname → Eisen

— Lanthanoide
— Actinoide

Leichtmetalle
 Schwermetalle
 Nichtmetalle
 gasförmig
 flüssig
 instabil

Verteilung der Elemente in der Erdkruste



Inhaltsverzeichnis

1	Einteilung von Werkstoffen	7		
1.1	Rohstoffe, Werkstoffe, Hilfsstoffe	7		
1.2	Einteilung der Werkstoffe	8		
2	Eigenschaften der Werkstoffe	10		
2.1	Mechanische Eigenschaften	10		
2.1.1	Mechanische Werkstoffkennwerte	10		
2.1.2	Zugversuch	12		
2.1.3	Druckversuch	16		
2.1.4	Härteprüfung	16		
2.1.5	Kerbschlagprüfung	19		
2.1.6	Dauerfestigkeitsprüfung	21		
2.2	Physikalische Eigenschaften	22		
2.3	Chemische Eigenschaften	24		
2.4	Technologische Eigenschaften	24		
2.5	Umweltrelevante Eigenschaften	25		
3	Metallische Werkstoffe	26		
3.1	Die metallische Bindung	26		
3.2	Die Gewinnung von Metallen	27		
3.2.1	Reduktion mit Kohlenstoff und Kohlenstoffmonoxid	29		
3.2.2	Reduktion mit anderen Elementen (Metallothermie)	30		
3.2.3	Röstreduktion	30		
3.2.4	Elektrolyse	31		
3.2.5	Metallgewinnung durch Schmelzflusselektrolyse	31		
3.3	Aufbau der Metalle	33		
3.3.1	Gefügebau	33		
3.3.2	Kristallgitter der Metalle	34		
3.3.3	Gitterbaufehler – Realstruktur	35		
3.4	Erstarrung von metallischen Schmelzen	43		
3.5	Verfestigung	48		
3.5.1	Verfestigungsmechanismen	48		
3.5.2	Kaltverfestigung	49		
3.5.3	Korngrenzenverfestigung	51		
3.5.4	Mischkristallverfestigung	52		
3.5.5	Teilchenverfestigung	54		
3.5.6	Überlagerung von Verfestigungsmechanismen	56		
3.6	Thermisch aktivierte Vorgänge	57		
3.6.1	Wärmebehandlung	57		
3.6.2	Diffusion	58		
3.6.3	Erholung und Rekristallisation	60		
3.6.4	Technische Bedeutung von Rekristallisationsvorgängen	66		
3.7	Zustandsdiagramme	68		
3.7.1	Abkühlungskurven	69		
3.7.2	Aufstellen eines Zustandsdiagramms	70		
3.7.3	System mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand	71		
3.7.4	System mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und mit fehlender Löslichkeit im festen Zustand (eutektisch)	74		
3.7.5	System mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und teilweiser Löslichkeit im festen Zustand (eutektisch)	76		
3.8	Eisenwerkstoffe	79		
3.8.1	Reines Eisen	79		
3.8.2	Kohlenstoff als Legierungselement des Eisens	81		
3.8.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm	84		
3.8.4	Weitere Legierungselemente im Stahl	89		
3.8.5	Gusseisen	92		
3.8.6	Erzeugung von Stahl und Gusseisen aus Roheisen	96		
3.9	Wärmebehandlung des Stahls	99		
3.9.1	Diffusionsgesteuerte Wärmebehandlungsverfahren	100		
3.9.1.1	Normalglühen	100		
3.9.1.2	Weichglühen (GKZ-Glühen)	101		
3.9.1.3	Spannungsarmglühen	103		
3.9.1.4	Grobkornglühen	104		
3.9.1.5	Rekristallisationsglühen	104		
3.9.1.6	Diffusionsglühen	105		
3.9.2	Diffusionslose Verfahren: Härten	107		
3.9.2.1	Umwandlung von Austenit zu Ferrit	108		
3.9.2.2	Martensitische Umwandlung	109		
3.9.2.3	Bainitbildung	111		
3.9.2.4	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm (ZTU-Diagramm)	112		
3.9.2.5	Einfluss von Legierungselementen	116		
3.9.2.6	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramm (ZTA-Diagramm)	118		
3.10	Anlassen und Vergüten	121		
3.11	Oberflächenhärten	123		
3.11.1	Randschichthärten	123		
3.11.2	Thermochemisches Behandeln	125		
3.11.2.1	Einsatzhärten	125		
3.11.2.2	Nitrieren	127		
3.12	Eigenschaften und Verwendung der Stähle	129		
3.12.1	Einteilung der Stähle	129		
3.12.1.1	Einteilung in Hauptgüteklassen	129		
3.12.1.2	Metallografische Stahlklassen	130		
3.12.1.3	Einteilung nach Verwendung	131		
3.12.2	Baustähle	132		

3.12.2.1	Allgemeine Baustähle	132	3.15.4	Nachbehandlung von Sinterteilen . . .	185
3.12.2.2	Schweißgeeignete Feinkorn- baustähle	133	3.15.5	Verschiedene Sinterwerkstoffe . . .	185
3.12.2.3	Federstähle	134	4	Nichtmetallische Werkstoffe. . .	187
3.12.2.4	Vergütungsstähle	135	4.1	Kunststoffe.	187
3.12.2.5	Einsatzstähle	135	4.1.1	Allgemeine Eigenschaften	187
3.12.2.6	Nitrierstähle	135	4.1.2	Einteilungsmöglichkeiten	188
3.12.2.7	Warmfeste und hitzebeständige Stähle.	136	4.1.3	Syntheseverfahren	189
3.12.2.8	Kaltzähe Stähle	137	4.1.4	Eigenschaftsänderungen bei Kunststoffen.	191
3.12.2.9	Automatenstähle	138	4.1.5	Technisch bedeutsame Kunststoffe .	193
3.12.2.10	Nichtrostende Stähle	139	4.2	Konstruktionsklebstoffe	199
3.12.3	Werkzeugstähle	143	4.2.1	Theorie des Klebens	199
3.12.3.1	Kaltarbeitsstähle	143	4.2.2	Einteilungsmöglichkeiten von Konstruktionsklebstoffen	199
3.12.3.2	Warmarbeitsstähle	144	4.2.3	Klebevorgang	200
3.12.3.3	Schnellarbeitsstähle	145	4.2.4	Technisch bedeutsame Konstruktionsklebstoffe	200
3.13	Bezeichnungen und Normung von Eisenwerkstoffen.	147	4.3	Keramiken	201
3.13.1	Stahlkennzeichnung mit Kurznamen	148	5	Verbundwerkstoffe	203
3.13.1.1	Kennzeichnung der Stähle nach der Verwendung oder den mechanischen oder physikalischen Eigenschaften .	148	5.1	Werkstoffverbunde	203
3.13.1.2	Kennzeichnung der Stähle nach der chemischen Zusammensetzung . .	152	5.2	Metal Matrix Composites (MMC)	204
3.13.2	Kennzeichnung der Stähle durch Werkstoffnummern.	155	6	Hilfsstoffe	206
3.13.3	Kennzeichnung von Gusseisen . . .	156	6.1	Schleif- und Poliermittel	206
3.14	Nichteisenmetalle.	158	6.2	Abschreckmittel.	207
3.14.1	Aluminium und Aluminiumlegierungen.	158	6.3	Schmierstoffe	208
3.14.1.1	Reines Aluminium	159	6.4	Schneid- und Kühlmittelöle . . .	209
3.14.1.2	Aluminiumlegierungen.	160	7	Korrosion und Korrosionsschutz	210
3.14.1.3	Benennung und Normung von Aluminiumlegierungen.	161	7.1	Arten der Korrosion	210
3.14.1.4	Wärmebehandlung von Aluminium und Aluminiumlegierungen	164	7.2	Erscheinungsformen der Korrosion	211
3.14.1.5	Korrosionsverhalten von Aluminium	167	7.3	Korrosionsschutz	212
3.14.2	Kupfer und Kupferlegierungen . . .	168	8	Werkstoffprüfverfahren	215
3.14.2.1	Reines Kupfer	169	8.1	Metallografische Untersuchungen.	215
3.14.2.2	Kupferlegierungen	172	8.2	Röntgenografische Untersuchungen.	219
3.14.2.3	Benennung und Normung von Kupferlegierungen	172	8.3	Schleiffunkenprobe und Spektralanalyse	219
3.14.2.4	Kupfer-Zinklegierungen (Messing) .	174	8.4	Oberflächenprüfungen nach dem Eindringverfahren	220
3.14.2.5	Kupfer-Zinnlegierungen (Bronze, Zinnbronze)	177	8.5	Röntgenprüfung.	222
3.14.2.6	Kupfer-Zinn-Zinklegierungen (Rotguss).	178	8.6	Gammastrahlenprüfung	223
3.14.2.7	Kupfer-Nickel-Zinklegierungen (Neusilber).	179	8.7	Ultraschallprüfung	224
3.14.2.8	Wärmebehandlung von Kupferlegierungen	179	8.8	Magnetische Rissprüfung	225
3.14.3	Weitere wichtige NE-Metalle	179	9	Recycling	227
3.15	Pulvermetallurgie	182	9.1	Recycling von Metallen.	228
3.15.1	Herstellung der Pulver	183	9.2	Recycling von Kunststoffen . . .	228
3.15.2	Formgebung der Pulver	184	9.3	Recycling von Glas und Keramik	229
3.15.3	Sintern	184		Sachwortverzeichnis	230

1 Einteilung von Werkstoffen

Werkstoffe sind für die Menschheit sehr wichtig, denn aus ihnen entstehen z. B. Werkzeuge, Anlagen, Bauwerke, Kult- und Schmuckgegenstände und auch Waffen. Die große Bedeutung der Werkstoffe zeigt sich auch in der Tatsache, dass geschichtlich wichtige Zeiträume nach den jeweils dominierenden Werkstoffen benannt werden. Bekannt sind die Steinzeit, die Kupfer- und Bronzezeit sowie die Eisenzeit. Kupfer beispielsweise war das Metall, aus dem die steinzeitlichen Menschen zum ersten Mal Gebrauchsgegenstände herstellten. Der Grund: Kupfer kann mitunter auch als gediegenes, d. h. reines Metall in der Natur gefunden werden, es muss also nicht immer aus Erzen erschmolzen werden. Zudem lässt sich Kupfer leicht bearbeiten.

1.1 Rohstoffe, Werkstoffe, Hilfsstoffe

Werkstoffe, die in der Werkstatt oder im Betrieb ver- und bearbeitet werden, kommen in dieser Form in der Natur nicht vor. Dort werden, wie im **Bild 1** verdeutlicht, **Naturstoffe** gefunden, die durch menschliche Arbeit zu **Rohstoffen** umgesetzt werden. Rohstoffe können sowohl aus der belebten Natur kommen, wie z. B. Holz oder Bambus, oder aber auch in der Erdkruste gefunden werden, z. B. als Erz, Erdöl oder Erdgas.

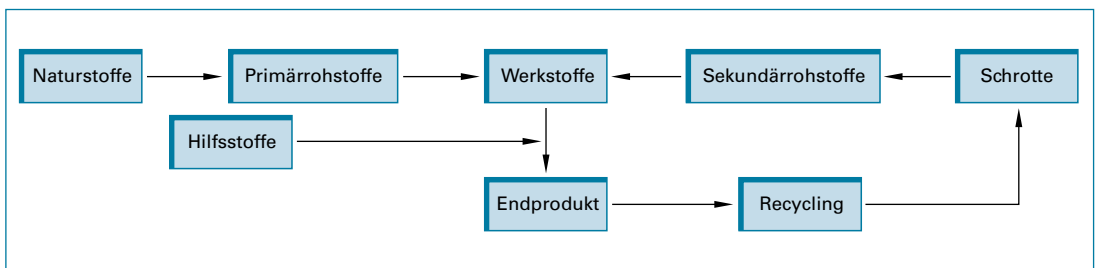


Bild 1: Zusammenhang zwischen den Begriffen „Naturstoff“, „Rohstoff“, „Werkstoff“ und „Hilfsstoff“

Aus der Natur stammende Rohstoffe, die das erste Mal in den Produktionsprozess gelangen, werden als **Primärrohstoffe** bezeichnet. Im Gegensatz dazu zählen Rohstoffe, die erneut in den Produktionsprozess kommen, zu den **Sekundärrohstoffen**. Beispiele sind Metallschrotte, Altglas oder Altkunststoffe.

Natürliche Werkstoffe, wie z. B. Holz, Marmor oder Graphit, haben eine ähnliche Zusammensetzung wie die Rohstoffe, aus denen sie hergestellt werden. Um als Werkstoff genutzt zu werden, müssen diese Stoffe lediglich aufbereitet oder bearbeitet werden. Beispielsweise werden Holzstämmen zu Balken zersägt.

Hauptsächlich jedoch werden **künstliche Werkstoffe** eingesetzt, die durch chemische Reaktionen aus Rohstoffen erzeugt werden. Eisen wird z. B. gewonnen, indem den Eisenerzen der enthaltene Sauerstoff entzogen wird. Kupfererze enthalten zumeist Schwefel als Begleitelement, der ebenfalls in einer chemischen Reaktion entfernt wird. Kunststoffe entstehen durch eine chemische Synthese aus Erdöl oder Erdgas, Glas hingegen wird aus Quarzsand, Kalk und Soda erzeugt.

Werkstoffe werden aus **Rohstoffen** hergestellt und zu **Fertigprodukten** verarbeitet.

Hilfsstoffe sind im Produktionsprozess erforderlich, um aus Werkstoffen **Fertigprodukte** herzustellen, sie gehen aber in das Fertigprodukt nicht ein. Ein Beispiel ist die Formgebung eines Werkstücks mithilfe von Schleifmitteln.

Hilfsstoffe sind zur Herstellung von **Fertigprodukten** aus **Werkstoffen** notwendig, finden sich aber nicht im Fertigprodukt wieder.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der verwendeten Begriffe mit einigen Beispielen.

Tabelle 1: Stoffe in Industrie und Technik

Stoffe	Erklärung	Beispiele
Naturstoffe	In der Natur vorkommende Stoffe	Erdöl, Kohle, Wolle, gediegene Metalle wie Gold, Silber, Kupfer
Rohstoffe	Ausgangsstoffe für den Herstellungsprozess von Werkstoffen	Primärrohstoffe geschlagenes Holz, abgebaute Kohle, gefördertes Erdöl/Erdgas, abgebaute Metallerze Sekundärrohstoffe Altstoffe: Metallspäne, Schrotte, Altpapier, Altreifen, Altglas und Alttextilien
Werkstoffe	Stoffe zur Herstellung von Werkstücken, Werkzeugen und Halbzeugen	Natürliche Werkstoffe Holz, Graphit, Marmor Künstliche Werkstoffe Metalle, Nichtmetalle, Verbundwerkstoffe, Kunststoffe, keramische Werkstoffe
Fertigprodukte	Werkstücke, Werkzeuge, Halbzeuge	Motorblock, Rohr, Blech, Profil, Draht
Hilfsstoffe	Stoffe, die den Prozess vom Naturstoff zum Fertigprodukt aufrecht erhalten, aber nicht in das Fertigprodukt eingehen	Schmierstoffe, Schleifmittel, Schneidöle, Kühlmittel, Trennmittel, Treib- und Brennstoffe, Härtemittel, Reinigungsmittel

1.2 Einteilung der Werkstoffe

Wie ein Werkstoff eingesetzt wird, hängt vor allem von seinen Eigenschaften ab. Wichtige Kriterien sind die physikalischen Eigenschaften (z. B. Dichte, Festigkeit), aber auch die chemischen (z. B. Korrosionsbeständigkeit) und die technologischen Eigenschaften (z. B. Verarbeitbarkeit). Zu beachten sind auch der Preis, die Verfügbarkeit und die Möglichkeit des späteren Recyclings.

In der Regel soll eine optimale Kombination vieler positiver Eigenschaften zum Tragen kommen, wie z. B. beim Aluminium: Dieses Metall hat eine niedrige Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit. Der Preis ist im Verhältnis zu anderen Metallen moderat, die Verarbeitbarkeit und die Korrosionsbeständigkeit sind gut. Zum Recycling stehen ausgereifte Erfassungssysteme und Technologien bereit. Daher ist Aluminium in der Automobilfertigung sowie im Flugzeugbau unverzichtbar. Aufgrund seiner Leitfähigkeit und Festigkeit wird es als Freileitungssseil zur Stromübertragung eingesetzt. Die gute Korrosionsbeständigkeit, Umformbarkeit, Bedruckbarkeit und wiederum die geringe Dichte machen Aluminium zu einem idealen Verpackungswerkstoff.

Der **Einsatz eines Werkstoffes** wird von seinen Eigenschaften, der Verfügbarkeit, dem Preis und der Recycelbarkeit bestimmt.

Bild 1, Seite 9, zeigt die heute übliche Einteilung der Werkstoffe. Die größte technische Bedeutung haben hierbei die **Metalle**, insbesondere aufgrund ihrer in der Regel hohen Festigkeit, ihrer guten Verformbarkeit und ihrer hervorragenden Recycelbarkeit. Je nach ihrer technischen Bedeutung unterteilt man die Metalle in die **Eisenmetalle** und **Nichteisenmetalle** (NE-Metalle).

Eisenmetalle leiten sich vom Element Eisen ab. Je nach ihrer Verarbeitung werden sie in umformbare Werkstoffe eingeteilt, bekannt als **Stahl**. Zum Gießen gut geeignete Eisenwerkstoffe heißen **Gusseisen**.

Nichteisenmetalle sind alle anderen Metalle. Sie werden nach ihrer Dichte in **Leichtmetalle** (Dichte unter $4,5 \text{ g/cm}^3$) und deren Legierungen und **Schwermetalle** (Dichte über $4,5 \text{ g/cm}^3$) und deren Legierungen unterschieden. Unter dem Begriff **Buntmetalle** werden alle Schwermetalle verstanden, die keine **Edelmetalle** sind. Sie weisen mitunter beeindruckende Farben (kupferrot, goldgelb) auf. Wichtiger Hinweis: Der Begriff Schwermetall ist kein Hinweis auf eine eventuelle Giftigkeit des Metalls. Blei, Cadmium und Quecksilber sind giftig, das Schwermetall Zink ist hingegen eines der essenziellen, d. h. für das Leben wichtigen Elemente.

Nichtmetalle werden eingeteilt in die **organisch-nichtmetallischen** und die **anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffe**. Die größte Bedeutung in der Gruppe der nichtmetallischen Werkstoffe haben die **Kunststoffe** und die **Keramiken**.

Verbundwerkstoffe sind eine Verbindung von mindestens zwei Werkstoffen aus gleichen oder unterschiedlichen Gruppen. Beispiele sind glasfaserverstärkte Kunststoffe oder mit Siliciumcarbidteilchen verstärktes Aluminium. Die Kombination verschiedener Werkstoffe in einem Material zielt auf eine optimale Kombination positiver Eigenschaften ab.

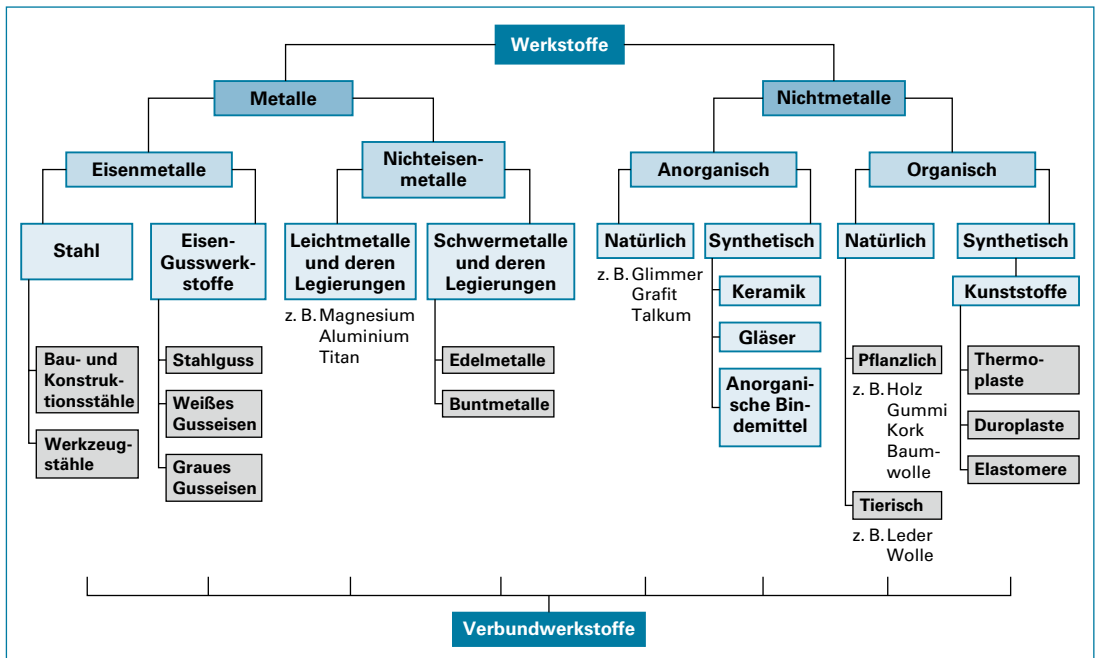


Bild 1: Einteilung der Werkstoffe

Aufgaben

1. Erläutern Sie den Unterschied zwischen primären und sekundären Rohstoffen!
2. Welche Kriterien rechtfertigen den Einsatz dünner Aluminiumfolie als Verpackungswerkstoff für Schokoladenhohlfiguren?
3. Nennen Sie einige typische Nichteisenmetalle!
4. Was verspricht man sich von der Kombination verschiedener Werkstoffe in einem Verbundwerkstoff?
5. Sind Schwermetalle stets giftig?

2 Eigenschaften der Werkstoffe

Um beurteilen zu können, ob sich ein Werkstoff für eine bestimmte Anwendung eignet, müssen seine physikalischen, mechanischen, technologischen und chemischen Eigenschaften bekannt sein. Beispiele für wichtige Werkstoffeigenschaften enthält **Tabelle 1**. Diese Eigenschaften hängen vom inneren Aufbau des Werkstoffs ab, der sich durch das Herstellungsverfahren und die Verarbeitung verändern und auch gezielt beeinflussen lässt.

Tabelle 1: Wichtige Werkstoffeigenschaften

Mechanisch	Physikalisch	Chemisch	Technologisch	Umweltrelevant
<ul style="list-style-type: none"> • Festigkeit <ul style="list-style-type: none"> – statisch – Warmfestigkeit – Schwingfestigkeit • Verformbarkeit • Härte • Zähigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Dichte • Wärmedehnung • Wärmeleitfähigkeit • elektrische Leitfähigkeit • optische Eigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsbeständigkeit • Hitzebeständigkeit • Reaktionsfähigkeit • Entflammbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Gießbarkeit • Umformbarkeit • Schweißbarkeit • Härbarkeit • Zerspanbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Recyclbarkeit • Toxizität • Treibhauspotenzial

2.1 Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften bestimmen in wesentlicher Weise den Einsatz eines Werkstoffes in Konstruktionen, da sie Aussagen darüber liefern, welche Belastungen der Werkstoff ohne Schädigung ertragen kann.

2.1.1 Mechanische Werkstoffkennwerte

Eine der wichtigsten Kenngrößen der Werkstoffe ist die **Festigkeit**. Ganz allgemein ist darunter der Widerstand zu verstehen, den ein Werkstoff einer Formänderung durch äußere Kräfte entgegensetzt. Bekannt ist, dass bei einem festen, harten Werkstoff von außen eine große Kraft für die Formänderung, z. B. durch Verbiegen, aufgebracht werden muss. Bei einem weichen Material genügt dafür hingegen eine kleinere äußere Kraft.

Die **Festigkeit eines Werkstoffes** ist der Widerstand gegen eine äußere Formänderung.

Je nachdem, wie der Werkstoff belastet wird, werden unterschiedliche Festigkeitswerte betrachtet:

Abschleppseile, Ketten oder auch Schrauben sind typische Beispiele für die Zugbelastung eines Werkstoffes. In diesen Fällen ist die Bestimmung der **Zugfestigkeit** wichtig. Dafür wird das zu prüfende Material in seiner Längsrichtung durch Zugkräfte bis zum Bruch beansprucht (**Bild 1**).

Lagerwerkstoffe, Fundamente oder Maschinengestelle werden hingegen auf Druck beansprucht. Hier gilt der Ermittlung der **Druckfestigkeit** besonderes Interesse. Bestimmt wird die Widerstandsfähigkeit von Werkstoffen gegen Druckkräfte (**Bild 2**).

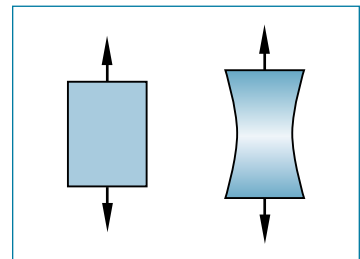


Bild 1: Zugbeanspruchung

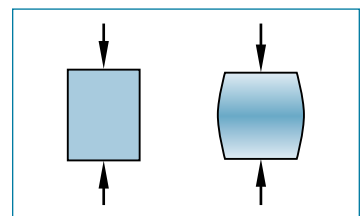


Bild 2: Druckbeanspruchung

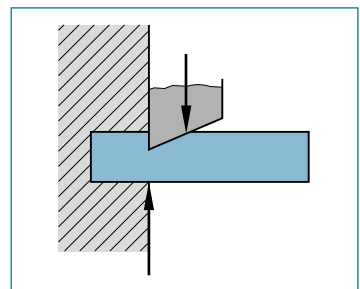


Bild 3: Scherbeanspruchung

Bei der Festlegung der **Scherfestigkeit** wird der Widerstand ermittelt, den der Werkstoff einer Verschiebung in einer Querschnittsfläche entgegensetzt. Dabei tritt eine Scherbeanspruchung ein. Diese Belastungsform findet sich z. B. beim Abscheren von Blechen oder der Beanspruchung von Nieten (**Bild 3, Seite 10**).

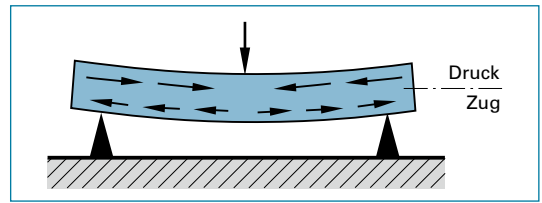


Bild 1: Biegebeanspruchung

Träger in Konstruktionen werden vielfach auf Biegung beansprucht (**Bild 1**). Zur sicheren Auslegung muss daher die **Biegefestigkeit** des Werkstoffes bekannt sein. Bestimmt wird der Widerstand, den Werkstücke bei einer Durchbiegung zeigen. Der Werkstoff wird dazu an einer Seite auf Zug und auf der anderen Seite auf Druck belastet.

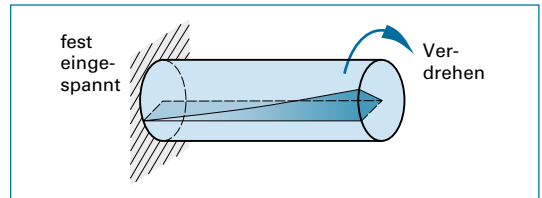


Bild 2: Torsionsbeanspruchung

Sich drehende Bauteile, wie z. B. Schiffswellen, Kurbelwellen oder Bohrer, müssen einer Torsionsbelastung standhalten. Bei der in diesem Fall notwendigen Prüfung der **Torsionsfestigkeit** (**Bild 2**) wird der Widerstand ermittelt, den ein Werkstück gegenüber verdrehenden Kräften zeigt.

An schlanken Bauteilen, z. B. Pleuelstangen, oder auch an ganzen schlanken Konstruktionen, z. B. Leitungsmasten, ist der Widerstand gegen Knicken von Interesse. An den Bauteilen können hier Druckkräfte in Richtung der Längsachse angreifen, bis eine Ausknickung oder der Bruch erfolgt. Bei der Bestimmung der **Knickfestigkeit** (**Bild 3**) werden die Proben dabei vorwiegend auf Druck beansprucht.

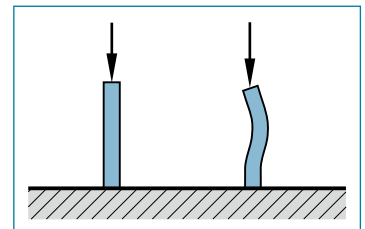


Bild 3: Knickbeanspruchung

Die bisher gezeigten Kenngrößen bezogen sich alle auf die Festigkeit des Werkstoffes. Aber auch das **Verformungsverhalten** eines Werkstoffes kann wichtig sein, z. B. dann, wenn er noch weiter verformt werden soll oder Energie absorbieren soll (z. B. beim Crash).

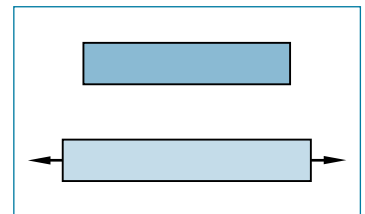


Bild 4: Beanspruchung auf Dehnung

Die **Dehnbarkeit (Dehnung)** eines Werkstoffes ist seine Fähigkeit, bei einer Krafteinwirkung seine Form zu verändern (**Bild 4**).

Gut vorstellen lässt sich dies am Beispiel der Dehnung einer **Feder**. Die beim Dehnen erfolgende Verformung ist **elastisch**, d. h., nach Entlastung nimmt die Feder ihre ursprüngliche Form wieder an (**Bild 5**). Dementsprechend wird unter der **Elastizität** eines Werkstoffes die Eigenschaft verstanden, nach einer Belastung wieder die Ausgangsform anzunehmen. Gummi, Kautschuk und sogar Stahl sind innerhalb bestimmter Grenzen unterschiedlich elastisch.

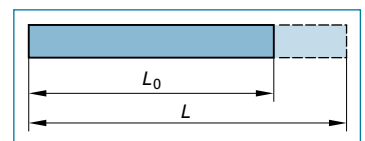


Bild 5: Elastizität von Werkstoffen

Ist eine Verformung hingegen dauerhaft, d. h. bleibt sie auch nach Entlastung erhalten, spricht man von einer **plastischen Verformung** (**Bild 6**). Beispielsweise kann eine metallische Feder durch eine zu große Kraft überdehnt und damit bleibend verformt werden.

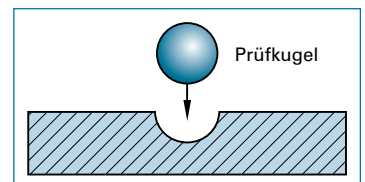


Bild 6: Plastische (bleibende) Verformbarkeit von Werkstoffen

Die „zu große Kraft“, die zur bleibenden Formänderung führt, wird durch die **Elastizitätsgrenze** gekennzeichnet – eine Kenngröße, die z. B. im Zugversuch als **Dehngrenze** bestimmt wird (siehe Kapitel 2.1.2). Die Kenntnis der Elastizitätsgrenze ist notwendig, um eine tragende Konstruktion nicht zu großen Kräften auszusetzen, die zu Formänderungen führen würden. Im Fall einer gewünschten Formänderung, beispielsweise beim Hämmern eines Metalls in eine bestimmte Form, muss hingegen eine Kraft über der Elastizitätsgrenze angewendet werden.

Eine Verformung kann **plastisch** (bleibend, irreversibel) oder **elastisch** (nicht bleibend, reversibel) erfolgen.

Werkstoffe können sich bei Umformungen sehr unterschiedlich verhalten. Zähle Werkstoffe wie reines Blei und Kupfer können bei einer Krafteinwirkung vor der Zerstörung erhebliche Formänderungen hinnehmen. Dieses Verhalten wird als **Zähigkeit** bezeichnet.

Spröde Werkstoffe, wie Glas, Keramik oder Grauguss, zeigen bei einer Krafteinwirkung bis zur Zerstörung keine bleibende Formänderung. Sie brechen bei einer bestimmten Kraft, ohne sich vorher zu dehnen, man spricht von **Sprödigkeit**.

Auch die **Härte** gestattet Aussagen über die Festigkeit eines Werkstoffes. Unter der Härte wird der Widerstand verstanden, den ein Material dem Eindringen eines anderen härteren Körpers entgegensetzt (**Bild 1**). Diamant ist z. B. sehr hart, Blei ist hingegen sehr weich.

Mechanische Kennwerte für die genannten Eigenschaften werden in der Regel mit genormten Prüfverfahren ermittelt. Nachfolgend sollen beispielhaft die für das Verständnis wichtigsten Verfahren beschrieben werden. Für weitere und spezielle Prüfverfahren sei auf die entsprechenden Normen und auf die Literatur verwiesen.

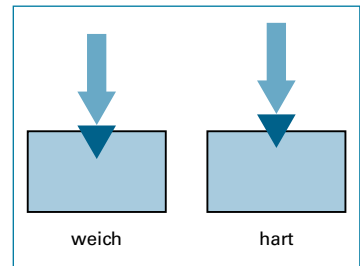


Bild 1: Härte von Werkstoffen

2.1.2 Zugversuch

Bei allen Verfahren der **Festigkeitsprüfung** wird entsprechend **Bild 1, Seite 10**, die Kraft gemessen, die aufzubringen ist, um eine bestimmte Formänderung zu erreichen.

Die wichtigste Methode zur Bestimmung der Festigkeit von Werkstoffen ist der **Zugversuch** nach ISO 6892. Eine genormte Zugprobe (**Bild 1, Seite 13**) wird in eine Zugprüfmaschine (**Bild 2**) eingespannt und mit zunehmender Zugkraft gleichmäßig so lange verformt, bis der Bruch der Probe eintritt.

Geprüft werden Flachzugstäbe und Rundzugstäbe – je nachdem, ob Bleche oder kompaktere Materialien geprüft werden. Es ist auch üblich, spezielle Zugstäbe zu gießen. Dies ist dann notwendig, wenn die Zugfestigkeit eines Gussteils geprüft werden soll.

Die Stababmessungen sind in der Norm festgelegt. Bei Flachzugstäben wird z. B. je nach Blechdicke eine bestimmte Messlänge eingehalten. Die genormten Zugproben haben ein bestimmtes Verhältnis von Messlänge zu Durchmesser gemäß L_0/d_0 (L_0 -Ausgangslänge vor dem Versuch, d_0 -Durchmesser vor dem Versuch). Sie heißen daher **Proportionalstäbe**.

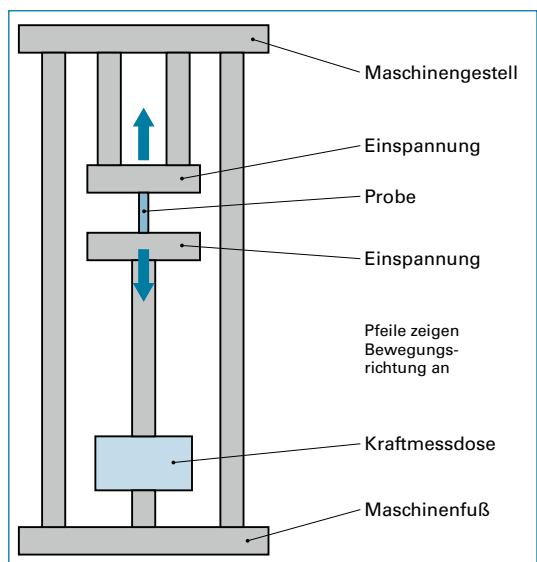


Bild 2: Zugprüfmaschine, schematisch

Die Norm legt fest:

Langer Proportionalstab: $L_0 = 10 \cdot d_0$

Kurzer Proportionalstab: $L_0 = 5 \cdot d_0$

Während des Zugversuchs werden Zugkraft und Verlängerung gemessen und von der Maschine als **Kraft-Verlängerungs-Diagramm (Bild 2)** aufgezeichnet. Da die hier ablesbaren Werte von der Probegeometrie abhängig sind, müssen die Messwerte auf die Ausgangsmaße bezogen werden (Formeln s. **Tabelle 1, Seite 15**):

- die jeweils wirkende Zugkraft auf den Ausgangsquerschnitt A_0 als Spannung σ
- und die Verlängerung ΔL auf die Ausgangsmesslänge L_0 als Dehnung ε .

Die grafische Darstellung dieser Werte ergibt das **Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Bild 3)**.

Im ersten Teil des Spannungs-Dehnungs-Diagramms ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Festigkeit und Dehnung, die **Hookesche Gerade**. Die in diesem Bereich auftretende Verformung ist **elastisch**, d. h. reversibel. Nach einer Entlastung stellt sich, wie bei einer Feder, wieder der ursprüngliche Materialzustand ein. Im Bereich der Hookeschen Geraden gilt das **Hookesche Gesetz**

$$R_{p0,2} = E \cdot \varepsilon$$

worin der Proportionalitätsfaktor E als **Elastizitätsmodul** bezeichnet wird. E entspricht dem Anstieg der Hookeschen Geraden und ist ein Maß für den Widerstand, den ein Werkstoff einer elastischen Verformung entgegensetzt.

Tabelle 1 zeigt Beispielwerte für die E-Module verschiedener Werkstoffe. Es gilt: Je größer der Elastizitätsmodul E, desto geringer ist die elastische Verformung des Werkstoffes unter einer Krafteinwirkung.

Das **Hookesche Gesetz** gilt im Bereich der **elastischen Verformung** eines Werkstoffes.

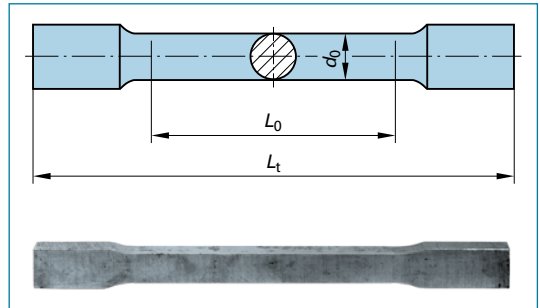


Bild 1: Zugprobe

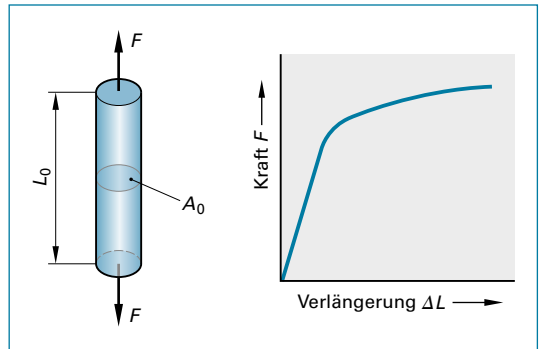


Bild 2: Versuchsanordnung und aufgenommenes Kraft-Verlängerungsdiagramm

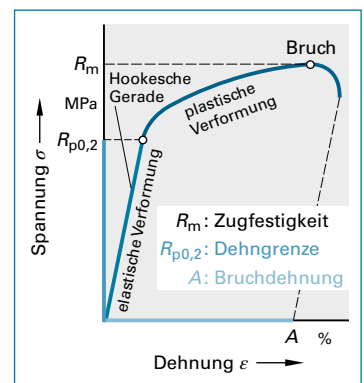


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Tabelle 1: Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe

Stoffe	Elastizitätsmodul E in MPa	Stoffe	Elastizitätsmodul E in MPa
Nickel	213000	Cu-Zn-Legierungen (Messing)	80000 ... 125000
Eisen	210000	Thermoplaste	100 ... 450
Aluminiumlegierungen	60000 ... 80000	Elastomere	10 ... 100
Magnesiumlegierungen	40000 ... 45000	Glas	70000 ... 80000
Titanlegierungen	112000 ... 130000	Holz, parallel zur Faserrichtung	9000 ... 16000

Das Aussehen des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes ist damit vom Werkstoff abhängig. **Bild 2, n**, zeigt ein typisches Bild, das für die meisten Metalle gilt. Kontinuierlich linear steigt die Spannung im Bereich der **Hookeschen Gerade** und damit der **elastischen Verformung** an. Genau dann, wenn die Kurve abknickt, d. h. flacher verläuft, beginnt die **plastische**, d. h. bleibende Verformung. Die **Elastizitätsgrenze** σ_E bzw. **Dehngrenze** $R_{p0,2}$ ist erreicht.

Mit weiter zunehmender Kraft wird der Kurvenverlauf flacher. Schließlich erfolgt nach einer mehr oder weniger ausgeprägten plastischen Verformung der **Bruch**. Bei stark verformungsfähigen Metallen (z. B. Reinaluminium, Baustähle) ist ein Spannungsmaximum im Spannungs-Dehnungs-Diagramm zu beobachten. Nach Überschreiten des Spannungsmaximums schnürt sich die Probe an der schwächsten Stelle innerhalb der Messlänge ein und bricht verhältnismäßig schnell (**Bild 1**).

Sehr dehnbare Werkstoffe zeigen ein ähnliches Diagramm, es ist jedoch noch sehr viel breiter als das der Metalle (**Bild 2, unten**).

Bei **unlegierten Stählen** gibt es eine Besonderheit – die **Streckgrenze**. Ein entsprechendes Beispieldiagramm zeigt **Bild 3**. In der Kurve gibt es hier eine ausgeprägte Unstetigkeit, die den Übergang zwischen elastischer und plastischer Verformung markiert. Die mit dem Formelzeichen R_e gekennzeichnete Streckgrenze kann mit Kraftschwankungen stark ausgeprägt sein, dass, wie **Bild 2** zeigt, eine obere Streckgrenze R_{eH} (*H*, engl. *high*: hoch) und eine untere Streckgrenze R_{eL} (*L*, engl. *low*: tief) bestimmt werden können.

Spröde Werkstoffe wie Keramiken, Glas oder bestimmte Gusseisensorten haben **Spannungs-Dehnungs-Diagramme ohne (nennenswertes) plastisches Verformungsvermögen**. Wie **Bild 4** zeigt, weicht die Spannungs-Dehnungs-Kurve nicht oder nur wenig von der Hookeschen Geraden ab. Die Proben brechen bei sehr niedriger Bruchdehnung und praktisch ohne Brucheinschnürung. Eine plastische Verformung ist bei diesen Werkstoffen von außen kaum oder überhaupt nicht zu beobachten. Daher wird bei solchen Werkstoffen eine Streck- bzw. Dehngrenze nicht angegeben.



Bild 1: Zugproben nach Bruch
oben: Rundstab aus Stahl – gut zu erkennen ist die **Einschnürung in der Mitte**
unten: Flachstab aus Kupfer, nahezu ohne **Einschnürung gebrochen**

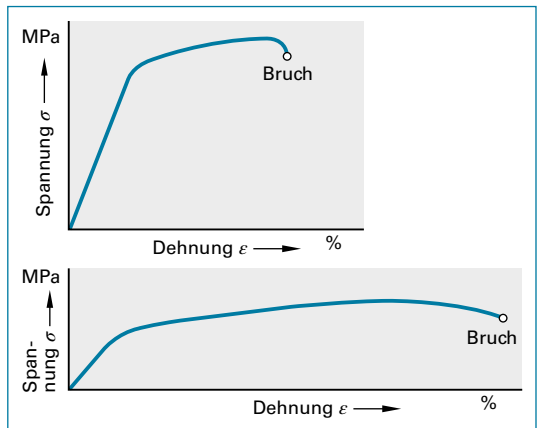


Bild 2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Metall (oben), für sehr dehnbare Material (unten)

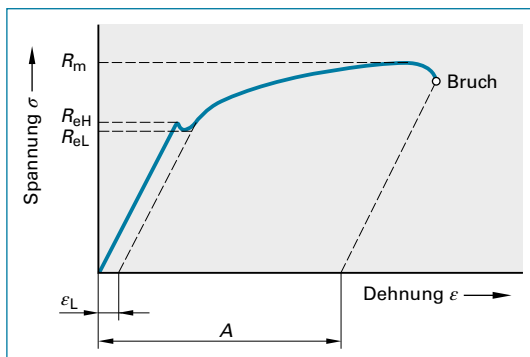


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze

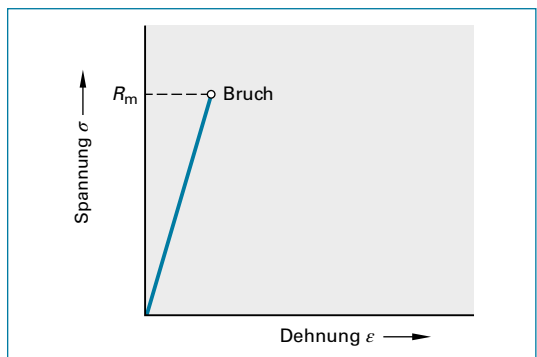


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines spröden Werkstoffes

Das **Aussehen des Spannungs-Dehnungs-Diagramms** ist vom Werkstoff abhängig.

Beim Zugversuch werden folgende Werkstoffkenngrößen bestimmt (**Tabelle 1**):

Tabelle 1: Werkstoffkenngrößen

Begriffe und Definitionen	Formel
Die Zugspannung σ (Nennspannung) ist allgemein die auf den Ausgangsquerschnitt S_0 einer Probe bezogene Zugkraft F .	$\sigma = \frac{F}{S_0}$ (in N/mm ² bzw. MPa)
Die Zugfestigkeit R_m ist die höchste bis zum Bruch auftretende Spannung. Sie ist die auf den Ausgangsquerschnitt S_0 der Probe bezogene Höchstkraft F_m .	$R_m = \frac{F_m}{S_0}$ (in N/mm ² bzw. MPa)
Die Dehnung ε ist die Längenänderung ΔL bezogen auf die Ausgangsmesslänge L_0 . Sie wird in % angegeben.	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100 \%$ (in %)
Die Streckgrenze ist dann erreicht, wenn bei gleichbleibender Spannung eine merkliche Dehnung erfolgt. Tritt gar kein Spannungsabfall ein, unterscheidet man zwischen unterer R_{eL} und oberer Streckgrenze R_{eH} .	$R_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0}$ (in N/mm ² bzw. MPa) $R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$ (in N/mm ² bzw. MPa)
Die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ ist die Spannung, bei der eine bleibende Dehnung von 0,2 Prozent erfolgt. Ihr Wert entspricht etwa der oberen Streckgrenze R_{eH} .	$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0}$ (in N/mm ² bzw. MPa)
Die Bruchdehnung A ist die bleibende Längenänderung ΔL_r nach dem Bruch der Probe bezogen auf die Ausgangsmesslänge L_0 . Sie wird in % angegeben. Die Bezeichnung A_5 gilt für den kurzen, die Bezeichnung $A_{11,3}$ für den langen Proportionalstab.	$A = \frac{\Delta L_r}{L_0} \cdot 100 \%$ (in %)
Die Brucheinschnürung Z ist die bleibende Querschnittsänderung ΔS nach dem Bruch der Probe, bezogen auf den Ausgangsquerschnitt S_0 . Auch sie wird in % angegeben.	$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100 \%$ (in %)

Die Zugfestigkeit und die Dehn- bzw. Streckgrenzen kennzeichnen die **Festigkeit** des Werkstoffes als Widerstand gegen äußere Formänderung, die Dehnung und die Einschnürung hingegen die **Zähigkeit**, d. h. die Verformbarkeit des Werkstoffes. **Tabelle 2** zeigt typische Festigkeits- und Zähigkeitskennwerte ausgewählter Werkstoffe.

Tabelle 2: Zugfestigkeitskennwerte ausgewählter Metalle

Werkstoff	R_m in MPa	R_e bzw. $R_{p0,2}$ in MPa	A in %
Reinaluminium EN AW-Al 99,5	20	90	38
Unlegierter Baustahl S235JR	390	235	26
Gusseisen EN-GJS-500-7	500	320	7
Gusseisen EN-GJL-300	350	Wird nicht angegeben	0
Reines Kupfer (99,99% Cu)	200 ... 250	40 ... 120	30 ... 40
Reines Magnesium	100 ... 180	90 ... 120	2 ... 10

2.1.3 Druckversuch

Die Prüfung im **Druckversuch** (DIN 50106) spielt vor allem bei der Untersuchung von spröden Werkstoffen, wie z. B. Grauguss oder Beton, eine wichtige Rolle. Aber auch bei Werkstoffentwicklungen wie Metallschäumen ist dieses Prüfverfahren von großer Bedeutung. Der Druckversuch stellt praktisch eine Umkehrung des Zugversuchs dar. Er erfolgt in der Regel in Universalprüfmaschinen, mit denen auch Zugversuche durchgeführt werden können. Für den Druckversuch wird eine zylindrische Probe mit einer stetig zunehmenden Druckkraft so lange gestaucht, bis ein Anriss bzw. der Bruch eintritt oder eine bestimmte Stauchung erreicht wird. Die Probe kann sich dabei zur Seite hin frei ausdehnen.

Zur Prüfung metallischer Werkstoffe verwendet man in der Regel zylindrische Proben mit einem Durchmesser von 10 mm bis 30 mm (**Bild 1**). Wegen der Gefahr des Ausknickens sollte für das Verhältnis von Höhe h_0 und Durchmesser d_0 der Druckprobe gelten: $1 \leq h_0/d_0 \leq 2$ (Stähle $h_0/d_0 = 1,5$).

Vergleichbar dem Zugversuch kann beim Druckversuch ein dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm vergleichbares **Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm** aufgenommen werden (**Bild 2**). Folgende Kennwerte werden bestimmt:

- die Druckfestigkeit σ_{dB} ,
- die Quetschgrenze (Druckfließgrenze) σ_{dF} ,
- die Stauchgrenze $\sigma_{d0,2}$ oder σ_{d2} ,
- die Bruchstauchung ε_{dB} sowie
- die relative Bruchquerschnittsvergrößerung ψ_{dB}

Bezüglich der Formeln zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte sei auf die Norm verwiesen.

Die **Quetschgrenze** entspricht der Streckgrenze im Zugversuch. Auch beim Druckversuch gibt es eine Besonderheit: So tritt z. B. bei weichen Stählen eine Ausbauchung auf. Die Druckfestigkeit ist hier nicht festzustellen, weil der weiche Prüfkörper flachgedrückt wird, ohne dabei zerstört zu werden.



Bild 1: Probenveränderung beim Zugversuch

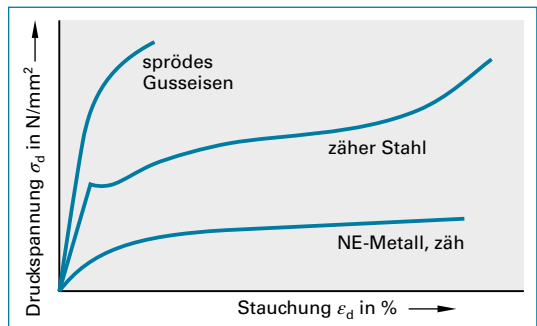


Bild 2: Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm

2.1.4 Härteprüfung

Ein sehr weit verbreitetes Prüfverfahren ist die Prüfung der **Härte**. Sie erlaubt mit relativ kleinem Aufwand eine schnelle Abschätzung der Festigkeit eines Werkstoffes, denn für diese Härteprüfung ist keine besonders angefertigte Probenform notwendig.

Die Härte ist der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt.

Darauf beruht auch die bekannte Härteprüfung von Mineralien nach Mohs. Die **Mohs-Härteskala** (**Bild 3**) besteht aus zehn unterschiedlichen Mineralien, gestaffelt von Härte 1 (ganz weich, Talk) über Gips mit der Härte 2 und dem schon recht harten Quarz mit der Härte 7 zum härtesten bekannten Mineral, dem Diamant mit der Härte 10. Durch Ritzen der zu prüfenden Mineralien bzw. Gesteine mit den Prüfmineralien der Härteskala wird die Härte bestimmt.



Bild 3: Härteskala nach Mohs

Die **Härte** ist der Widerstand, den ein Körper dem Eindringen eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt.

Bei Metallen kommen spezielle Härteprüfmaschinen zum Einsatz. Alle Verfahren beruhen auf dem Eindringen eines speziellen Prüfkörpers mit einer bestimmten Prüfkraft. Der sich auf der Probe ergebende Eindruck wird ausgemessen und der eigentliche Härtewert bestimmt.

Am weitesten verbreitet sind Prüfverfahren mit statischer Krafteinwirkung, d. h., die Prüfkraft wird stoßfrei und sehr langsam aufgebracht. Je nach verwendetem Prüfkörper werden unterschiedliche statische Härteprüfverfahren unterschieden:

- Härteprüfung nach Brinell (DIN EN ISO 6506),
- Härteprüfung nach Vickers (DIN EN ISO 6507),
- Härteprüfung nach Rockwell (DIN EN ISO 6508).

Bei der **Brinellhärte** wird eine Hartmetallkugel (Durchmesser 1; 2,5; 5 oder 10 mm) mit einer bestimmten Prüfkraft F senkrecht in die glatte, gereinigte Probenoberfläche hineingedrückt (**Bild 1**). Die Prüfkraften schwanken zwischen 9,087 N und 29 420 N. Sie werden vom zu prüfenden Werkstoff und dem Kugeldurchmesser bestimmt. Bei der Prüfung wird die Kugel so lange in das Prüfstück gepresst, bis der Werkstoff nicht mehr fließt. Das ist bei Stahl nach etwa 10 Sekunden, bei Nichteisenmetallen nach rund 30 Sekunden der Fall. Dann wird durch zwei Messungen der Durchmesser des bleibenden Eindrucks bestimmt und der mittlere Kugelindruckdurchmesser festgelegt.

Die Brinellhärte ergibt sich dann als Quotient aus Prüfkraft F und der Eindruckoberfläche A (Kugelindruck). Sie kann mit folgender Formel berechnet, den entsprechenden Tabellen der Norm oder einer App entnommen werden.

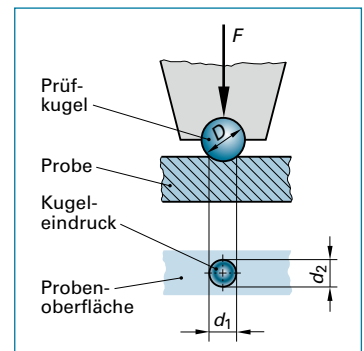


Bild 1: Härteprüfung nach Brinell

$$HBW = 0,102 \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{2 F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Hierin bedeuten:

HBW : Härtewert nach Brinell (Hartmetallkugel)

F : Prüfkraft (in N),

A : Eindruckoberfläche (in mm^2),

D : Durchmesser der Prüfkugel (in mm),

d : mittlerer Eindruckdurchmesser (in mm)

Die vollständige normgerechte Angabe eines Härteprüfergebnisses nach Brinell zeigt **Bild 2**.

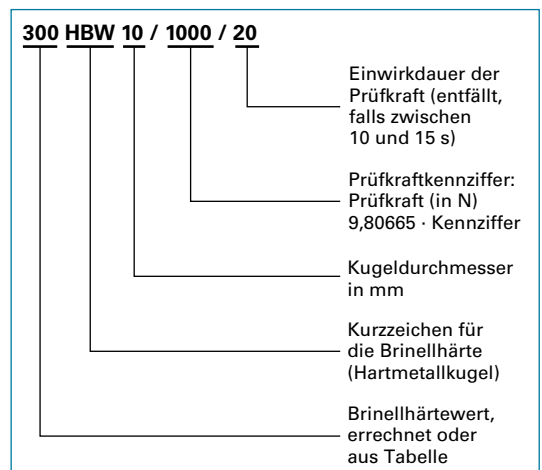


Bild 2: Normgerechte Angabe eines Brinell-Härtewertes (Beispiel)

Zur Ermittlung der **Brinellhärte** wird eine Hartmetallkugel als Prüfkörper verwendet.

Die **Härteprüfung nach Vickers (Bild 1)** ist der Brinellhärteprüfung ähnlich, als Prüfkörper wird jedoch eine Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche und einem Flächenwinkel von 136° verwendet. Die Prüfkraft schwankt im Normalfall zwischen 49,03 N und 980,7 N, meist beträgt sie 294,2 N. Bei der Prüfung wird die Pyramide mit der gewählten Prüfkraft so lange in das Prüfstück gepresst, bis der Werkstoff nicht mehr fließt. Das ist bei Stahl nach etwa 10 Sekunden, bei Nichteisenmetallen nach etwa 30 Sekunden der Fall. Dann werden die Eindruckdiagonalen gemessen und die mittlere Diagonallänge bestimmt. Die Vickershärte ist die auf die Prüfkraft bezogene Oberfläche des bleibenden Pyramideneindrucks. Eine Einheitsangabe erfolgt nicht. Auch hier können die Werte aus Tabellen oder einer App abgelesen bzw. nach folgender Formel berechnet werden.

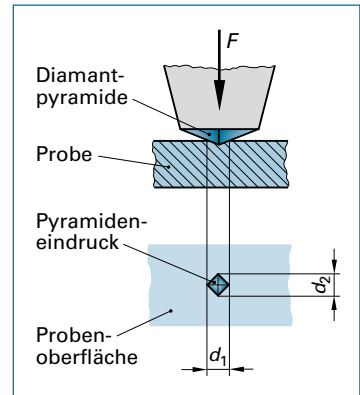


Bild 1: Härteprüfung nach Vickers

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{2 F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Hierin bedeuten:

HV: Härtewert nach Vickers,

F: Prüfkraft (in N),

A: Eindruckoberfläche (in mm²),

d: mittlere Länge der Eindruckdiagonalen (in mm).

Die normgerechte Angabe eines Härteprüfungsergebnisses nach Vickers zeigt **Bild 2**.

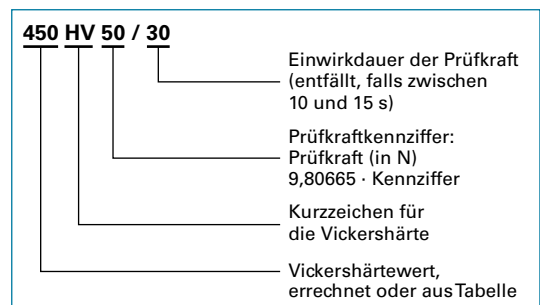


Bild 2: Normgerechte Angabe eines Vickers-Härtewertes (Beispiel)

Anwendung findet die Härtebestimmung nach Vickers bei allen metallischen Werkstoffen unabhängig von deren Härte. Der Pyramideneindruck beschädigt infolge der geringen Pyramideneindringtiefe das Werkstück weniger als ein Kugeleindruck. Mit kleinen Lasten lassen sich sogar die Härten von Folien und dünnen Metallschichten, z. B. Oberflächenschichten, feststellen. Selbst die Prüfung einzelner Bestandteile eines Werkstoffes ist möglich, mit speziellen Härteprüfern sogar unter dem Mikroskop (Mikrohärte).

Zur Ermittlung der **Vickershärte** wird eine Diamantpyramide als Prüfkörper verwendet.

Tabelle 1 zeigt, dass bei den hier geprüften Stählen Brinell- und Vickershärte identisch sind. Diese Übereinstimmung ist bis zu Härtewerten von 300 gegeben. Bei größeren Härten beginnt jedoch die Brinellhärte hinter der Vickershärte zurückzubleiben. Die Ursache dafür liegt in einer dann eintretenden Abplattung der Kugel.

Für andere Werkstoffe gilt dieser Zusammenhang nicht immer. Dann sind spezielle Umwertungstabellen heranzuziehen, diese gibt es z. B. für Kupferwerkstoffe.

Tabelle 1: Daten zur Härtebestimmung nach Brinell und Vickers

Werkstoff	Härteangabe nach Brinell	Härteangabe nach Vickers
C 22	119 HBW 2,5/1839	120 HV 30
C 45	159 HBW 2,5/183	158 HV 30
C 60	206 HBW 2,5/1839	206 HV 30

Bei der **Härteprüfung nach Rockwell** wird ein Diamantkegel mit einem Spitzenwinkel von 120° als Prüfkörper verwendet. Das Härteprüfverfahren unterscheidet sich im Prüfablauf von den oben erläuterten Verfahren, denn hier wird nicht die Größe des Eindrucks, sondern die bleibende Eindringtiefe gemessen. Drei Arbeitsschritte sind notwendig (**Bild 1**):

Der Eindringkörper wird zunächst mit einer bestimmten Vorlast F_0 in die Oberfläche des Prüflings eingedrückt. Dadurch soll der Einfluss eventueller Oberflächenfehler ausgeschlossen werden. Der Prüfkörper dringt dabei um eine Strecke t_0 in den Prüfling ein.

Nun wird die Prüfzusatzkraft F_1 aufgebracht. Der Prüfkörper dringt jetzt um einen weiteren Betrag Δt in die Probe ein. Die Prüfzusatzkraft F_1 ist dabei (ausgehend von der Vorlast) in 2 s bis 8 s aufzubringen und für $4 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$ konstant zu halten.

Im dritten Schritt wird wieder bis auf die Vorlast F_0 entlastet. Dabei bewegt sich der Eindringkörper um den elastischen Anteil der Verformung t_{el} nach oben zurück, sodass die bleibende Eindringtiefe t_{bl} ist. Der Härtewert wird direkt am Härteprüfgerät angezeigt. Ein Beispiel zeigt **Bild 2**.

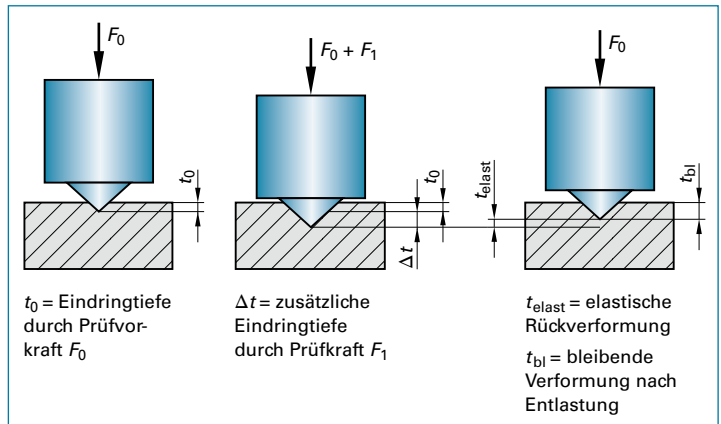


Bild 1: Härteprüfung nach dem Rockwell-Verfahren



Bild 2: Normgerechte Angabe eines Rockwell-Härtewertes (Beispiel)

Zur Ermittlung der **Rockwellhärte** wird ein Diamantkegel verwendet.

2.1.5 Kerbschlagprüfung

Für die Auslegung von Konstruktionen reicht die Festigkeit allein nicht aus. Zusätzlich muss die **Zähigkeit** des Werkstoffes berücksichtigt werden, um die Bildung von Rissen ausschließen zu können. Ein nur festes Metall hat kein oder kein ausreichendes **Verformungsvermögen** mehr, es ist spröde (nicht zäh) und kann reißen. Daher ist für sichere Konstruktionen eine Kontrolle der **Spröbruchsicherheit** notwendig.

Unter der **Zähigkeit** wird allgemein die Fähigkeit des Werkstoffes verstanden, sich unter dem Einfluss von außen einwirkenden Kräften zu verformen, ohne dass ein Anriss oder Bruch auftritt.

Einen ersten Hinweis auf die Zähigkeit eines Werkstoffes geben **Bruchflächen**. Spröde Werkstoffe brechen ohne vorherige Verformung, der Bruch ist scharfkantig. Ein zäher Werkstoff hingegen verformt sich vor dem Bruch, was deutlich an der Bruchfläche zu sehen ist (**Bild 3**).



Bild 3: Vergleich von Zähbruch (links) und Spröbruch (rechts)

Prüfungen der Zähigkeit liefern Bemessungskennwerte. Es gibt verschiedene Verfahren der Zähigkeitsprüfung. Eines der wichtigsten ist der **Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy** (ISO 148-1). Neben dem Zugversuch ist der Kerbschlagbiegeversuch der am häufigsten durchgeführte Versuch der mechanischen Werkstoffprüfung.

Beim Kerbschlagbiegeversuch wird mithilfe eines **Pendelschlagwerks** (Bild 1) in der Regel eine gekerbte Normprobe zerschlagen. Die Probe wird dabei mit der Kerbseite lose an zwei Widerlager angelegt (Bild 2). Zunächst wird der Pendelhammer des Schlagwerks auf eine bestimmte Höhe H angehoben und dann ausgeklinkt. Er fällt nun auf die der Kerbe gegenüberliegende Seite der Probe. Dabei wird die Probe entsprechend ihrer Zähigkeit zerschlagen oder durch die Widerlager hindurchgedrückt (Bild 3). Nach dem Durchschlagen erreicht der Pendelhammer nur noch eine Höhe $h < H$. Mithilfe eines Schleppzeigers an der Prüfmaschine kann die Steighöhe h nach dem Schlag ermittelt werden.

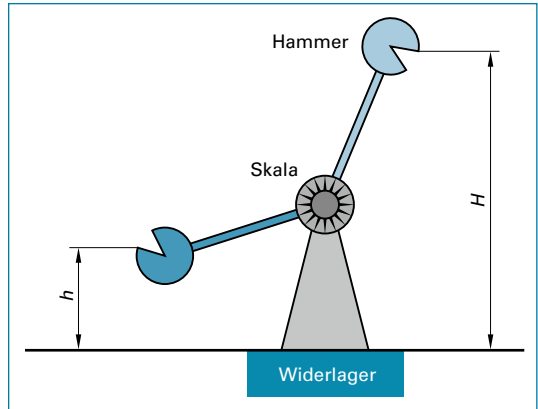


Bild 1: Pendelschlagwerk

Als Maß für die **Zähigkeit** des zu prüfenden Werkstoffs bzw. Werkstoffzustandes wird beim Kerbschlagbiegeversuch die **Arbeit** angesehen, die zum Zerschlagen der Probe (bzw. zum Hindurchdrücken durch die Widerlager) erforderlich ist. Man bezeichnet sie als **Kerbschlagarbeit K** (Einheit: Joule J, Bild 4). Versuchstechnisch ergibt sich die Kerbschlagarbeit K als Differenz der Lageenergien des Pendelhammers (Masse m) vor und nach dem Schlag (Reibungseffekte vernachlässigt):

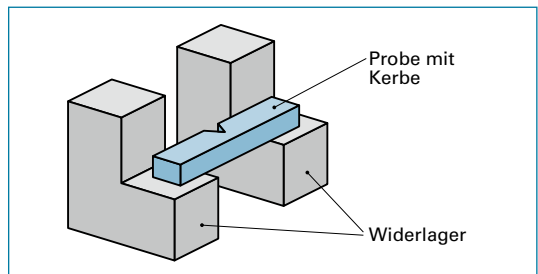


Bild 2: Probenlagerung nach Charpy

$$K = m \cdot g \cdot (H - h)$$

Hierin bedeuten:

- K : Kerbschlagarbeit (in J),
- m : Masse des Pendelhammers (in kg),
- g : Erdbeschleunigung ($g = 9,807 \text{ m/s}^2$),
- H : Fallhöhe des Pendelhammers vor dem Schlag (in m),
- h : Steighöhe des Pendelhammers nach dem Schlag (in m).



Bild 3: Kerbschlagprobe nach dem Versuch

Die **Kerbschlagarbeit** ist ein Maß für die Zähigkeit des Werkstoffs.

Für die Zähigkeitsprüfung verformbarer metallischer Werkstoffe werden immer gekerbte Proben verwendet, da glatte Proben durch den Pendelhammer erst bei sehr tiefen Temperaturen gebrochen werden können.

KV 200 / 75,5 = 87J

- zum Bruch der Probe verbrauchte Schlagarbeit in J
- Probenbreite (Angabe nur, falls abweichend von der Norm)
- Arbeitsvermögen des Pendelschlagwerks (Angabe nur, falls abweichend von 300 J)
- Kurzzeichen der Kerbschlagarbeit KV: ISO Spitzkerbprobe (Charpy-V-Probe)

Bild 4: Angabe der Kerbschlagarbeit