



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Metallberufe

Werkstoffkunde für Praktiker

Catrin Kammer
Ulrich Kammer

9., überarbeitete Auflage

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

Europa-Nr.: 13217

Autoren:

Dr. Catrin Kammer	Goslar
Dr. Ulrich Kammer	Goslar
unter Mitwirkung von	
Marianne Söller	Hohen Neuendorf

Verlagslektorat:

Dr. Astrid Grote-Wolff

Bildbearbeitung:

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

9. Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-1208-7

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

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlagfoto: PPM Pure Metals GmbH, Langelsheim

Druck: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

Vorwort

Ohne Werkstoffe gäbe es keine Solartechnik, keine Elektromobilität, keine moderne Kommunikation. Auch in altbekannten Bereichen geht es nicht ohne Werkstoffe: in der Automobiltechnik, im Bauwesen sowie im Maschinen- und Anlagenbau. Heute ist es dank optimierter Werkstofflösungen möglich, für nahezu jeden Einsatzfall das exakt passende Material zu finden. Doch in der Werkstoffkunde gibt es zahlreiche Fachbegriffe, die mitunter die Kommunikation zwischen Praktikern, Ingenieuren, Kaufleuten, Metallhändlern und Anwendern erschweren. Das Lehrbuch **„Werkstoffkunde für Praktiker“** bietet vor diesem Hintergrund einen anschaulichen Einstieg in die Werkstoffkunde für **alle metalltechnischen Berufe**. Es wurde inhaltlich auf die Ausbildungsvorgaben abgestimmt. Das Buch 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. Auch Anfänger und Quereinsteiger aus der Praxis werden angesprochen. Merksätze sowie Aufgaben zu jedem Kapitel tragen zum Lernerfolg bei.

Das Lehrbuch 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 im Buch ausführlich dargestellt. Der Leser erfährt, wie und warum sich bestimmte Eigenschaftsänderungen erreichen lassen. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem Schlüsselwerkstoff des 21. Jahrhunderts: Stahl. Weitere Schwerpunkte sind Aluminium- und Kupferlegierungen.

- **Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffen**

Kunststoffe gehören in den Bereich der organischen Werkstoffe und haben 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 mittlerweile mit neuen Entwicklungen sogar im Bereich der Hochleistungswerkstoffe aufwarten kann. Vorgestellt werden Herstellungsverfahren und Eigenschaften.

- **Werkstoffprüfung**

Die Prüfung von Werkstoffen erfolgt unter verschiedenen Zielvorgaben. Kennwerte sind zur Auslegung von Konstruktionen sowie für die Einschätzung der Eignung von Neuentwicklungen im Werkstoffbereich notwendig. Das Buch stellt ausgewählte Werkstoffprüfverfahren vor.

- **Recycling von Werkstoffen**

Angesichts der großen Bedeutung von Werkstoffen für den gesellschaftlichen Fortschritt ist die Verfügbarkeit von Rohstoffen eines der viel diskutierten Hauptthemen der Gegenwart geworden. Das Recycling von Werkstoffen erfüllt in diesem Zusammenhang eine wichtige Aufgabe hinsichtlich des Ressourcen- und Umweltschutzes.

In dieser **9. Auflage** wurden die Texte aktualisiert sowie ausgewählte Abbildungen überarbeitet. Das Lehrbuch ist in einer modernen Sprache gehalten und 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.

Inhaltsverzeichnis

1	Einteilung von Werkstoffen	7			
1.1	Rohstoffe, Werkstoffe, Hilfsstoffe .	7	3.7.2	Aufstellen eines Zustandsdiagramms .	70
1.2	Einteilung der Werkstoffe	8	3.7.3	System mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und im festen Zustand.	71
2	Eigenschaften der Werkstoffe . . .	10	3.7.4	System mit vollkommener Löslichkeit im flüssigen und mit fehlender Löslichkeit im festen Zustand (eutektisch)	74
2.1	Mechanische Eigenschaften	10	3.7.5	System mit vollständiger Löslichkeit im flüssigen und teilweiser Löslichkeit im festen Zustand (eutektisch)	76
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	3.8	Eisenwerkstoffe	79
2.3	Chemische Eigenschaften	24	3.8.1	Reines Eisen	79
2.4	Technologische Eigenschaften . .	24	3.8.2	Kohlenstoff als Legierungselement des Eisens	81
2.5	Umweltrelevante Eigenschaften .	25	3.8.3	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm. .	84
3	Metallische Werkstoffe	26	3.8.4	Weitere Legierungselemente im Stahl	89
3.1	Die metallische Bindung	26	3.8.5	Gusseisen	92
3.2	Die Gewinnung von Metallen . . .	27	3.8.6	Erzeugung von Stahl und Gusseisen aus Roheisen	96
3.2.1	Reduktion mit Kohlenstoff und Kohlenstoffmonoxid	29	3.9	Wärmebehandlung des Stahls. . .	99
3.2.2	Reduktion mit anderen Elementen (Metallothermie)	30	3.9.1	Diffusionsgesteuerte Wärmebehandlungsverfahren . . .	100
3.2.3	Röstreduktion	30	3.9.1.1	Normalglühen.	100
3.2.4	Elektrolyse.	31	3.9.1.2	Weichglühen (GKZ-Glühen)	101
3.2.5	Metallgewinnung durch Schmelzflusselektrolyse	31	3.9.1.3	Spannungsarmglühen	103
3.3	Aufbau der Metalle	33	3.9.1.4	Grobkornglühen.	104
3.3.1	Gefügebau	33	3.9.1.5	Rekristallisationsglühen	104
3.3.2	Kristallgitter der Metalle	34	3.9.1.6	Diffusionsglühen	105
3.3.3	Gitterbaufehler – Realstruktur. . . .	35	3.9.2	Diffusionslose Verfahren: Härten .	107
3.4	Erstarrung von metallischen Schmelzen	43	3.9.2.1	Umwandlung von Austenit zu Ferrit	108
3.5	Verfestigung	48	3.9.2.2	Martensitische Umwandlung	109
3.5.1	Verfestigungsmechanismen.	48	3.9.2.3	Bainitbildung	111
3.5.2	Kaltverfestigung	49	3.9.2.4	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm (ZTU-Diagramm).	112
3.5.3	Korngrenzenverfestigung	51	3.9.2.5	Einfluss von Legierungselementen	116
3.5.4	Mischkristallverfestigung	52	3.9.2.6	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramm (ZTA-Diagramm)	118
3.5.5	Teilchenverfestigung	54	3.10	Anlassen und Vergüten.	121
3.5.6	Überlagerung von Verfestigungsmechanismen.	56	3.11	Oberflächenhärten	123
3.6	Thermisch aktivierte Vorgänge . .	57	3.11.1	Randschichthärten	123
3.6.1	Wärmebehandlung	57	3.11.2	Thermochemisches Behandeln . . .	125
3.6.2	Diffusion	58	3.11.2.1	Einsatzhärten	125
3.6.3	Erholung und Rekristallisation. . . .	60	3.11.2.2	Nitrieren	127
3.6.4	Technische Bedeutung von Rekristallisationsvorgängen	66	3.12	Eigenschaften und Verwendung der Stähle	129
3.7	Zustandsdiagramme	68	3.12.1	Einteilung der Stähle	129
3.7.1	Abkühlungskurven	69	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	3.15.3	Sintern	184
3.12.2.1	Allgemeine Baustähle	132	3.15.4	Nachbehandlung von Sinterteilen	185
3.12.2.2	Schweißgeeignete Feinkornbaustähle	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	Die Theorie des Klebens	199
3.12.3.1	Kaltarbeitsstahl	143	4.2.2	Einteilungsmöglichkeiten von Konstruktionsklebstoffen	199
3.12.3.2	Warmarbeitsstahl	144	4.2.3	Klebevorgang	200
3.12.3.3	Schnellarbeitsstahl	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
				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 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.

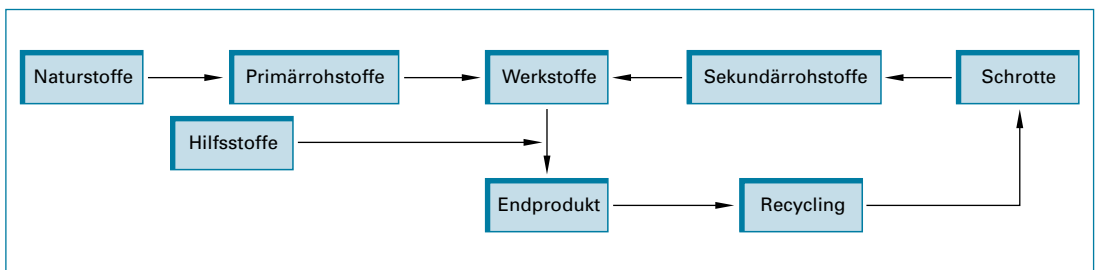


Bild 1: Zusammenhang zwischen den Begriffen „Naturstoff“, „Rohstoff“, „Werkstoff“ und „Hilfsstoff“

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 durch 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 Freileitungseil 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 Recyclbarkeit 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 und ihrer guten Verformbarkeit. Je nach ihrer technischen Bedeutung unterteilt man die Metalle in die **Eisenmetalle** und **Nichteisenmetalle** (NE-Metalle).

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

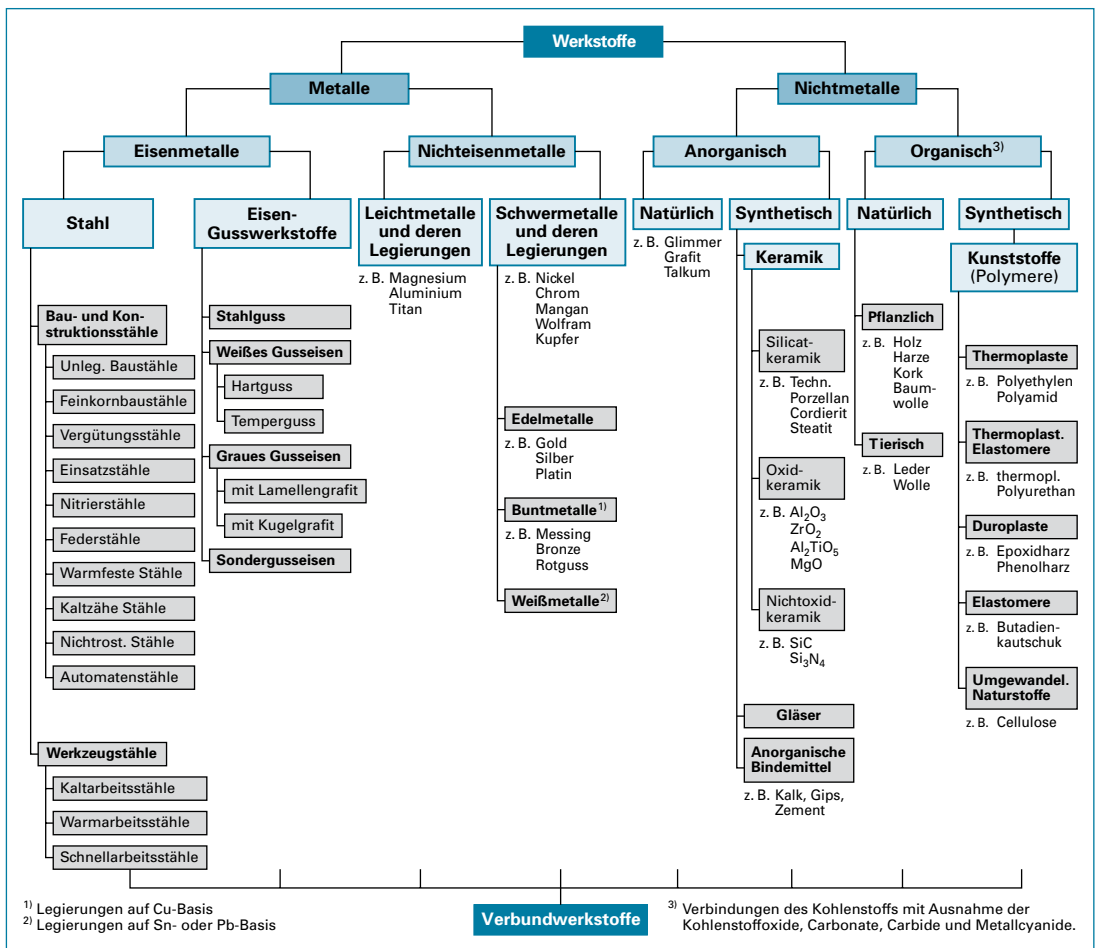


Bild 1: Einteilung der Werkstoffe

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 typischen Nichteisenmetalle!
4. Was verspricht man sich von der Kombination verschiedener Werkstoffe in einem Verbundwerkstoff?

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
• Festigkeit – statisch – Warmfestigkeit – Schwingfestigkeit • Verformbarkeit • Härte • Zähigkeit	• Dichte • Wärmedehnung • Wärmeleitfähigkeit • elektrische Leitfähigkeit • optische Eigenschaften	• Korrosionsbeständigkeit • Hitzebeständigkeit • Reaktionsfähigkeit • Entflammbarkeit	• Gießbarkeit • Umformbarkeit • Schweißbarkeit • Härbarkeit • Zerspanbarkeit	• 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**).

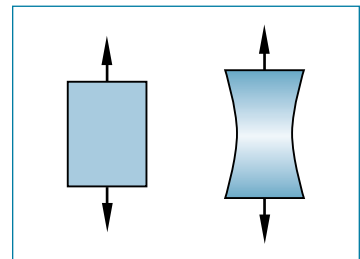


Bild 1: Zugbeanspruchung

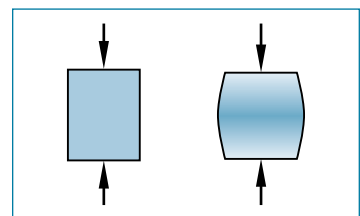


Bild 2: Druckbeanspruchung

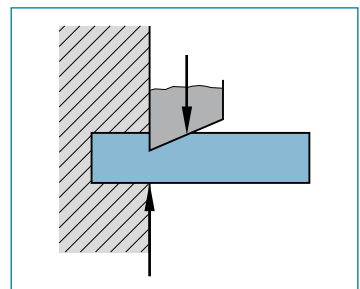


Bild 3: Scherbeanspruchung

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**).

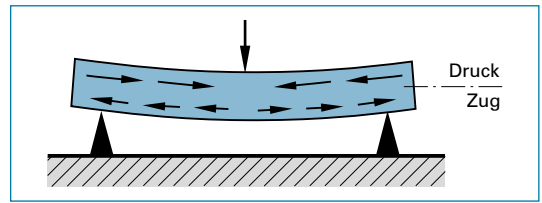


Bild 1: Biegebeanspruchung

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.

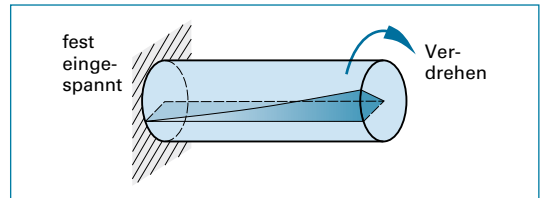


Bild 2: Torsionsbeanspruchung

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 Zug und auf Druck beansprucht.

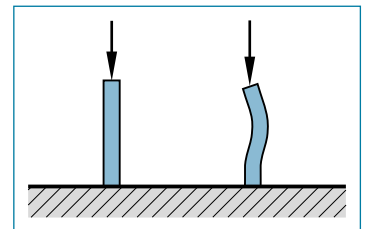


Bild 3: Knickbeanspruchung

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).

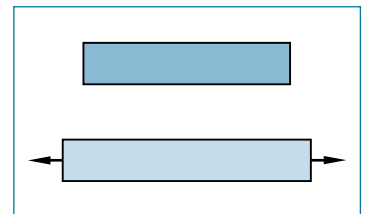


Bild 4: Beanspruchung auf Dehnung

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.

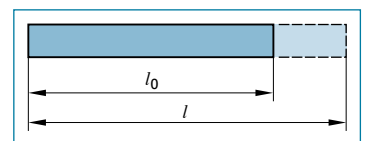


Bild 5: Elastizität von Werkstoffen

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.

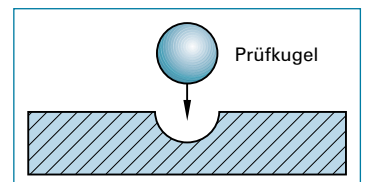


Bild 6: Plastische (bleibende) Verformbarkeit von Werkstoffen

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. Zähe 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.

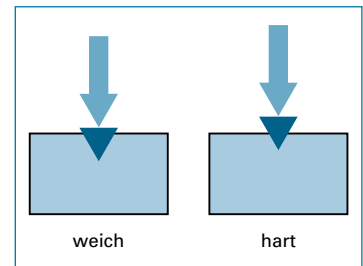


Bild 1: Härte von Werkstoffen

2.1.2 Zugversuch

Bei allen Verfahren der **Festigkeitsprüfung** wird 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 DIN EN 10002. Eine genormte Zugprobe (**Bild 1, Seite 13**) wird in eine Zugprüf- oder Universalprüfmaschine (**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 DIN 50125 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**.

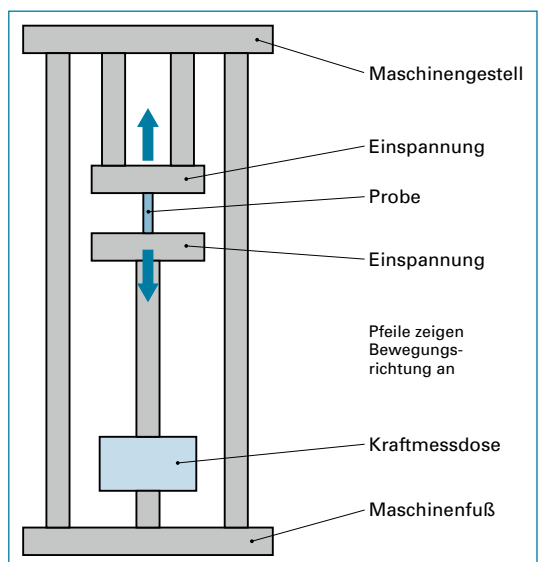


Bild 2: Universalprüfmaschine

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 dann 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 (bis σ_E) auftretende Verformung ist **elastisch**, d. h. reversibel. Nach einer Entlastung stellt sich wieder der ursprüngliche Materialzustand ein. Im Bereich der Hookeschen Geraden gilt das **Hookesche Gesetz**

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

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.

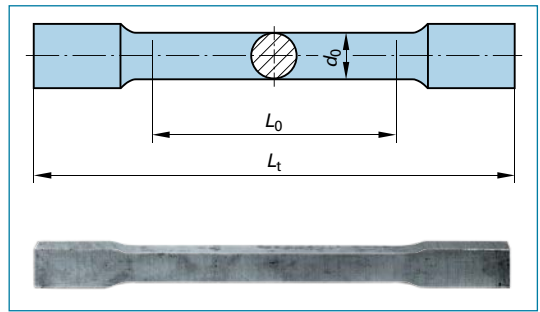


Bild 1: Zugprobe

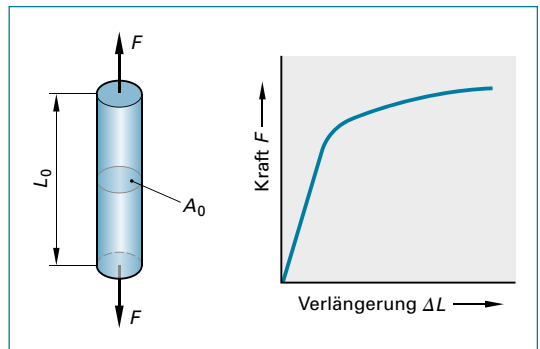


Bild 2: Versuchsanordnung und aufgenommenes Kraft-Verlängerungsdiagramm

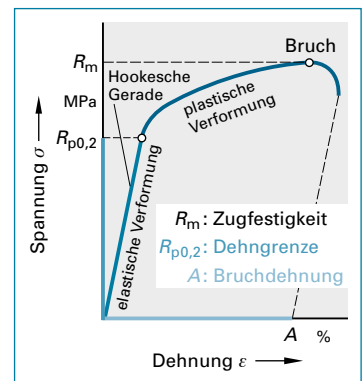


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Tabelle 1: Elastizitätsmodul verschiedener Werkstoffe

Stoffe	Elastizitätsmodul E in MPa	Stoffe	Elastizitätsmodul E in MPa
Nickel	213 000	Cu-Zn-Legierungen (Messing)	80 000 ... 125 000
Eisen	210 000	Thermoplaste	100 ... 450
Aluminiumlegierungen	60 000 ... 80 000	Elastomere	10 ... 100
Magnesiumlegierungen	40 000 ... 45 000	Glas	70 000 ... 80 000
Titanlegierungen	112 000 ... 130 000	Holz, parallel zur Faserrichtung	9 000 ... 16 000

Das Aussehen des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes ist damit vom Werkstoff abhängig. **Bild 3, Seite 13**, 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 so stark ausgeprägt sein, dass, wie **Bild 2** zeigt, eine obere Streckgrenze R_{eH} (H , engl. *higher*: höher) und eine untere Streckgrenze R_{eL} (L , engl. *lower*: tiefer) 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.

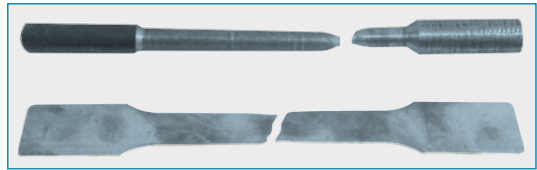


Bild 1: Zugproben nach Bruch
oben: Rundstab aus Stahl – gut zu erkennen ist die **Einschnürung in der Mitte**
unten: Flachstab aus Kupfer, ohne **Einschnürung gebrochen**

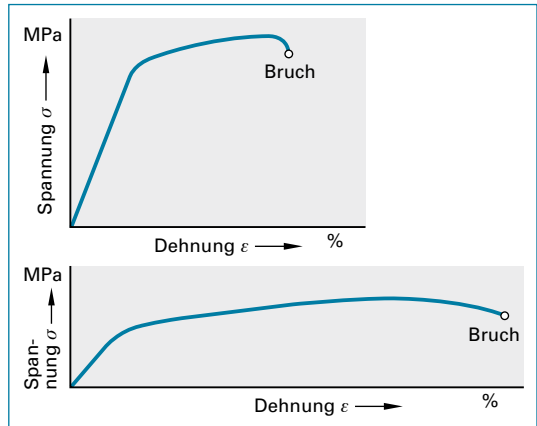


Bild 2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Metall (oben), für sehr dehnbares Material (unten)

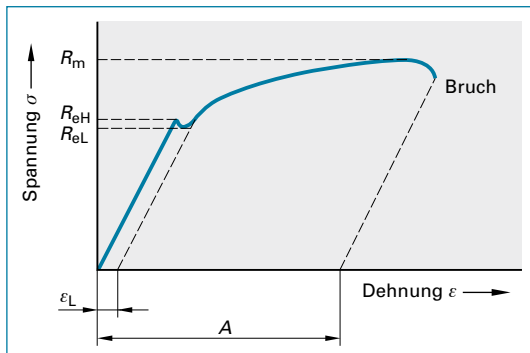


Bild 3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze

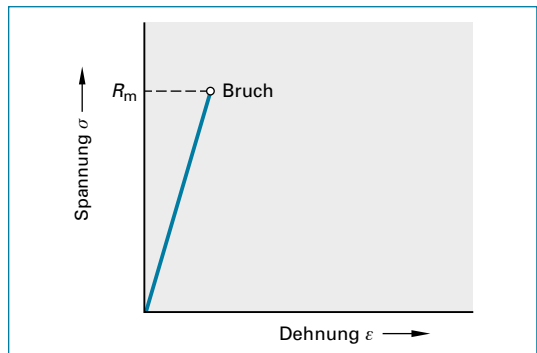


Bild 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines spröden Werkstoffes

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)
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)
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) $R_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0}$ (in N/mm ²)
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)
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. 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 eine dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm vergleichbare **Druckspannungs-Stauchungs-Kurve** aufgenommen werden (**Bild 1**). 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.

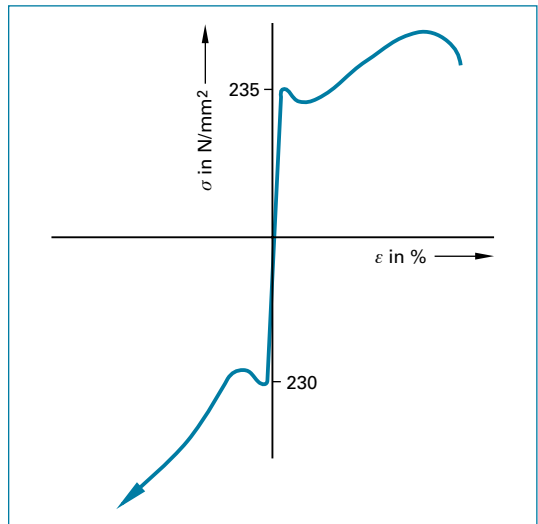


Bild 1: Spannungs-Dehnungs- und Spannungs-Stauchungs-Diagramm

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 2**) 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.



Bild 2: 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 und DIN 50103-3).

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 Prüfkraft 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 Kugелеindruckdurchmesser festgelegt.

Die Brinellhärte ergibt sich dann als Quotient aus Prüfkraft F und der Eindruckoberfläche A (Kuguleindruck). Sie kann errechnet oder den entsprechenden Tabellen in DIN EN ISO 6506-4 entnommen werden. Es gilt folgende Formel zur Berechnung der Brinellhärte:

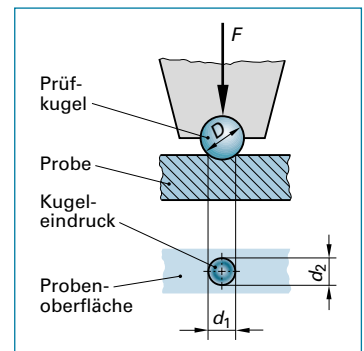


Bild 1: Härteprüfung nach Brinell

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

Hierin bedeuten:

HBW : Härtewert nach Brinell (Hartmetallkugel)

F : Prüfkraft (in N),

A : Eindruckoberfläche (in mm²),

D : Durchmesser der Prüfkugel (in mm),

d : mittlerer Eindruckdurchmesser (in mm)

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

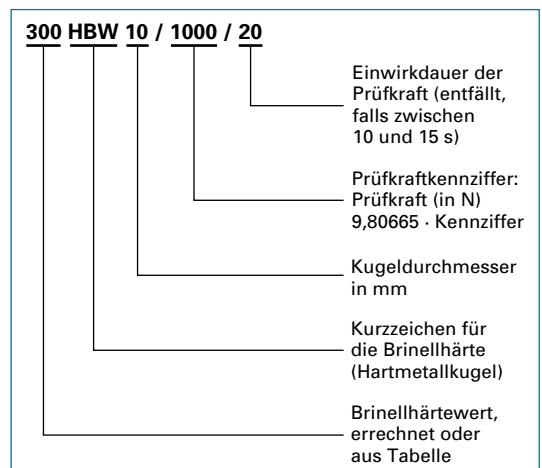


Bild 2: Normgerechte Angabe eines Brinell-Härtewertes (Beispiel)

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

Die **Härteprüfung nach Vickers (Bild 1)** ist in DIN EN ISO 6507-1-3 beschrieben. Das Verfahren 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 abgelesen werden. Es gilt folgende Formel für die Berechnung der Brinellhärte:

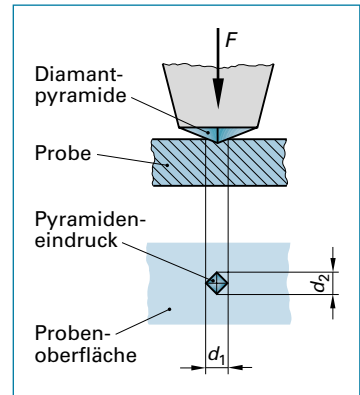


Bild 1: Härteprüfung nach Vickers

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

Hierin bedeuten:

HV: Härtewert nach Vickers,

F: Prüfkraft (in N),

A: Eindruckoberfläche (in mm^2),

d: mittlere Länge der Eindruckdiagonalen (in mm).

Die normgerechte Angabe eines Härteprüfungsergebnisses nach Vickers zeigt Bild 2.

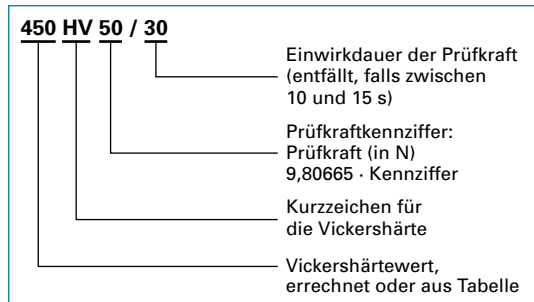


Bild 2: Normgerechte Angabe eines Vickers-Härtewertes (Beispiel)

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.

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 vorhanden und wird durch die Wahl des Spitzenwinkels (über die Flächen gemessen) von 136° erreicht. Bei größeren Härten beginnt jedoch die Brinellhärte hinter der Vickershärte zurückzubleiben. Die Ursache dafür liegt in einer dann eintretenden Abplattung der Kugel.

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

Vickers- und Brinellhärte stimmen bei Stählen bis zu Härtewerten von 300 in etwa überein.

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**.

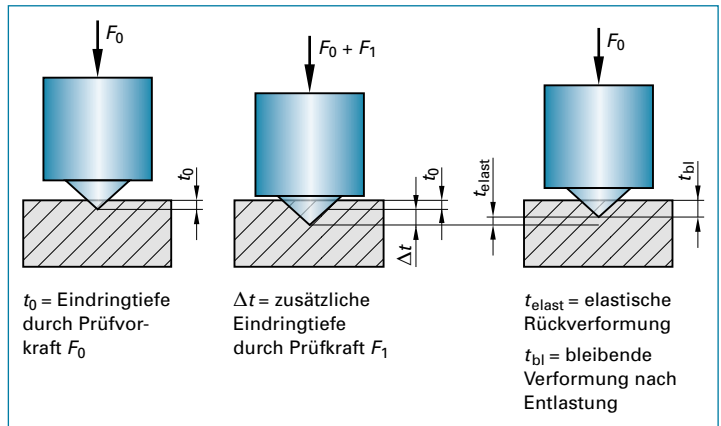


Bild 1: Härteprüfung nach dem Rockwell-Verfahren



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** (DIN EN 10045-1). 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 der Ausschlagwinkel des Pendelhammers und damit die Steighöhe h nach dem Schlag ermittelt werden. Die Auftreffgeschwindigkeit des Pendelhammers auf die Probe beträgt bei metallischen Werkstoffen rund 5 m/s.

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):

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

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).

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

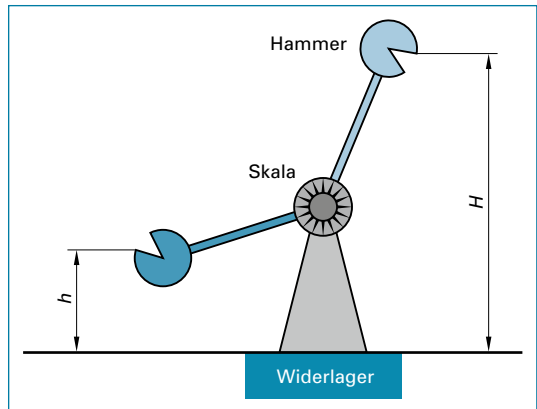


Bild 1: Pendelschlagwerk

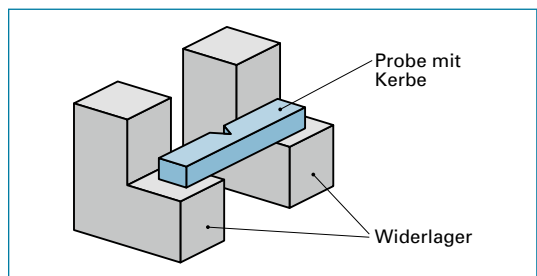


Bild 2: Probenlagerung nach Charpy



Bild 3: Kerbschlagprobe nach dem Versuch

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