

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Werkstoffe I

Allgemeine Grundlagen - Stoffkennwerte

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Herbsttrimester 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Einteilung der Baustoffe	6
1.2	Anforderungen und Eigenschaften von Baustoffen	6
1.3	Geschichtliche Entwicklung [Lit 17]	7
2	Bautechnische Regeln und Bestimmungen	10
2.1	Technische Regeln	10
2.2	Normen	11
2.3	Verwendung neuer Bauprodukte	13
2.3.1	Zulassungen	13
2.3.2	Prüfzeugnisse	14
2.3.3	Zustimmung im Einzelfall	14
2.3.4	Bauregellisten [Lit 3]	14
2.3.5	Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (PÜZ) [Lit 3]	16
2.3.6	Verwendbarkeit und Konformität [Lit 21]	16
3	Masseinheiten und Formelzeichen [Lit 21]	18
4	Masse, Dichte und Porosität [Lit 21]	24
4.1	Masse	24
4.2	Dichten	24
4.2.1	Dichte	24
4.2.2	Rohdichte	24
4.2.3	Die Schüttdichte	24
4.3	Porosität	25
5	Verhalten poröser Feststoffe gegenüber Feuchtigkeit	28
5.1	Allgemeines	28
5.2	Wassergehalt, Feuchtegehalt	29
5.3	Mechanismen des Feuchtetransports in porösen Stoffen	30

5.3.1	Permeation (Durchlässigkeit)	30
5.3.2	Kapillare Wasseraufnahme	32
5.4	Sättigungswert	35
5.5	Luftfeuchte	35
5.6	Hygroskopie, Wasserdampfsorption	38
5.6.1	Hygroskopie	38
5.6.2	Wasserdampfsorption	38
5.7	Wasserdampfdiffusion	40
5.8	Tauwasserbildung [Lit 21]	43
5.9	Wasserabgabe [Lit 21]	44
6	Beständigkeit [Lit 21]	45
6.1	Witterungsbeständigkeit	45
6.2	Frostwiderstand	45
6.3	Zerstörung durch Kristallisationsdruck	45
6.4	Alterung	45
6.5	Chemische Beständigkeit (Korrosionsverhalten)	45
7	Bauphysikalische Eigenschaften	47
7.1	Verhalten gegenüber Wärme und Kälte	47
7.1.1	Einleitung	47
7.1.2	Wärmetechnische Größen	47
7.1.3	Thermische Eigenschaften	48
7.1.4	Arten der Wärmeübertragung	49
7.2	Schall [Lit 21]	57
7.3	Brandverhalten	58
7.3.1	Brandtechnische Bedeutung	58
7.3.2	Brandentstehung und Brandverlauf	59
7.3.3	Brandverhalten von Baustoffen	60

7.3.4	Brandverhalten von Bauteilen	61
8	Formänderung [Lit 21]	64
8.1	Einteilung der Formänderungen	64
8.2	Lastunabhängige Formänderungen	64
8.2.1	Temperaturdehnung (Wärmedehnung)	64
8.2.2	Schwinden und Quellen	65
8.2.3	Schrumpfen und Treiben	65
8.3	Formänderung durch Belastung	66
8.3.1	Allgemeines	66
8.3.2	Elastisches Verhalten	68
8.3.3	Plastisches Verhalten	70
8.3.4	Viskoses Verhalten	73
9	Festigkeit [Lit 21]	80
9.1	Allgemeines	80
9.2	Prüfung der Kurzzeitfestigkeiten	82
9.2.1	Druckfestigkeit	83
9.2.2	Zugfestigkeit	84
9.2.3	Spaltzugfestigkeit	84
9.2.4	Biegefestigkeit	85
9.2.5	Haftfestigkeit	85
9.2.6	Scherfestigkeit	86
9.2.7	Torsionsfestigkeit	86
9.2.8	Schlagfestigkeit	86
9.3	Festigkeit unter statischer Langzeitbeanspruchung (Dauerstandfestigkeit)	87
9.4	Festigkeit bei dynamischer Beanspruchung (Ermüdungsfestigkeit)	88
9.5	Verschleißfestigkeit	90
9.6	Härte	90

10	Kraft- und Wegmessung	92
10.1	Allgemeines	92
10.2	Messung einer Längenänderung	93
10.2.1	Mechanische Messuhr	93
10.2.2	Induktive Wegaufnehmer	94
10.2.3	Dehnmessstreifen	94
10.3	Kraftmessung	95
10.3.1	Elektrische Öldruckgeber	95
10.3.2	Kraftmessdosen	96
11	Materialprüfung	97
11.1	Erfordernis	97
11.2	Arten der Prüfungen	97
11.3	Anforderungen an Prüfverfahren	97
11.4	Beurteilung von Prüfergebnissen	97
11.5	Bewertung von Produkten nach Prüfzeugnissen	98
12	Auswertung von Messergebnissen	99
13	Literatur	102

1 Einleitung

1.1 Einteilung der Baustoffe

Die Begriffe „Werkstoff“ und „Baustoff“ werden im Bauwesen synonym für die Materialien benutzt, mit denen Bauteile und Bauwerke errichtet werden. Unter dem Oberbegriff der Baustoffe sammeln sich zahlreiche Stoffe an, die sich aufgrund ihrer chemischen Grundstruktur einzelnen Gruppen zuordnen lassen. Aus der Verbindung der Basisgruppen sind im Laufe der Zeit eine Vielzahl neuer Werkstoffe, der so genannten „Verbundwerkstoffe“, entstanden. Bild 1 zeigt beispielhaft eine mögliche Zusammenfassung zu verschiedenen Baustoffgruppen.

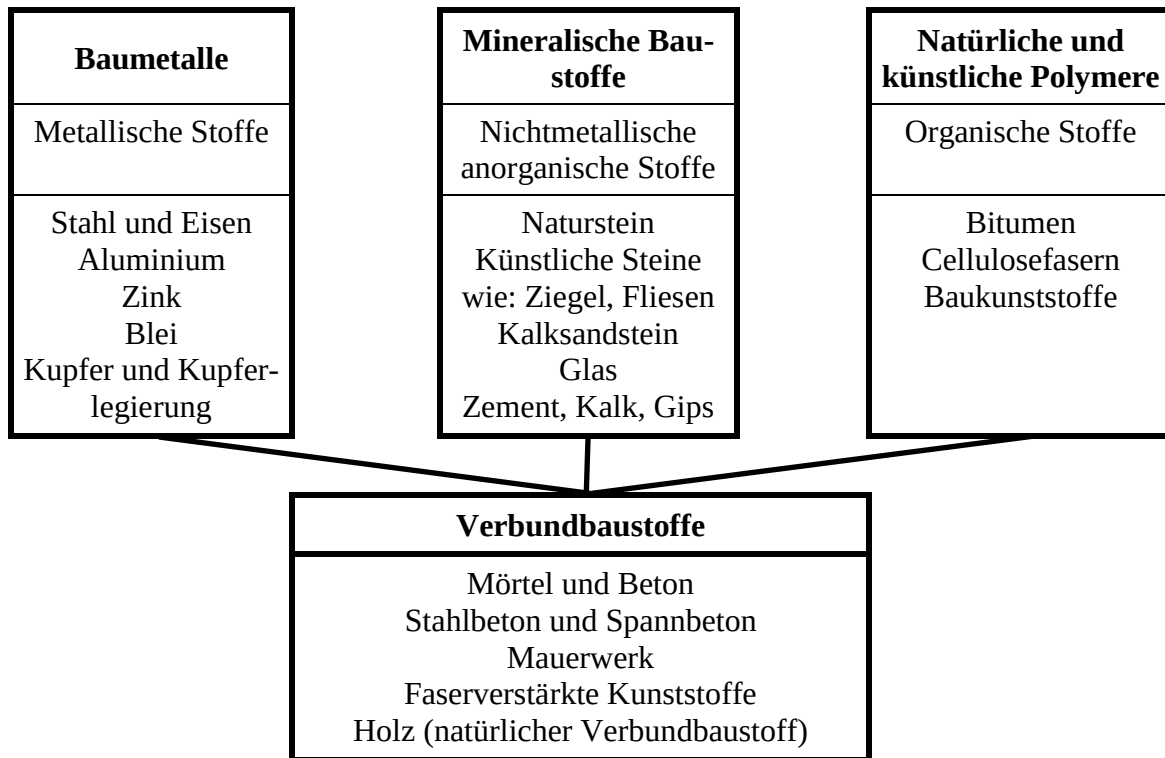


Bild 1: Baustoffgruppen

1.2 Anforderungen und Eigenschaften von Baustoffen

Bauen bedingt immer eine Auseinandersetzung mit Stoffen. Zum einen werden die unterschiedlichsten Stoffe als Werk- oder Baustoffe eingesetzt, ihre Eigenschaften verändert und so optimiert für die verschiedenen Anwendungen. Zum Anderen sind Bauwerke den verschiedensten Stoffen der Umwelt ausgesetzt und treten mit ihnen in Wechselwirkung. Diese Interaktion kann gewollt sein und sich positiv auswirken (z. B. Carbonatisieren von Kalkmörtel). Sehr häufig führt das Einwirken der Umwelt jedoch zu unerwünschten Veränderungen unserer Baustoffe.

Sowohl das Anwenden der Baustoffe als auch das Entwickeln neuer Baustoffe verlangt nach einem fundierten Wissen über deren Eigenschaften. Ein materialgerechtes Konstruieren ist nur möglich, wenn dem Planenden diese Eigenschaften bekannt sind und er mit möglichen Wechselwirkungen vertraut ist. Aus der Planung des Bauwerks und seiner zu erwartenden Wechselwirkung mit der Umgebung ergeben sich wiederum Anforderungen an die Materialeigenschaften. Tabelle 1 gibt eine grobe Vorstellung der Vielzahl der Möglichkeiten bei der Baustoffwahl, die sich durch die Kombination von Anforderungen an die Baustoffe und deren Eigenschaften ergibt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Anforderungen an Baustoffe und Eigenschaften von Baustoffen [Lit 20]

Anforderungen	Eigenschaften
Technische Einsetzbarkeit	Mechanisches Verhalten Festigkeit, Härte Elastizität Zähigkeit Temperaturbeständigkeit Verschleißwiderstand
	Feuerwiderstand Entflammbarkeit Brennbarkeit Toxizität Hochtemperaturverhalten
	Physikalisch-chemisches Verhalten Dichte wärmetechnisches feuchtetechnisches schalltechnisches lichttechnisches } Verhalten Korrosionsbeständigkeit elektrisches und magnetisches Verhalten
Form- und Fügbarkeit	Gießbarkeit, Formbarkeit Verarbeitbarkeit, Gestaltbarkeit u.a. Schweißbarkeit, Klebbarkeit
Wirtschaftlichkeit	Kostengünstige Gewinnbarkeit Herstell- und Formbarkeit Mögliche Wiederverwertbarkeit Geringe Umweltbelastung bei Gewinnung und Herstellung

1.3 Geschichtliche Entwicklung [Lit 17]

Die Bedeutung der Werkstoffe für die kulturelle, technologische und wirtschaftliche Entwicklung der Menschheit ist schon daran zu erkennen, dass bestimmte Zeitalter nach den Werkstoffen benannt sind, die in dieser Zeit dominierten (z. B.: Steinzeit, Bronzezeit, etc.).

Um 200000 v. Chr. Beginn der Bearbeitung von Steinen; Entwicklung einfacher Steinwerkzeuge; Wohnstätten befinden sich vorzugsweise im Freien oder in Höhlen.

Verfeinerte Steinbearbeitung; erste Anfänge des Arbeitens mit Ton; Beginn der Töpferei.

Dies ist ein wesentlicher Schritt in der Entwicklung der Menschheit: Durch das Brennen von Ton beginnt der Mensch, die natürlichen Eigenschaften von Stoffen zu verändern.

Um 10000 v. Chr. Erste Holzkonstruktionen.

Um 8000 v. Chr. Erste Kupferfunde in Mesopotamien: Das Rohkupfer wird gehämmert

	und geschmolzen.
Um 6000 v. Chr.	In Mesopotamien gibt es Häuser aus luftgetrockneten Lehmziegeln; Weiterentwicklung der Tonbrennerei und des Glasierens von Kunstgegenständen; erste Entwicklung von Mörteln.
Um 4000 v. Chr.	In Mesopotamien finden sich erste Hütten aus Steinmauerwerk mit und ohne Mörtel; Straßen aus Pflastersteinen; Pyramidenbau (Gizeh: 2600 - 2500), hier wird Gipsmörtel eingesetzt; Bau von Bewässerungsanlagen unter Verwendung von natürlichem Bitumen als Dichtungsmittel. In Mesopotamien werden durch die Sumerer Kupferlegierungen (Bronze = Kupfer + Zinn; Messing = Kupfer + Zink) entwickelt.
Um 2600 v. Chr.	In Mesopotamien entwickeln die Sumerer regulierbare Brennöfen (Töne, Keramik) und Schmelzöfen zur Bearbeitung von Kupfer und Kupferbarren (dienen als Tauschgegenstände = Geld).
Um 2000 v. Chr.	In Ägypten und Mesopotamien werden Waren importiert und exportiert; neben Nahrungsmitteln sind Werkstoffe die hauptsächlichen Güter.
Um 1400 v. Chr.	Beginn der Verwendung von Eisen durch die Assyrer in Mesopotamien: Eisen wird mit Holzkohle aus dem Erz geschmolzen. Dadurch entstehen Stahllegierungen. Wegen der schweren Verarbeitbarkeit erfolgt jedoch nur ein Kaltverformen durch Hämmern.
Um 900 v. Chr.	Beginn der Wärmebehandlung von Stahl durch Römer und Griechen: Härten durch Erhitzen und Abschrecken.
Um 600 v. Chr.	Massenproduktion keramischer Werkstoffe durch die Römer; Weiterentwicklung der Mörtelarten.
Um 100 v. Chr.	Entwicklung hydraulischer Bindemittel (wasserbeständig); sie sind die Voraussetzung für Aquädukte und Hafenbauten.
Um 0	Römischer Beton mit puzzolanischen Bindemitteln (opus caementitium); Entwicklung und Verwendung von Blei, Messing u. a. Legierungen.
Mittelalter	Keine wesentlichen neuen Entwicklungen; Zeitalter der Alchemie.
Um 1500	Anfänge der Chemie; Entwicklung des Gusseisens.
1774	Erkenntnis, dass Kohlenstoff ein wesentlicher Bestandteil von Stahl bzw. Gusseisen ist; Entdeckung der chemischen Bedeutung des Sauerstoffs.
Um 1850	Erfindung des Portlandzements; Anfang des modernen Betons; Verbesserungen in der Herstellung von Stahl und Stahllegierungen, z. B. durch Entfernen des Phosphors.
Um 1900	Beginn der Entwicklung neuer oder verbesserter Werkstoffe durch systematische Anwendung wissenschaftlicher Erkenntnisse.
Um 1930	Wirtschaftliche Ausnutzung von Aluminiumlegierungen; Entwicklung des Spannbetons.
Um 1940	Beginn der Verwendung von Kunststoffen im Bauwesen.
Um 1960	Beginn der systematischen Entwicklung moderner Verbundwerkstoffe, z. B. faserverstärkter Werkstoffe; Fortentwicklung insbesondere der

keramischen Werkstoffe.

heute

Umstellung auf Ressourcen schonende Produktionsverfahren, Vermehrter Einsatz von Recyclaten und Nebenprodukten

2 Bautechnische Regeln und Bestimmungen

2.1 Technische Regeln

Bauliche Anlagen müssen für die geplanten und zu erwartenden Beanspruchungen ausgelegt sein. Für den Entwurf, die Berechnung und die Ausführung baulicher Anlagen oder technischer Objekte sind die **(allgemein) anerkannten Regeln der Technik** zu beachten. Sie stellen nach dem [Werkvertragsrecht](#) für den Sollzustand eine Minimalforderung dar. Bei ihrer Nichteinhaltung liegt schon ein [Mangel](#) vor. Ein Verletzen dieser Regeln kann strafrechtliche Folgen haben, wenn der Tatbestand der Baugefährdung vorliegt.

Die allgemein anerkannten Regeln der Technik sind technische Regeln bzw. [Technikklauseln](#), die in der Wissenschaft als theoretisch richtig erkannt sind und feststehen, in der Praxis bei dem nach neuestem Erkenntnisstand vorgebildeten Techniker durchweg bekannt sind und sich aufgrund fortdauernder praktischer Erfahrung bewährt haben. Eine Technikklausel ist ein Verweis in [Gesetzen](#), [Vorschriften](#) oder [Verträgen](#), die einen Stand an Erkenntnissen von Wissenschaft und Technik widerspiegeln. Sie definieren sich unter anderem durch [Normen und Veröffentlichungen](#).

Es gibt drei hauptsächliche Stufen:

- Die [Anerkannten Regeln der Technik](#) sind die Regeln, die sich praktisch bewährt haben. Technische Festlegung, Sie werden von einer Mehrheit repräsentativer Fachleute als Wiedergabe des Standes der Technik angesehen.
- Der [Stand der Technik](#) beschreibt technische Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, die auf entsprechenden gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung basieren.
- Der [Stand von Wissenschaft und Technik](#) ist die dritte und höchste Stufe der Leistungsskala. Damit werden technische Spitzenleistungen umschrieben, die wissenschaftlich gesichert sind (z.B. für viele atomrechtliche Sachverhalte; der Begriff Stand der Wissenschaft und Technik kommt im Atomgesetz insgesamt 13 mal vor!) [Lit 23].

Die allgemein anerkannten Regeln der Technik sind nicht identisch mit den [DIN-Normen](#). Vielmehr gehen sie über die allgemeinen technischen Vorschriften, wozu auch die deutschen DIN-Normen und die **europäischen Normen (EN)** gehören, hinaus. Normungsgegenstand ist der „Stand der Technik“ und nicht der „Stand der Wissenschaft“. Für gültige DIN- bzw. EN-Normen besteht nur die Vermutung, dass sie den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen. Diese Vermutung ist widerlegbar, denn in den Normenausschüssen werden auch Interessenstandpunkte vertreten. Außerdem entsprechen Normen nicht immer dem aktuellen technischen Kenntnisstand. Zu den anerkannten Regeln der Technik gehören ferner u. a. die Unfallverhütungsvorschriften (UVV) der Bauberufsgenossenschaften, die VDE-Vorschriften (VDE = Verband Deutscher Elektrotechniker) und die DVGW-Vorschriften (DVGW = Deutscher Verein der Gas- und Wasserfachmänner).

Von den Regeln der Technik zu unterscheiden sind die **Technischen Baubestimmungen**. Sie sind zu beachten für den Entwurf, die Berechnung und die Ausführung baulicher Anlagen nach §3 der **Musterbauordnung (MBO)** [Lit 18]. Sie stellen die von der obersten Bauaufsichtsbehörde durch öffentliche Bekanntmachung als Technische Baubestimmungen eingeführten technischen Regeln dar. Die Musterbauordnung wird in der Praxis in die jeweiligen **Landesbauordnungen (LBO)** wie z. B. die Bayerische Bauordnung übernommen. Die Technischen Baubestimmungen folgen dem Grundsatz, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht ge-

fährdet werden [Lit 18]. Eine Bauaufsichtsbehörde genehmigt ein Bauvorhaben nur, wenn die Technischen Baubestimmungen eingehalten oder mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die allgemeinen Anforderungen (s.o.) erfüllt werden. Die Technischen Baubestimmungen zählen zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik.

Die von den obersten Bauaufsichtsbehörden eingeführten technischen Regeln werden vom **Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)** in der **Bauregelliste** veröffentlicht. Die Bauregelliste enthält die Normen und Vorschriften, die von den verschiedenen Baustoffen bzw. Bauprodukten einzuhalten sind. Sie regelt zudem, wie der Gütenachweis (Werkseigene Produktionskontrolle / Fremdüberwachung) zu erfolgen hat. Die in der Bauregelliste aufgeführten technischen Regeln haben einen vergleichbaren Rechtsstatus wie die Technischen Baubestimmungen und sind deshalb ebenfalls zu beachten. Für wichtige und allgemein angewandte neue Bauprodukte und Bauarten, die sich noch in einer bestimmten Entwicklung befinden, werden **Richtlinien und Merkblätter** aufgestellt (z.B. für Fugenabdichtungen im Hochbau, für Selbstverdichtenden Beton oder für Sichtbeton), um über längere Zeit Erfahrungen sammeln zu können [Lit 21].

Die Vergabe von Bauleistungen wird in Deutschland maßgeblich durch die **Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB)** bestimmt. Die VOB besteht aus den folgenden drei Teilen:

- Teil A (DIN 1960): Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen,
- Teil B (DIN 1961): Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen und
- Teil C (DIN 18299 bis DIN 18451): Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen (ATV).

Zusätzlich zur VOB haben große öffentliche Auftraggeber besondere technische Vorschriften, Lieferbedingungen, Richtlinien und Merkblätter erlassen, die zum Beispiel beim Bau von Brücken für die entsprechenden Bauleistungen zu beachten sind. Ein Beispiel ist die **ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten)** [Lit 2] der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)**.

2.2 Normen

Normen werden von verschiedenen Institutionen herausgegeben. Sie wurden für die verschiedensten Lebensbereiche erstellt (z. B. DIN 476 Papierformate), insbesondere für fast alle Bereiche der Technik. Im Bereich des Bauwesens liegen für die meisten gebräuchlichen und bewährten Bauprodukte Normen vor, die u. a. deren Eigenschaften, Anforderungen, Anwendungen und Prüfbedingungen regeln.

DIN-Normen werden vom **Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN)** herausgegeben. Für das Erstellen von Normen gibt es klare Regeln, die wiederum in einer Norm (DIN 820) festgelegt sind. DIN-Normen werden zunächst in Arbeitsausschüssen erarbeitet, denen Sachverständige aus Wissenschaft, Industrie und Bauverwaltung und ggf. der Materialprüfung angehören. Vor der endgültigen Herausgabe der Norm wird ein Entwurf (z. B. E DIN 4102-2), der so genannte Gelbdruck veröffentlicht, um allen interessierten Kreisen Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben. Diese Stellungnahmen werden gesammelt und fließen ggf. in die Endfassung der Norm ein. Sollten sich gravierende Änderungen ergeben, wird der Entwurf nochmals überarbeitet. Die fertigen Normen werden dann als Weißdruck herausgegeben.

Jede Norm wird durch eine Nummer, Teil, Titel und das Ausgabedatum eindeutig gekennzeichnet, z. B.: DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Be-

messung und Konstruktion, Juli 2001. Fehlen solche Angaben, wird immer Bezug auf die jeweils letzte Fassung genommen.

Im Jahr 2004 gab es im DIN 76 Normenausschüsse mit 3109 Arbeitsausschüssen, die für 28905 Normen zuständig waren. Zur besseren Übersicht werden die Normen einzelner Sachgebiete in DIN-Taschenbüchern zusammengefasst. Das DIN-Taschenbuch 56 „Materialprüfungsnormen für metallische Werkstoffe 2: Zerstörungsfreie Prüfungen“ enthält z. B. 65 Normen.

Ebenso wie Deutschland haben die meisten Industriestaaten eigene Normungsinstitute und Normen:

Frankreich	Association française de normalisation , AFNOR
Großbritannien	British Standard , BS
Japan	Japanese Architectural Standard Specification , JASS
Österreich	ÖNORM
USA	z. B. American Society of Testing Materials , ASTM

Das Erarbeiten von Normen ist mit viel Aufwand und entsprechenden Kosten verbunden. Daher greifen zahlreiche kleinere und viele Entwicklungsländer auf die Normen der großen Industriestaaten zurück. Die nationale Normung wird zunehmend durch internationale Normen ersetzt. Die jeweiligen Landesinteressen werden beim Erstellen internationaler Normen durch die nationalen Normungsinstitute wahrgenommen.

In **CEN** (**Comité Européen de Normalisation** – Europäisches Komitee für Normung) sind die nationalen Normungsorganisationen aus den 25 Mitgliedstaaten der Europäischen Union und der Europäischen Freihandelszone (Island, Norwegen, Schweiz) zusammengeschlossen. CEN ist von der Europäischen Kommission damit beauftragt worden, Normen zu erarbeiten [Lit 3], die zum Teil nach ihrer (bauaufsichtlichen) Einführung in den beteiligten Staaten verbindlich sind. Die europäischen Normen (EN-Normen) werden z. Z. weiterhin von den nationalen Normenorganisationen herausgegeben. Eine in Deutschland übernommene europäische Norm wird als **DIN EN** bezeichnet und veröffentlicht. Entwürfe der Euro-Normen und der DIN EN erscheinen als Rosadruck (**prEN**), Vornormen **DIN V ENV** als Blaudruck. Farbdrucke sind nicht rechtsverbindlich, es sei denn, sie sind durch einen Einführungserlass bauaufsichtlich eingeführt worden.

Die höchste Stufe der europäischen Normen sind die harmonisierten europäischen Normen (**hEN**). Die rechtliche Grundlage für harmonisierte europäische Normen ist die **Bauproduktenrichtlinie (BPR)**. Die [Bauproduktenrichtlinie](#) stellt sieben **wesentlichen Anforderungen** an die Brauchbarkeit eines Bauproduktes:

- mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
- Brandschutz,
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
- Nutzungssicherheit,
- Schallschutz,
- Energieeinsparung und Wärmeschutz sowie
- nachhaltiger Umgang mit natürlichen Ressourcen.

Im besonderen Fall der Bauproduktenrichtlinie sind diese harmonisierten Normen nicht nur mögliches Hilfsmittel, sondern sie sind nach einer Übergangszeit (**Koexistenzperiode**) verbindlich anzuwenden. Im Gegensatz zu anderen europäischen Normen dürfen harmonisierte

europäische Normen nicht durch nationale Textpassagen ergänzt werden. Das Vorliegen einer harmonisierten europäischen Normen ist die Voraussetzung für die **CE-Kennzeichnung**. Die CE-Kennzeichnung ist nicht für die ganze Norm verbindlich, sondern gilt nur für die in deren **Anhang ZA** genannten Abschnitte.

Eine Übersicht über die bisher im Amtsblatt der EU bekannt gemachten harmonisierten Normen nach der Bauproduktenrichtlinie sowie über die jeweiligen Koexistenzperioden wird in der [Liste der harmonisierten Normen](#) nach der Bauproduktenrichtlinie gegeben.

Im Gegensatz zu vielen DIN-Normen trennen die harmonisierten europäischen Normen streng zwischen Produkt und Anwendung. Daher ist es häufig erforderlich, national **Anwendungsnormen** zu erarbeiten, die sicherstellen, dass die wesentlichen bauaufsichtlichen Anforderungen erfüllt werden. Da die Zeit zwischen dem Erscheinen der europäischen Norm und der Umsetzung meist recht knapp ist, werden Anwendungsnormen meist als **Vornorm** veröffentlicht. Hierfür ist nur ein verkürztes Einspruchsverfahren zu durchlaufen. Im Bauwesen werden diese Anwendungsnormen vielfach in der Reihe **DIN V 20000-XXX** veröffentlicht, um ihren Übergangscharakter zu verdeutlichen. Das Nebeneinander der Normen, Anwendungsnormen und Vornormen erleichtert nicht gerade den Überblick.

Eine **Restnorm** kann eine harmonisierte Norm dort ergänzen, wo bestimmte Produkte oder Produkteigenschaften nicht geregelt sind. Die Restnormen sind möglichst zu vermeiden. Sie werden häufig auf Wunsch der betroffenen Industrie erstellt.

Internationale Normen werden von der **International Organisation for Standardization (ISO)** mit Sitz in Genf herausgegeben. Ebenso wie die europäischen Normen sollen die ISO-Normen technische Handelshemmnisse beseitigen und die länderübergreifende Zusammenarbeit und Verständigung erleichtern.

2.3 Verwendung neuer Bauprodukte

In Normen sollen nur allgemein gebräuchliche und bewährte Bauprodukte und Bauarten aufgenommen werden. Um den technischen Fortschritt nicht zu hemmen, dürfen jedoch im bauaufsichtlichen Bereich auch neue Bauprodukte und Bauarten unter bestimmten Bedingungen verwendet werden.

2.3.1 Zulassungen

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen werden für solche Bauprodukte und Bauarten im Anwendungsbereich der Landesbauordnungen erteilt, für die es allgemein anerkannte Regeln der Technik, insbesondere DIN-Normen, nicht gibt oder die von diesen wesentlich abweichen (z. B. deutlich niedrigere (bessere) Wärmeleitfähigkeit von Mauersteinen).

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen werden für alle Bundesländer durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) erteilt. Sie stellen eine Beurteilung der Verwendbarkeit bzw. Anwendbarkeit des Zulassungsgegenstandes im Hinblick auf die bauaufsichtlichen Anforderungen dar. Die Zulassungsbereiche erstrecken sich von Bauprodukten und Bauarten, etwa des Massiv- und Stahlbaus, über solche des Mauerwerks- und Holzbaus auf die Bereiche Wärmedämmverbundsysteme, Glas, Gerüste, Lager, Lüftungsanlagen, Dämmstoffe, Abdichtungen, Rohrsanierung, Brandverhalten und Feuerwiderstand bis zu Behältern und Fahrbahnübergängen [Lit 3]. Zulassungen werden zeitlich befristet (3 bis 5 Jahre) erteilt und können jederzeit widerrufen werden, falls Erkenntnisse vorliegen, die dies erforderlich machen.

Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen gelten nur in Deutschland. Andere Länder haben entsprechende Regelungen. Im Zuge der europäischen Harmonisierung werden inzwischen die nationalen Zulassungen durch europäische (**European Technical Approval (ETA)**) ersetzt. Die Europäische Organisation für technische Zulassungen (**European Organisation for Technical Approvals – EOTA**) ist eine auf der Grundlage der Bauproduktenrichtlinie gebildete Organisation, in der die für die Erteilung von europäischen technischen Zulassungen zuständigen Stellen vertreten sind. Das Deutsche Institut für Bautechnik ist für Deutschland Mitglied in der EOTA [Lit 3]. Damit die Zulassungsstellen der einzelnen Länder nach einheitlichen Kriterien vorgehen können, werden für die verschiedenen Produkte Anforderungskataloge - sogenannte CUAP (**Common understanding of acceptance procedure**) – erstellt.

2.3.2 Prüfzeugnisse

Ein **allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis** kann für Bauprodukte erteilt werden,

- deren Verwendung nicht das Erfüllen erheblicher Anforderungen an die Sicherheit baulicher Anlagen dient, z. B. normal entflammbare Fugendichtungen, oder
- die nach allgemein anerkannten Prüfverfahren beurteilt werden, z. B. Rauchabzüge.

2.3.3 Zustimmung im Einzelfall

Eine Zustimmung im Einzelfall ist für die Verwendung von nicht geregelten Bauprodukten und/oder die Anwendung von nicht geregelten Bauarten erforderlich, für die auch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis nicht vorliegen bzw. die von der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder dem allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnis wesentlich abweichen. Ausgenommen sind Bauprodukte, die für die Erfüllung der Anforderungen der jeweiligen Landesbauordnung (LBO) (z.B. **Bayerische Bauordnung (BayBO)**) nur eine untergeordnete Bedeutung haben und in der **Liste C** (Kapitel 2.3.4) bekannt gemacht wurden [Lit 19]. Ziel ist es, auch für solche Bauprodukte nachzuweisen, dass sie den allgemeinen Anforderungen der Bauordnung genügen, dauerhaft gebrauchstauglich sind und keine Gefahren von ihnen ausgehen. Für die Erteilung einer Zustimmung im Einzelfall ist jeweils die oberste Bauaufsichtsbehörde des Bundeslandes zuständig. Auf Antrag wird durch die oberste Bauaufsichtsbehörde der vorhabensbezogene Verwendungsfall geprüft. In einem Bescheid wird über die Verwendung der Bauprodukte, ggf. mit Nebenbestimmungen, entschieden. Ein analoges Verfahren ist für Bauarten vorgeschrieben.

2.3.4 Bauregellisten [Lit 3]

Die Landesbauordnungen schreiben vor, dass die von den obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder öffentlich bekannt gemachten technischen eingeführten Regeln zu beachten sind. Das **Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt)** hat die Aufgabe, die technischen Regeln für **Bauprodukte** und **Bauarten** in den **Bauregellisten A** und **B** sowie **Liste C** aufzustellen und im Einvernehmen mit den obersten Bauaufsichtsbehörden der Länder bekannt zu machen. Die Listen werden jährlich überarbeitet und vom DIBt herausgegeben. Sie werden in den **DIBt Mitteilungen** veröffentlicht.

Die Bauregellisten A und B sowie Liste C bestehen aus verschiedenen Teilen mit unterschiedlichen Regelungsbereichen (Tabelle 2).

2.3.4.1 Bauregelliste A Teil 1, Teil 2 und Teil 3

In der **Bauregelliste A Teil 1** werden Bauprodukte, für die es technische Regeln gibt (*geregelte Bauprodukte*), die Regeln selbst, die erforderlichen Übereinstimmungsnachweise und die bei Abweichung von den technischen Regeln erforderlichen Verwendbarkeitsnachweise

bekannt gemacht. In diesem Teil sind zum Beispiel Bauprodukte für den Beton- und Stahlbetonbau, Mauerwerksbau und Holzbau enthalten.

Die **Bauregelliste A Teil 2** gilt für *nicht geregelte Bauprodukte*, die entweder nicht der Erfüllung erheblicher Anforderungen an die Sicherheit baulicher Anlagen dienen und für die es keine allgemein anerkannten Regeln der Technik gibt oder die nach allgemein anerkannten Prüfverfahren beurteilt werden. Dazu gehören Bauprodukte, deren Verwendbarkeitsnachweis in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch ein Prüfzeichen oder eine Zustimmung im Einzelfall geregelt ist, z. B. Füllbauteile für Decken, die statisch nicht mitwirken und nur als verlorene Schalung dienen [Lit 21].

Die **Bauregelliste A Teil 3** gilt entsprechend für *nicht geregelte Bauarten*.

Tabelle 2: Einteilung der Bauprodukte und Bauarten nach Bauregelliste

Europäische Produkte		Nationale (deutsche) Produkte					
Geregelte Produkte		Nicht geregelte Produkte				Sonstige	
Bauregelliste B		Bauregelliste A			Liste C		
Teil 1	Teil 2	Teil 1	Teil 2		Teil 3		
Verwendungsbeschränkungen	Zusätzliche Verwendbarkeitsnachweise	technische Regeln der Bauregelliste A	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall	Allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis	Nicht geregelte Bauarten	Kein Verwendbarkeitsnachweis	Kein Verwendbarkeitsnachweis
Konformitätsnachweis CE-Zeichen		Übereinstimmungsnachweis, Ü-Zeichen				Kein Übereinstimmungsnachweis, kein Ü-Zeichen	

2.3.4.2 Bauregelliste B Teil 1 und Teil 2

In die Bauregelliste B werden Bauprodukte aufgenommen, die nach Vorschriften der Mitgliedstaaten der EU - einschließlich deutscher Vorschriften - und der Vertragsstaaten des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum zur Umsetzung von Richtlinien der EU in Verkehr gebracht und gehandelt werden dürfen und die die CE-Kennzeichnung tragen.

Die **Bauregelliste B Teil 1** ist *Bauprodukten* vorbehalten, die aufgrund des Bauproduktengesetzes in Verkehr gebracht werden, für die es technische Spezifikationen und in Abhängigkeit vom Verwendungszweck Klassen und Leistungsstufen gibt.

In die **Bauregelliste B Teil 2** werden *Bauprodukte* aufgenommen, die aufgrund anderer Richtlinien als der Bauproduktenrichtlinie in Verkehr gebracht werden, die CE-Kennzeichnung tragen und nicht alle wesentlichen Anforderungen nach dem Bauproduktengesetz erfüllen. Zusätzliche Verwendbarkeitsnachweise sind deshalb erforderlich.

2.3.4.3 Liste C

In die **Liste C** werden *nicht geregelte Bauprodukte* aufgenommen, für die es weder technische Baubestimmungen noch Regeln der Technik gibt, und die für die Erfüllung baurechtli-

cher Anforderungen nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dazu gehören z. B. Dränelemente, oder Fensterbänke aus Baustoffen nach DIN 4107-4, März 1994 [Lit 21].

2.3.4.4 Sonstige Bauprodukte

Sonstige Bauprodukte sind Bauprodukte, die für die Erfüllung bauordnungsrechtlicher Anforderungen nur eine untergeordnete Bedeutung haben und für die es technische Regeln gibt, z. B. Türgriffe, Türschilder [Lit 21].

2.3.5 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (PÜZ) [Lit 3]

Zur Sicherung der ordnungsgemäßen Herstellung von Bauprodukten kann die Einschaltung von **Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstellen (PÜZ-Stellen)** vorgeschrieben sein. Die PÜZ-Stellen bedürfen einer Anerkennung nach den Landesbauordnungen (LBO) oder dem **Bauproduktengesetz (BauPG)**. Als unparteiische Drittstellen führen sie auf nationaler Ebene im Übereinstimmungsverfahren die **Erstprüfung** durch, nehmen die Fremdüberwachung vor und erteilen Produktzertifikate. Auf europäischer Ebene können sie darüber hinaus im Konformitätsverfahren Stichprobenprüfung, Erstinspektion des Werkes und der **werkseigenen Produktionskontrolle (WPK)** sowie der Zertifizierung durchführen.

Die Anerkennung der PÜZ-Stellen liegt in der Zuständigkeit der Länder und erfolgt stellvertretend durch das DIBt. Dabei beurteilt das DIBt vor allem die technische Kompetenz und Ausrüstung, die Qualifikation und Erfahrung der Antragsteller. Dies können Personen, Stellen oder Überwachungsgemeinschaften sein. Nach den Landesbauordnungen gibt es zurzeit etwa 350 anerkannte PÜZ-Stellen, während nach dem Bauproduktengesetz zirka 150 Stellen anerkannt und notifiziert, d.h. der EU-Kommission und den anderen Mitgliedstaaten der EU mitgeteilt sind.

2.3.6 Verwendbarkeit und Konformität [Lit 21]

Die Verwendbarkeit der geregelten und der nicht geregelten Bauprodukte wird in einem für sie geforderten **Konformitätsnachweis** (= Übereinstimmungsnachweis) bestätigt. Die Bauprodukte tragen dann das Übereinstimmungszeichen Ü (Bild 2, links).

Die [Bauproduktenrichtlinie](#) sieht als alleinige Grundlage für die **CE-Kennzeichnung** (Bild 2, rechts) von Bauprodukten harmonisierte technische Spezifikationen vor. Dies können [harmonisierte europäische Normen](#) (hEN) oder europäische technische Zulassungen (ETA) sein, die von der [EOTA](#) erteilt werden.

Die einfachste (unterste) Stufe des **Übereinstimmungsnachweises** ist **ÜH** (Übereinstimmungserklärung des Herstellers). Der Hersteller (H) erklärt auf der Grundlage seiner werkseigenen Produktionskontrolle (früher Eigenüberwachung) die Übereinstimmung des Bauproduktes mit den Technischen Regeln.

Die nächste Stufe ist **ÜHP**; der Hersteller erklärt die Übereinstimmung des Bauproduktes mit der Technischen Regel, nachdem dieses vorher einmal durch eine anerkannte Prüfstelle im Rahmen einer Erstprüfung geprüft wurde.

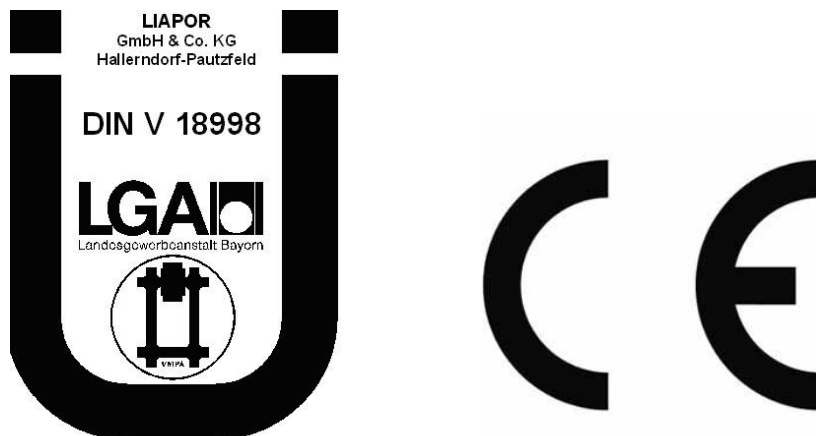


Bild 2: Ü-Zeichen (links) und CE-Zeichen (rechts)

ÜZ schließlich erfordert ein Übereinstimmungszertifikat durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle. Voraussetzung ist wie bei den anderen Übereinstimmungsnachweisen, eine werkseigene Produktionskontrolle und in diesem Fall zusätzlich eine regelmäßige Fremdüberwachung.

Für europäische Normen wird das geforderte Niveau des Konformitätsnachweises bereits vor dem Erstellen der Norm festgelegt. Dabei ist es durchaus möglich, dass eine Norm unterschiedliche Nachweisniveaus für ein Material in verschiedenen Anwendungen verlangt. Die Nachweisniveaus werden mit einem Zahlenschlüssel (Systeme 1+, 1, 2+, 2, 3 und 4) bezeichnet (Tabelle 3).

Tabelle 3: Zuordnung der Zahlenschlüssel der Bauproduktenrichtlinie (BPR) zu den Elementen der Konformitätskontrolle [Lit 4]

Elemente der Konformitätskontrolle		Systeme nach BPR Anhang III					
		2(i)		2(ii)-1		2(ii)-2	2(ii)-3
		1+	1	2+	2	3	4
Hersteller	Erstprüfung des Produkts						
	Prüfung von im Werk entnommenen Proben nach festgelegtem Prüfplan						
	Werkseigene Produktionskontrolle						
zugelassene Stelle	Erstprüfung des Produkts						
	Stichprobenprüfung ('audit-testing') von im Werk, auf dem offenen Markt oder auf der Baustelle entnommenen Proben						
	Erstinspektion des Werkes und der werkseigenen Produktionskontrolle						
	Laufende Überwachung, Beurteilung und Anerkennung der werkseigenen Produktionskontrolle						
		Zertifizierung		Herstellereerklärung			

3 Masseeinheiten und Formelzeichen [Lit 21]

Baustoffeigenschaften werden allgemein gültig durch allgemein anerkannte Baustoffkenngrößen beschrieben. Diese Baustoffkenngrößen besitzen eine definierte technische Einheit und einen Zahlenwert (Bild 3).

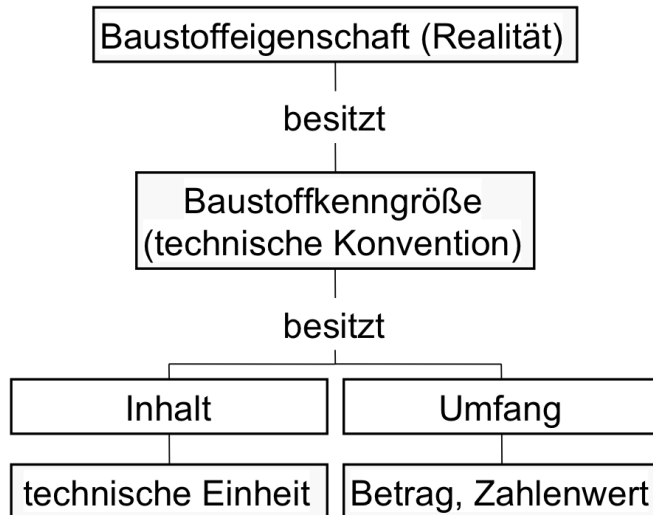


Bild 3: Technische Abbildung von Baustoffeigenschaften

Mit dem "Gesetz über Einheiten im Messwesen" vom 2. Juli 1969, geändert mit Gesetz vom 6. Juli 1973, wurde in der Bundesrepublik Deutschland das **Internationale Einheitensystem** mit der Benennung **Système International d' Unités**, Abkürzung **SI**, eingeführt. Seit 1. Januar 1978 dürfen nur noch die neuen, gesetzlichen Einheiten verwendet werden. Es gibt 7 Basisgrößen (Tabelle 4). Aus den 7 Basisgrößen lassen sich weitere Einheiten ableiten (siehe Tabelle 5). Die SI-Basiseinheiten werden durch Vorsätze (Präfixe) in 10er Potenzschritten vergrößert bzw. verkleinert angegeben (siehe Tabelle 6). Im Bauingenieurwesen gebräuchliche Einheiten sind unter anderem in [Lit 5, Lit 6, Lit 7] zu finden und in Tabelle 7 als Ausschnitt wiedergegeben.

Tabelle 4: SI-Basiseinheiten

Name	Formelzeichen	SI-Basiseinheiten	
		Größe	Einheitenzeichen
Länge	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Elektrische Stromstärke	I	Ampere	A
Thermodynamische Temperatur	T	Kelvin	K
Stoffmenge	n	Mol	mol
Lichtstärke	I_V	Candela	cd

Vor der Einführung der SI-Einheiten in Europa waren andere Einheiten im Gebrauch. Am bekanntesten sind die im Alltag noch verwendeten: die Pferdestärke (PS) als Einheit der Leis-

tung und die Kilokalorie (kcal) als Einheit der Energie. Vom SI-System abweichende Einheiten sind unter anderem im angloamerikanischen Raum zu finden (Pound per Square-Inch (psi)) als Einheit für Druck bzw. Festigkeit. Umrechnungstabellen sind in allen gängigen Bau- tabellen zu finden. Im Internet stehen zahlreiche Einheitenumrechner kostenlos zur Verfügung (z. B.: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units.html>).

Tabelle 5: Abgeleitete Einheiten mit besonderen Namen

Name	Formelzeichen	Größe	Einheitenzeichen	Angabe in SI-Einheiten
Kraft	F	Newton	<i>N</i>	$\frac{kg \cdot m}{s^2}$
Druck	p	Pascal	<i>Pa</i>	$\frac{kg}{s^2 \cdot m} = \frac{N}{m^2}$
Energie, Arbeit	E, W	Joule	<i>J</i>	$\frac{kg \cdot m^2}{s^2} = N \cdot m = W \cdot s$
Leistung	P	Watt	<i>W</i>	$\frac{kg \cdot m^2}{s^3} = N \cdot \frac{m}{s} = \frac{J}{s} = V \cdot A$
Elektrische Spannung	U	Volt	<i>V</i>	$\frac{kg \cdot m^2}{s^3 \cdot A} = \frac{W}{A} = \frac{J}{C}$
Elektrische Ladung	Q	Coulomb	<i>C</i>	$A \cdot s$
Temperatur	θ	Grad Celsius	°C	$^{\circ}C = K - 273,15$
Frequenz	f	Hertz	<i>Hz</i>	$\frac{1}{s}$

Tabelle 6: Präfixe, Faktoren und Symbole der SI-Einheiten

Präfix	Symbol	Faktor	
Tera	T	10 ¹²	1000000000000
Giga	G	10 ⁹	1000000000
Mega	M	10 ⁶	1000000
kilo	k	10 ³	1000
hekto	h	10 ²	100
deca	da	10 ¹	10
deci	d	10 ⁻¹	0,1
centi	c	10 ⁻²	0,01
milli	m	10 ⁻³	0,001
micro	μ	10 ⁻⁶	0,000 001
nano	n	10 ⁻⁹	0,000 000 001
pico	p	10 ⁻¹²	0,000 000 000 001

Tabelle 7: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen (Auszug) [Lit 5]

Nr.	Einheiten				Größe	Bemerkung
1	m	mm	cm	µm	Länge	
2	m ²	mm ²	cm ²		Fläche	
3	m ³	mm ³	cm ³	l	Volumen	
4	m ⁴	mm ⁴	cm ⁴	-	Flächenmoment 2.Grades	alt: Flächenträgheitsmoment
5	°		"	rad gon	Winkel	1° = 60' = 3600" 1° = (π/180) rad 1 gon = (π/200) rad 1 rad = 1 m/m
6	t	kg	g	mg	Masse, Gewicht	1 kg wirkt mit der Eigenlast 10 N
7	t/m ³	g/cm ³	kg/m ³	g/l	Dichte	Masse/Volumen 1 t/m ³ = 1 g/cm ³ 1 kg/m ³ = 1 g/l
8	s	min	h	d	Zeit	1 d = 24 h 1 h = 60 min 1min = 60 s
9	Hz				Frequenz	1 Hz = 1/s
10	kN	MN	N		Kraft, Einzellast, Schnittkraft	1 MN = 10 ³ kN = 10 ⁶ N
11	kN/m				Streckenlast	
12	kN/m ²				Flächenlast, Bodenscherfestigkeit	1 kN/m ² = 1 kPa
13	MN/m ²	N/mm ²			Spannung, Festigkeit	1 MN/m ² = 1 N/mm ² = 1 MPa
14	MN/m ²	kN/mm ²	MPa	kPa	Druck ¹⁾	1 kN/m ² = 1 kPa = 10 ³ N/mm ²
	MPa	kPa	Pa	bar	Druck ^{1), 2)}	1 bar = 10 ⁵ N/m ²
15	kN m	MN m	N m		Moment	
	W s	kWh	J		Energie, Wärmemenge	1 J = 1 N m = 1 W s
16	kN m	N m	J	Arbeit		
17	N s				Impuls	
18	kW	W			Leistung, Energiestrom, Wärmestrom	1 W = 1 N m/s
19	°C	K			Temperatur	0 °C = 273,15 K
20	K	°C *)			Temperaturdifferenzen und - intervallen	
21	W/(m ² K)				Wärmeübergangskoeffizient, Wärmedurchlasskoeffizient, Wärmedurchgangskoeffizient	
22	W/(m K)				Wärmeleitfähigkeit	
23	dB **)				Schallpegel	

1) Bei Druckgrößen muss zusätzlich zur Einheit eindeutig angegeben werden, ob es sich um barometrischen Überdruck oder um Absolutdruck handelt (siehe auch DIN 1314)

2) Bei Messungen mit Druckmessgerät (Manometer)

*) Empfohlen für die Aufgabe von Celsiustemperaturen mit zulässigen Abweichungen, z.B. (20 ± 2) °C

**) Dezibel ist keine Einheit nach DIN 1301, sondern dient zur Kennzeichnung von logarithmischen Größenverhältnissen, siehe DIN 5493

Verständigungsprobleme können nicht nur bei den verwendeten Einheiten auftreten. Sie können auch durch unterschiedlich besetzte Formelzeichen entstehen. Um national und international die Verständigung in Praxis, Forschung und Lehre zu erleichtern, wurden in Übereinstimmung mit ISO-Normen in DIN 1080 Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen festgelegt. In Tabelle 8 bis Tabelle 10 sind Formelzeichen angegeben, die im Rahmen der Europäischen Harmonisierung europaweit die bisherigen Formelzeichen ersetzen.

Tabelle 8: Bedeutung lateinischer Buchstaben als Hauptzeichen [Lit 5]

Hauptzeichen	Bedeutung	Hauptzeichen	Bedeutung
A	Fläche	p	Verkehrslast; Leistung
a	Abstand; Beschleunigung	Q	Querkraft; Wärmemenge; Abfluss
b	Breite	q	Querkraft je Länge; Summe aus Eigen- und Verkehrslast je Länge oder Fläche
D	Druckkraft	R	Resultierende Kraft; Schalldämmmaß
d	Durchmesser; Dicke	r	Radius; Polarkoordinate
E	Elastizitätsmodul; Steifenmodul	S	Flächenmoment 1. Grades; Schneelast; Steifigkeitsmodul
e	Exzentrizität (Ausmitte, Mittenabstand); Erdlast je Länge oder Fläche	s	Schneelast je Länge oder Fläche; Standardabweichung; Abstand; Systemlänge; Weglänge; Kurvenlänge
F	Kraft (Last und Schnittkraft)	T	Temperatur (Kelvin); Knickmodul (Engeßer); Zeitspanne
f	Durchbiegung; Pfeilhöhe; Frequenz	t	Zeit; Temperatur (Celsius)
G	Schubmodul; Eigenlast	u	Umfang; Verschiebungskomponente
g	Eigenlast je Länge oder Fläche	V	Vertikallast; Volumen
H	Horizontallast	v	Verschiebungskomponente; Geschwindigkeit
h	Höhe; Tiefe	W	Windlast; Widerstandsmoment; Arbeit; Energie
I	Flächenmoment 2. Grades ($I_y = \int z^2 \cdot dA$; $I_z = \int y^2 \cdot dA$); Trägheitsmoment (Massenmoment 2. Grades $I_y = \int z^2 \cdot dm$; $I_z = \int y^2 \cdot dm$)	w	Windlast je Länge oder Fläche; Verschiebungskomponente
l	Trägheitsradius	X	Kraftkomponente
k	Wärmedurchgangskoeffizient	x	Koordinate
L	Schallpegel	Y	Kraftkomponente
l	Länge (eines Teils); Stützweite	y	Koordinate
M	Moment (Last- und Schnittmoment)	Z	Kraftkomponente; Zugkraft
m	Moment je Länge; Masse	z	Koordinate; Hebelarm
N	Längskraft		
n	Längskraft je Länge; Zahl; Drehzahl		
O	Oberfläche		

Tabelle 9: Bedeutung griechischer Kleinbuchstaben als Hauptzeichen [Lit 5]

Buchstabe	Hauptzeichen	Bedeutung
Alpha	α	fester Winkel; festes Anteilverhältnis; Dehnkoeffizient; Wärmeübergangskoeffizient; Winkelbeschleunigung
Beta	β	fester Winkel; festes Anteilverhältnis; Festigkeit, bezogen auf Ausgangsquerschnitt; Sicherheitsbeiwert
Gamma	γ	fester Winkel; festes Anteilverhältnis; Wichte (Kraft je Volumen); Gleitung; Schubverformung; Sicherheitsbeiwert
Delta	δ	Variationskoeffizient; Weggröße; Grenzdehnung, bezogen auf Ausgangslänge, z. B. Bruchdehnung δ_u
Epsilon	ε	Dehnung
Zeta	ζ	normierte Koordinate z; veränderliches Anteilverhältnis
Eta	η	normierte Koordinate y; Sicherheitsbeiwert (Grundbau); Wirkungsgrad; veränderliches Anteilverhältnis; Viskosität
Theta	ϑ	Winkel; Drehwinkel; Winkelkoordinate (Kugelkoordinate)
Jota	ι	¹⁾
Kappa	κ	Verhältnis von Grenzspannungen; Beiwert; Verkrümmung
Lambda	λ	Schlankheitsgrad; Wärmeleitfähigkeit
My	μ	Reibungsbeiwert; Querdehnzahl ($\mu = 1/\nu$)
Ny	ν	Poissonzahl ($\nu = 1/\mu$)
Xi	ξ	normierte Koordinate x; veränderliches Anteilverhältnis
Omikron	$\omicron$	¹⁾
Pi	π	(Verwendung nur für mathematische Größen)
Rho	ρ	Dichte (Masse je Volumen)
Sigma	σ	Spannung
Tau	τ	Winkel; Schubspannung
Ypsilon	υ	¹⁾
Phi	φ	Fließzahl (Kriechzahl); Winkel; Polarkoordinate; Winkel der inneren Reibung; Beiwert (z. B. Schwingbeiwert)
Chi	χ	¹⁾
Psi	ψ	Winkel; Einschnürung, bezogen auf Ausgangsquerschnitt
Omega	ω	Beiwert (z. B. Knickbeiwert); Winkelgeschwindigkeit; Kreisfrequenz

¹⁾ Soll nicht verwendet werden

Tabelle 10: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen (Auszug), Beton- und Stahlbetonbau, Spannbetonbau, Mauerwerksbau (DIN 1080-3) Lit 6], Stahlbau, Stahlverbundbau und Stahlträger in Beton (DIN 1080-4) [Lit 7],

Formelzeichen und Nebenzeichen	Benennung	Einheit (Beispiel)	Bisheriges Formelzeichen	Bemerkung
α_T	Wärmedehnzahl	mm/(mm·K)	α_T	
R	Festigkeit	N/mm ²	β	Bezogen auf die Ausgangsfläche A ₀ des Querschnitts
R _{BC}	Betriebsfestigkeit	N/mm ²	β_{BC}	Bezogen auf die Ausgangsfläche A ₀ des Querschnitts; ersetzt als Oberbegriff die früheren Begriffe Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit
R _s	Festigkeit an der Streckgrenze	N/mm ²	β_s	Bezogen auf die Ausgangsfläche A ₀ des Querschnitts
R _{0,2}	Festigkeit an der 0,2 % Dehngrenze	N/mm ²	$\beta_{0,2}$	Bezogen auf die Ausgangsfläche A ₀ des Querschnitts
R _{0,01}	Festigkeit an der 0,01 % Dehngrenze Proportionalitätsgrenze	N/mm ²	$\beta_{0,01}$	Bezogen auf die Ausgangsfläche A ₀ des Querschnitts
f	Zusatzstoffgehalt je Volumeneinheit	kg/m ³	F	
g	Gesteinskörnungsgehalt je Volumeneinheit	kg/m ³	g	
h	Feuchtegehalt je Volumeneinheit	kg/m ³		z. B. Wassergehalt der Gesteinskörnung
k	Mehlkorn je Volumeneinheit	kg/mm ³		
n	Verhältnis von Elastizitätsmoduln	-	n	z. B. n = E _s /E _b
p	Luftgehalt je Volumeneinheit	Vol. - %	p	
w	Wassergehalt je kg/m ³	kg/m ³	W	Gesamtwassergehalt des Frischbetons
z	Zementgehalt je Volumeneinheit	kg/m ³	Z	
w/z	Wasser-Zement-Wert	-	ω	$\omega = w/z$

4 Masse, Dichte und Porosität [Lit 21]

4.1 Masse

Die physikalische Größe Masse (SI-Basiseinheit: Kilogramm) kennzeichnet die Eigenschaft eines Körpers, die sich sowohl in Trägheit gegenüber einer Änderung des Bewegungszustandes als auch in der Anziehung zu anderen Körpern äußert. Bei der Angabe von Warenmengen darf statt des Begriffes "Masse" auch der Begriff "Gewicht" gebraucht werden. Die Masse wird durch Wägung mit einer Waage bestimmt, wobei in der Regel Massen verglichen werden. 1 kg wirkt auf der Erde mit $1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 9,81 \text{ N} \approx 10 \text{ N}$ auf die Unterlage.

4.2 Dichten

4.2.1 Dichte

Die Dichte ρ ist das Verhältnis der Masse m eines Stoffes zu seinem hohlraumfreien Volumen V .

$$\rho = \frac{m}{V}; \text{ Einheiten z. B. } \text{g/cm}^3 = \text{kg/dm}^3 = \text{Mg/m}^3 = \text{t/m}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Die Dichte nannte man früher auch "Reindichte". Das Volumen unregelmäßig geformter Körper wird durch Wasserverdrängung bestimmt. Bei Baustoffen, die mit Wasser reagieren, wie die mineralischen Bindemittel, wird statt Wasser eine andere Flüssigkeit verwendet, z.B. *n*-Heptan.

Porige Baustoffe müssen zur Bestimmung der Dichte so weit zerkleinert werden, dass nur noch porenfreie Partikel übrig bleiben, oder alle Poren von der Flüssigkeit ausgefüllt werden können (Bild 4).

4.2.2 Rohdichte

Die Rohdichte ρ_R ist das Verhältnis der Masse m eines Stoffes zu seinem Volumen V einschließlich der Hohlräume V_h , der so genannten Korneigenporen:

$$\rho_R = \frac{m}{V + V_h}$$

Bei der Bestimmung von $V + V_h$ durch Wasserverdrängung muss entweder der Wasserzutritt zu den Poren durch einen dichten Film verhindert werden oder die Poren müssen mit Wasser ausgefüllt (gesättigt) werden, bevor $V + V_h$ gemessen wird (m ist jedoch die Masse des trockenen Stoffes), siehe Bild 4.

4.2.3 Die Schüttdichte

Die Schüttdichte ρ_s ist das Verhältnis der Masse eines körnigen Stoffes (z. B. Sand oder Kies) zu seinem Volumen einschließlich der Korneigenporen V_h und der Hohlräume V_z zwischen den Körnern (Haufwerksporen):

$$\rho_s = \frac{m}{V + V_h + V_z}$$

Die Schüttdichte ρ_s wird ermittelt, indem der körnige Stoff in ein Messgefäß eingefüllt wird. Der Volumenanteil V_z hängt dabei vom Einfüllvorgang in das Gefäß (und ggf. von der Verdichtung) ab. Im feuchten Zustand bewirkt bei feinkörnigen Stoffen (z. B. Sand) das zwischen den Körnern befindliche Wasser eine Verklebung der Körner untereinander, wodurch sich

eine lockere Lagerung, d. h. kleinere Schüttdichte, jeweils bezogen auf die Masse der trockenen Feststoffe, ergibt, siehe Bild 4. Tabelle 11 enthält Angaben zu den verschiedenen Dichten für ausgewählte Konstruktionsbaustoffe.

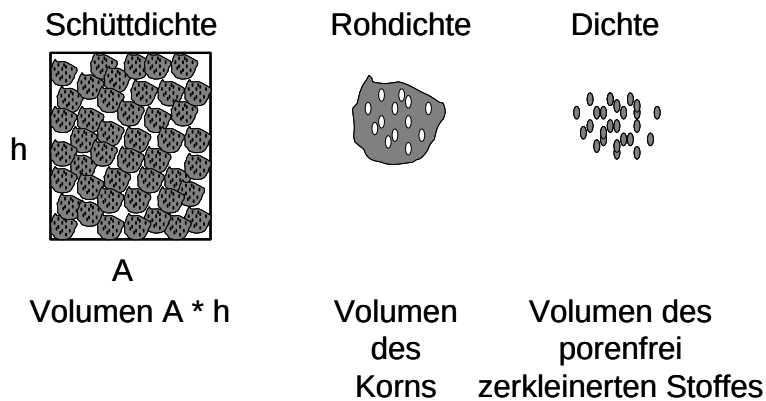


Bild 4: Volumen für die Bestimmung der verschiedenen Dichten

Tabelle 11: Dichten ausgewählter Konstruktionsbaustoffe

Baustoff	Dichte	Rohdichte	Schüttdichte
	[kg/dm ³]		
Zement	2,85 – 3,20	-	0,9 – 1,9
Normale Gesteinskörnung	2,6 – 3,1	2,0 – 3,1	1,1 – 1,6
Leichte Gesteinskörnung	2,6 – 3,1	0,10 – 2,0	0,02 – 1,20
Normalbeton	2,5 – 3,0	2,0 – 2,8	
Leichtbeton	1,9 – 2,5	0,25 – 2,0	
Wandbausteine		0,53 – 2,0	
Stahl	7,8 – 7,9		
Aluminium	2,7 – 2,8		
Holz	1,5 – 1,6	0,10 – 1,23	
Kunststoffe	0,9 – 2,2	0,01 – 2,20	

4.3 Porosität

Der Gehalt an Poren beeinflusst die Roh- und Schüttdichte sowie das Verhalten gegenüber Flüssigkeiten und Gasen. Dabei ist nicht nur der summarische Porenanteil (Porengehalt) von Bedeutung, sondern auch die Art, Form, Größe und Verteilung der Poren. Man unterscheidet

- geschlossene (nicht füllbare) Poren,
- Kapillarporen und
- Haufwerksporen.

Haufwerksporen können durchaus wie Kapillarporen wirken. Verschiedene Porentypen sind in Bild 5 dargestellt.

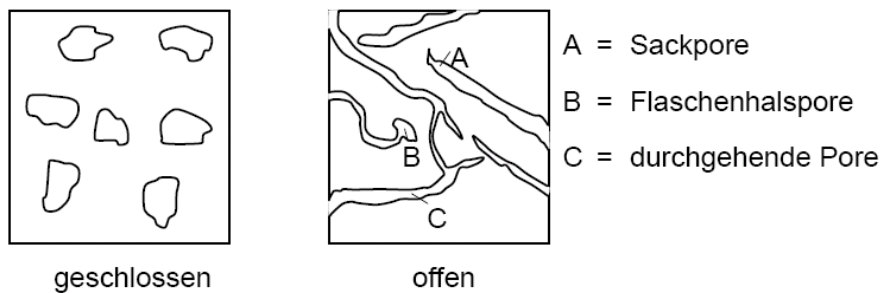


Bild 5: Unterscheidung zwischen offenen und geschlossenen Poren [Lit 17]

Poren in Baustoffen werden auch nach ihrer Größe unterschieden:

Mikroporen $\varnothing < 10^{-7} \text{ m}$

Kapillarporen $10^{-7} \text{ m} \leq \varnothing < 10^{-3} \text{ m}$

Makroporen $\varnothing \geq 10^{-3} \text{ m}$

Die Porosität beeinflusst Eigenschaften eines Werkstoffes wie z. B.:

- Rohdichte,
- Festigkeit,
- E-Modul,
- Widerstand gegen das Eindringen flüssiger oder gasförmiger Stoffe (Permeation, Diffusion, kapillares Saugen),
- Korrosionswiderstand und Frostwiderstand,
- Wärmeleitfähigkeit sowie
- Volumenstabilität.

Der Porenanteil n (auch: Gesamtporigkeit oder Porengehalt) ist das Porenvolumen, bezogen auf das Gesamtvolumen. Zum Porenvolumen zählen dabei die wassergefüllten Poren und die luftgefüllten Poren (n_a und n_w) (Bild 6).

$$n = \frac{\text{Porenvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{\varrho - \varrho_R}{\varrho} = 1 - \frac{\varrho_R}{\varrho}$$

Der Luftporengehalt n_a wird oft auch in % angegeben:

$$n_a \cdot 100 \text{ [Vol.-%.]}$$

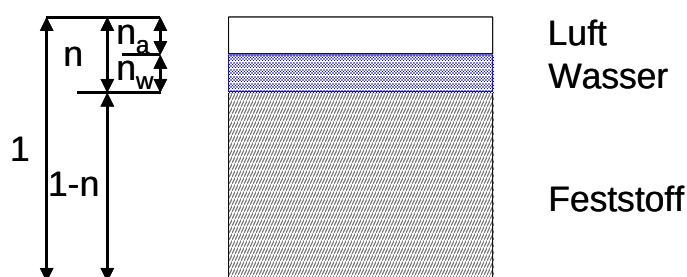


Bild 6: Porenanteile

Die Porengrößenverteilung eines porösen Feststoffs kann mit der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt werden. Hierzu wird der Probekörper in Quecksilber getaucht. Anschließend wird ein äußerer Druck aufgebracht, der das Quecksilber in die von außen zugänglichen Poren drückt. Mit zunehmendem Druck werden immer kleinere Porendurchmesser gefüllt. Aus der Menge des verbrauchten Quecksilbers beim jeweiligen Druck

lässt sich die Porenverteilung errechnen. In Bild 7 ist ein Ergebnis für Sandstein und Zementstein dargestellt.

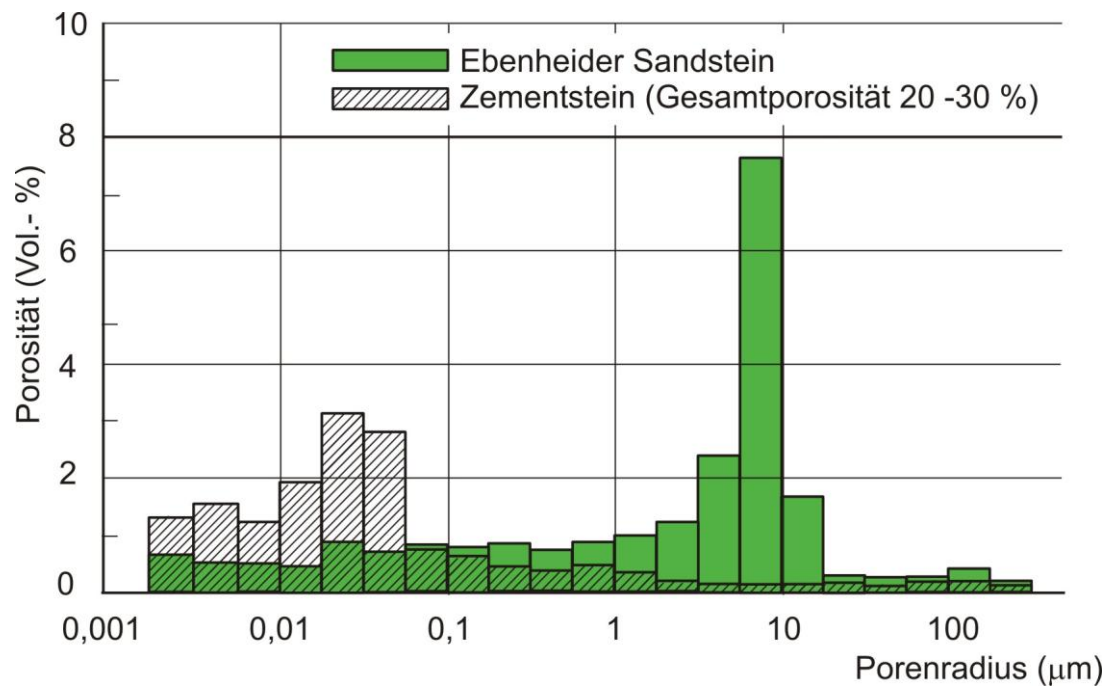


Bild 7: Porenradienverteilung [Lit 21]

5 Verhalten poröser Feststoffe gegenüber Feuchtigkeit

5.1 Allgemeines

Wasser kann durch kapillares Saugen oder unter Druck in Baustoffe eindringen. Feuchtigkeit kann über Adsorption oder durch Tauwasserbildung aus der Luft aufgenommen werden. In das Innere poröser Baustoffe gelangt Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf durch Diffusion. Die verschiedenen **Transportmechanismen** sind nachstehend aufgeführt.

- Permeation,
- Diffusion,
- kapillares Saugen sowie
- gemischten Transport, z. B. Diffusion und kapillares Saugen.

In porösen Baustoffen stehen für flüssige oder gasförmige Medien Poren, Risse und Grenzflächen als **Transportwege** zur Verfügung. Die Leistungsfähigkeit dieser Transportwege hängt unter anderem von folgenden Parametern ab:

- der Zusammensetzung und Struktur des Werkstoffes,
- der Porosität des Werkstoffes,
- dem Feuchtegehalt des Werkstoffes,
- den Umweltbedingungen, d. h. Temperatur und relative Feuchte der Luft und
- dem transportierten Medium.

Wasser und Feuchte beeinflussen viele Eigenschaften poröser Baustoffe. Mit der Aufnahme von Wasser sind verbunden:

- ein Quellen (Dehnung),
- eine verminderte Festigkeit,
- eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit,
- eine Förderung von Korrosion an Metallen und/oder
- bei weitgehender Porenfüllung Zerstörungen durch Frost.

Die Grundlagen des Wasser- und Dampftransportes in Baustoffen und durch diese hindurch sind von Bedeutung für

- das Austrocknen und die Wasseraufnahme,
- wärmetechnische Berechnungen,
- das Auslaugen löslicher Stoffe und
- den Transport von Schadstoffen.

Feuchtigkeit kann nicht nur von außen in Baustoffe gelangen, sondern bereits durch den Herstellungsprozess hineingelangt (Zugabe von Wasser zu Mörtel und Beton) oder natürlich enthalten sein (Holzfeuchte). Bild 8 veranschaulicht verschiedene Möglichkeiten des Einwirkens von Wasser und Feuchtigkeit auf ein Bauwerk.

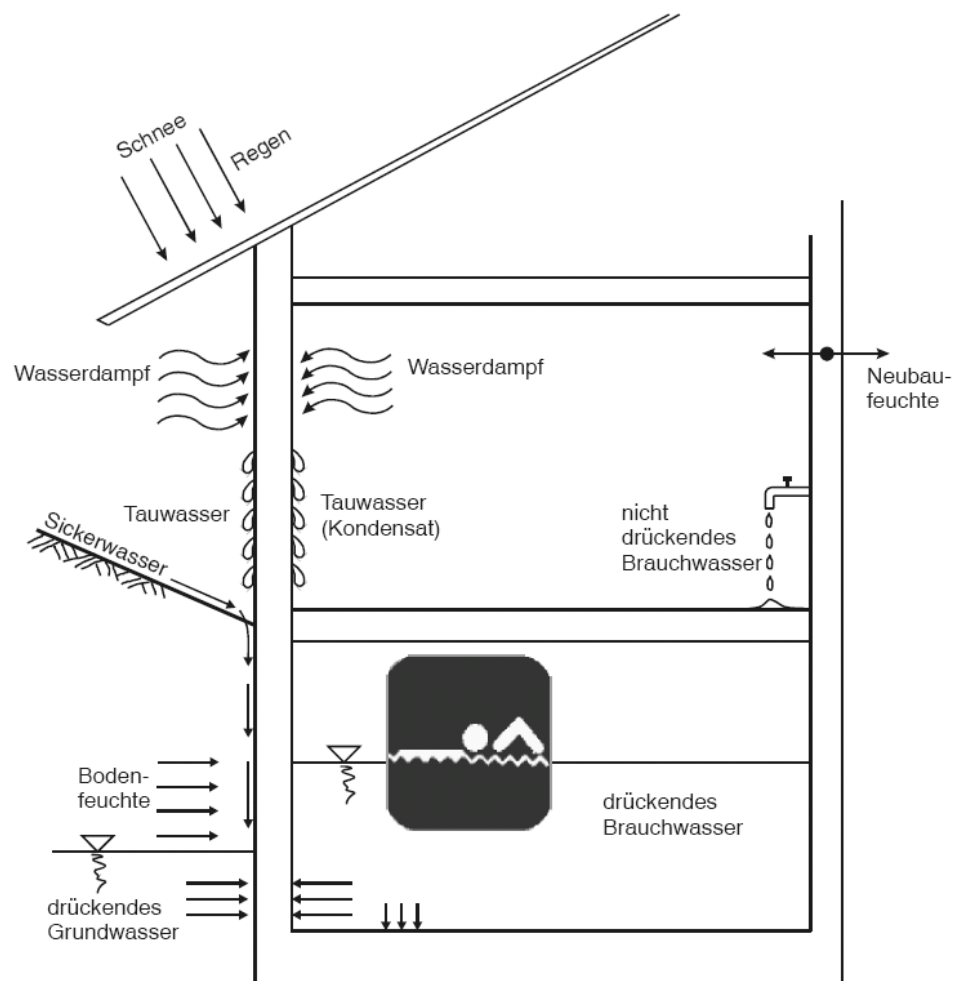


Bild 8: Mögliche Arten des auf Bauwerke einwirkenden Wassers [Lit 1]

5.2 Wassergehalt, Feuchtegehalt

Der massebezogene Wassergehalt (Feuchtegehalt) u_m ist das Verhältnis der Masse m_w des im Baustoff enthaltenen Wassers zur Trockenmasse m_{tr} des Stoffes:

$$u_m = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} = \frac{m_w}{m_{tr}} \quad [-] \text{ bzw. } u_m = 100 \frac{m_w}{m_{tr}} \quad [M. - \%]$$

Für den Vergleich von Baustoffen mit unterschiedlicher Rohdichte wird der Feuchtegehalt auf das Volumen bezogen:

$$\psi = u_m \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot 100 \quad [Vol. - \%],$$

mit $\rho = \frac{m_r}{V}$, der Rohdichte des Baustoffes.

Der Wassergehalt wird in der Regel gravimetrisch mit folgenden Methoden durch Trocknung bestimmt:

durch Erhitzen auf 105 °C (oder auch niedriger, um ein Austreiben von chemisch gebundenem Wasser zu vermeiden (z. B. bei Gips 40 °C),

- durch Evakuieren und Verdampfen des Wassers (Vakuum unterhalb des Dampfdruckes: bei 20 °C ca. 0,0235 bar),
- durch Trocknungsmittel, z. B. Silicagel oder Phosphorpentoxid (P₂O₅), in geschlossenen Behältern (Exsikkator) oder
- durch Gefriertrocknung.

Die Trocknung ist jeweils bis zur "Massekonstanz" durchzuführen, d. h. Masseabnahme z. B. in 24 h weniger als 1 ‰.

Häufig wird der Wassergehalt durch indirekte Verfahren ermittelt, z. B.:

- Carbidmethode: Eine zerkleinerte Probe wird mit Carbid versetzt, das mit dem Wasser unter Gasentwicklung reagiert; in einem geschlossenen Gefäß ist dann der sich einstellende Überdruck ein Maß für den Wassergehalt.
- Messen der elektrischen Leitfähigkeit (bei Holz).

5.3 Mechanismen des Feuchtetransports in porösen Stoffen

Besteht zwischen der Feuchtigkeit der Umgebung und der Feuchtigkeit (Wassergehalt) eines Baustoffs ein Unterschied, dann kann es zwischen dem Baustoff und der Umgebung zu einem Feuchteaustausch kommen. Abhängig von der Richtung dieses Austausches wird der Vorgang als **Sorption (Wasseraufnahme)** oder **Desorption (Wasserabgabe)** bezeichnet. In Abhängigkeit vom Feuchtegehalt, der Porenstruktur, der Umgebungsfeuchte und anderer Einflüsse kommen die unter Kapitel 5.1 genannten verschiedenen Transportmechanismen vor. Die verschiedenen Transportmechanismen treten in der Praxis gleichzeitig auf.

5.3.1 Permeation (Durchlässigkeit)

Permeation beschreibt den Vorgang, bei dem ein Stoff (Permeat) einen Festkörper durchdringt bzw. durchwandert. Ohne äußere Einflüsse erfolgt der Transport von Flüssigkeiten oder Gasen immer in Richtung der geringeren Konzentration bzw. des niedrigeren Partialdrucks. Liegen in einem Stoff durchgehende Kapillaren vor, so kann durch diese Wasser durchströmen (kapillare Sickerströmung).

Die Wasserdurchlässigkeit ist um so geringer, je kleiner die Porenradien sind. Deshalb ist guter Beton praktisch wasserundurchlässig, obwohl der erhärtete Zement einen hohen Porenanteil hat, denn die Poren sind außerordentlich klein (bei niedrigen Wasserzementwerten überwiegend Gelporen mit einem Durchmesser bis etwa 5 nm).

Die Wasserdurchlässigkeit wird durch den Durchlässigkeitswert (**Permeabilitätskoeffizient**) k [m/s] beschrieben, den man besonders in der Bodenmechanik benutzt. Die Durchflussmenge q berechnet sich für laminare Strömungen nach Darcy (1856) zu:

$$q = k \cdot i,$$

- | | |
|-----|---|
| q | Durchflussmenge je Querschnittfläche, bezogen auf die Zeit [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$], auch als Filtergeschwindigkeit bezeichnet, |
| k | Durchlässigkeitsbeiwert (Filterkonstante) [m/s], |
| i | hydraulische Druckhöhe je Länge |

Für den stationären Zustand mit konstantem Druckgefälle gilt für die **Permeation von Flüssigkeiten** der in Bild 9 dargestellte Zusammenhang.

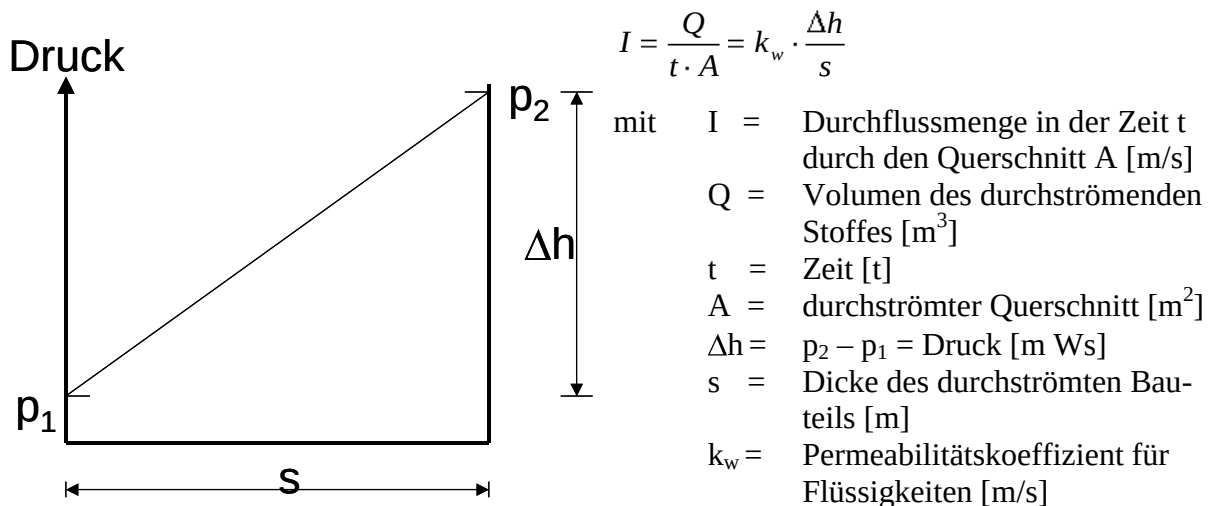


Bild 9: Stationäres Druckgefälle

Für die Permeation von Gasen sind darüber hinaus die Viskosität des Gases η , der mittlere Druck $\bar{p}$ und der Druck p , bei dem Q gemessen wird, zu berücksichtigen (Poisseeuille'sches Gesetz):

$$I = \frac{Q}{t \cdot A} = k_g \cdot \frac{p_2 - p_1}{2} \cdot \frac{\bar{p}}{p \cdot \eta}$$

mit $p_2 - p_1$ = Druckgefälle [N/mm²]

$$\bar{p} = \frac{p_2 + p_1}{2} = \text{mittlerer Druck [N/mm}^2\text{]}$$

η = Viskosität des Gases [Ns/m²]

k_g = spezifischer Permeabilitätskoeffizient [m²]

Bild 10 zeigt schematisch einen einfachen Versuchsaufbau, mit dessen Hilfe Transportkoeffizienten bestimmt werden können.

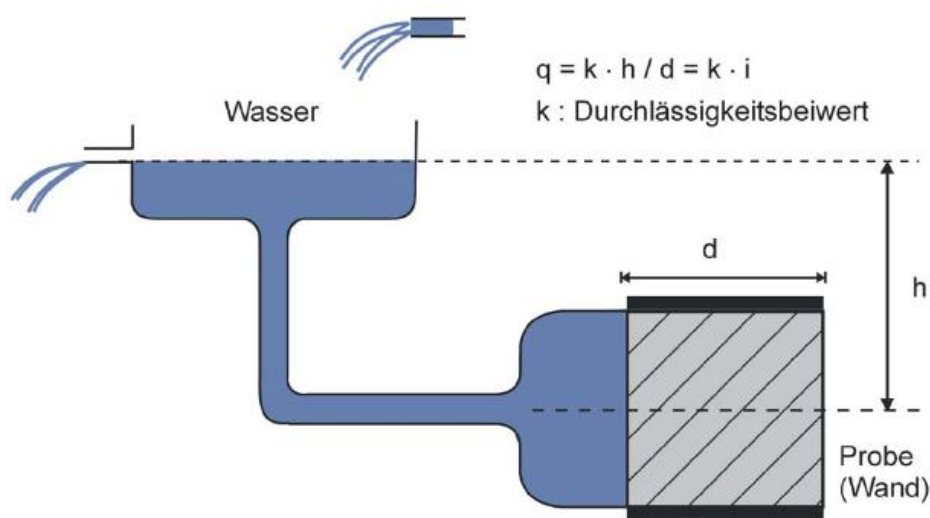


Bild 10: Prüfung der Wasserundurchlässigkeit, schematisch [Lit 21]

Die Kenngrößen k_w und k_g sind sogenannte **Transportkoeffizienten**. Je kleiner sie sind, desto langsamer läuft der Transport ab. Zum Beispiel liegt der Transportkoeffizient gegenüber Wasser, k_w ,

- von Beton in der Größenordnung von $\text{ca. } 2 \cdot 10^{-11} \text{ m/s} \geq k_w \geq 3 \cdot 10^{-14} \text{ m/s}$,
- von Lehm in der Größenordnung von $\text{ca. } 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s} \geq k_w \geq 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ und
- von Sand in der Größenordnung von $\text{ca. } 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s} \geq k_w \geq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

5.3.2 Kapillare Wasseraufnahme

Wasser und andere benetzende Flüssigkeiten können in poröse Baustoffe durch kapillares Saugen eindringen, wenn der Baustoff an seiner Oberfläche mit der Flüssigkeit in Berührung kommt. Die kapillare Wasseraufnahme wird von inneren Kräften, den Kapillarzugkräften, bewirkt und funktioniert auch entgegen der Schwerkraft. Das Prinzip kann gut an einer einzelnen zylindrischen Kapillare erklärt werden. Taucht man ein dünnes Glasröhrchen in Wasser, so steigt das Wasser in dieser Kapillare hoch. Das Wasser in der Kapillare steht unter Zugspannung, da es entgegen der Erdanziehung hochgehoben wird. Die Zugspannung entspricht der Gewichtskraft des Wassers. Sie wird Kapillarspannung p_k genannt.

$$p_k = \rho_w \cdot g \cdot h_k \text{ [N/m}^2\text{]}$$

mit

ρ_w Dichte des Wassers [kg/m^3],
 g Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$),
 h_k kapillare Steighöhe [m].

Die Flüssigkeitsoberfläche nimmt in der Kapillare die Form einer Kugelkalotte an, die als Meniskus bezeichnet wird. Die Wassersäule ist entlang der Berührungslinie von Meniskus und Kapillarwand aufgehängt. Dieser Effekt heißt **Kapillaraszension**. Die für das Gleichgewicht erforderliche Umfangskraft je Längeneinheit wird als **Oberflächenspannung** σ_w des Wassers bezeichnet. Bei einer Temperatur von 20°C beträgt $\sigma_w = 0,0728 \text{ N/m} = 72,8 \text{ dyn/cm}$. Die Oberfläche der Flüssigkeit kann man sich als gespannte Membran vorstellen, die mit der Wand der Kapillare den Winkel ϑ einschließt (Bild 11 links).

Nimmt man eine Röhre aus hydrophoben (Wasser abweisenden) Kunststoffen wie z. B. Polyethylen oder Polytetrafluorethylen (PTFE, Handelsname z. B. Teflon), dann stellt sich die Wasseroberfläche in der Kapillare tiefer ein als außerhalb der Kapillare (Bild 11 rechts). Dieser Effekt heißt **Kapillardepression**.

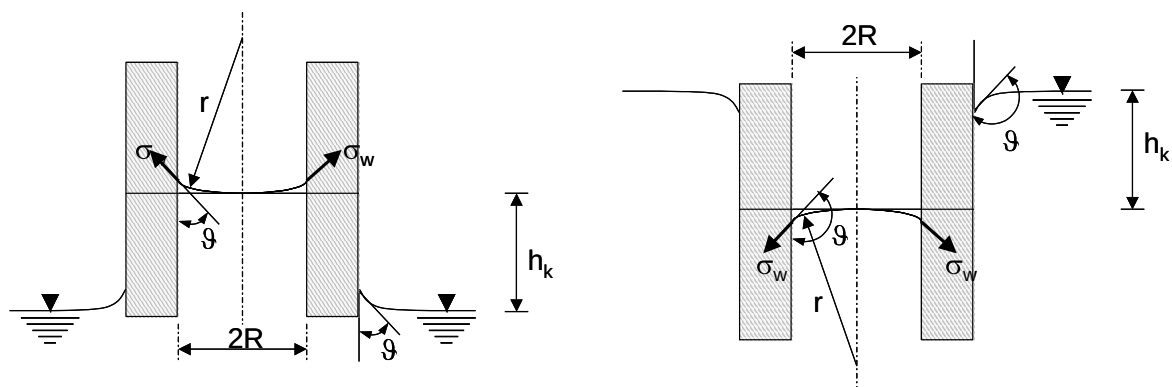


Bild 11: Ausbildung des Meniskus in einem hydrophilen Baustoff (links) und in einem hydrophoben Baustoff (rechts)

Zwischen dem Krümmungsradius des Meniskus r und dem Radius der Kapillarpore R besteht der Zusammenhang:

$$R = r \cdot \cos \vartheta$$

Mit den vorstehenden Gleichungen und den Angaben im linken Teil von Bild 11 kann die Washburn-Gleichung für die **Kapillarspannung** p_k und die theoretische maximale **kapillare Steighöhe** h_k angegeben werden:

$$p_k = \frac{2\sigma_w \cdot \cos \vartheta}{R} \quad [\text{N/m}^2] \text{ und}$$

$$h_k = \frac{2\sigma_w \cdot \cos \vartheta}{R \cdot \rho_w \cdot g} \quad [\text{m}], \text{ mit}$$

R Radius der Kapillare [m],
 ρ_w Dichte des Wassers [kg/m^3] (bei 20 °C ist $\rho_w = 998 \text{ kg/m}^3$) und
 g Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$).

Die kapillare Steighöhe gut benetzbarer Stoffe hängt im Wesentlichen vom Radius ab und ist um so höher, je enger die Kapillare ist. Die kapillare Wasseraufnahme wird an Proben untersucht, die wenige cm tief in Wasser eingetaucht werden (Bild 12). Schwankungen in der aufsteigenden Wasserfront (Bild 12) hängen mit der Verteilung der Porenradien über dem Probenquerschnitt zusammen.

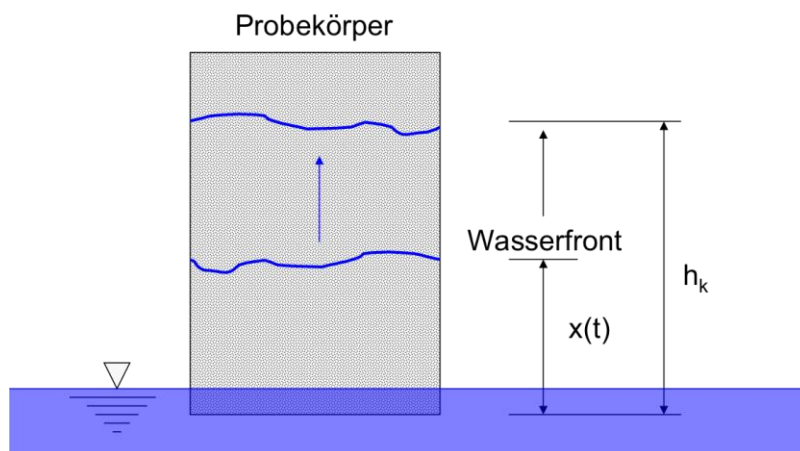


Bild 12: Prüfung der kapillaren Steighöhe poröser Stoffe

Die kapillare Wasseraufnahme ist ein zeitabhängiger Prozess, der annähernd einem $\sqrt{\text{Zeit}}$ - Gesetz folgt (Bild 13). Daher stellt sich die Steighöhe in porösen Stoffen nicht spontan, sondern erst nach einiger Zeit ein.

$$x(t) = B \cdot \sqrt{t} \quad [\text{m}]$$

Der **Wassereindringkoeffizient** B [$\text{m/s}^{1/2}$] beschreibt die Steiggeschwindigkeit der Wasserfront. Sie wird durch Kapillardruck und Fließwiderstand bestimmt und ist bei sehr engen Poren (z. B. Mikrokapillaren und Gelporen im Zementbeton) vernachlässigbar klein. In Mauerwerk kann die kapillare Steighöhe einige Meter betragen. In der Regel verdunstet das aufgesaugte Wasser an der Wandoberfläche. Das aufsteigende Wasser kann dabei lösliche Salze

mitführen. Besonders am oberen Feuchtigkeitssaum kommt es dann zu Ausblühungen. Das Wasser kann im Mauerwerk besonders hoch steigen, wenn die Verdunstung z. B. durch wasser- und diffusionsdichte Anstriche verhindert wird. Das Aufsteigen wird durch horizontale Feuchtigkeitssperren in den Wänden, das Eindringen durch wasserdichte Anstriche oder Beschichtungen auf den mit Wasser in Berührung stehenden Flächen unterbunden.

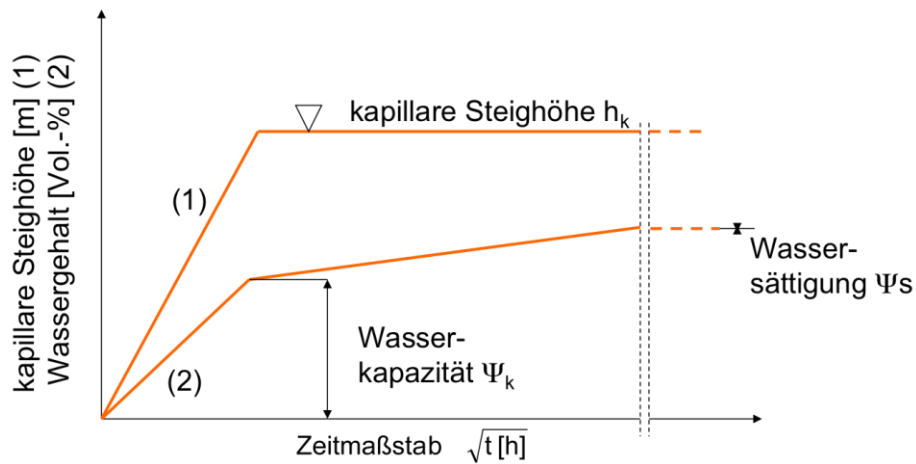


Bild 13: Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahme und der kapillaren Steighöhe

Die je Flächeneinheit des Körpers aufgenommene Wassermenge m_w folgt ebenfalls dem $\sqrt{\text{Zeit}}$ -Gesetz:

$$m_w(t) = A \cdot \sqrt{t} \quad [\text{kg/m}^2]$$

Der Koeffizient A [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{h}^{1/2})$] beschreibt die **Wasseraufnahmegeschwindigkeit** bis zum Knick der Kurve (2) in Bild 13. Die Knicke in den Kurven (1) und (2) entstehen durch die Sättigung des kapillar saugenden Porenraums. Der Feuchtegehalt am Knickpunkt der Kurve (2) bezeichnet die **Wasserkapazität** Ψ_k [Vol.-%]. Der flachere Teil der Kurve (2) symbolisiert das langsamere Füllen der großen Poren bis zum Erreichen der **Wassersättigung** Ψ_s [Vol.-%].

Die verschiedenen Prüfverfahren für das Eindringen von Wasser in poröse Baustoffe sind schematisch in Bild 14 zusammengestellt.

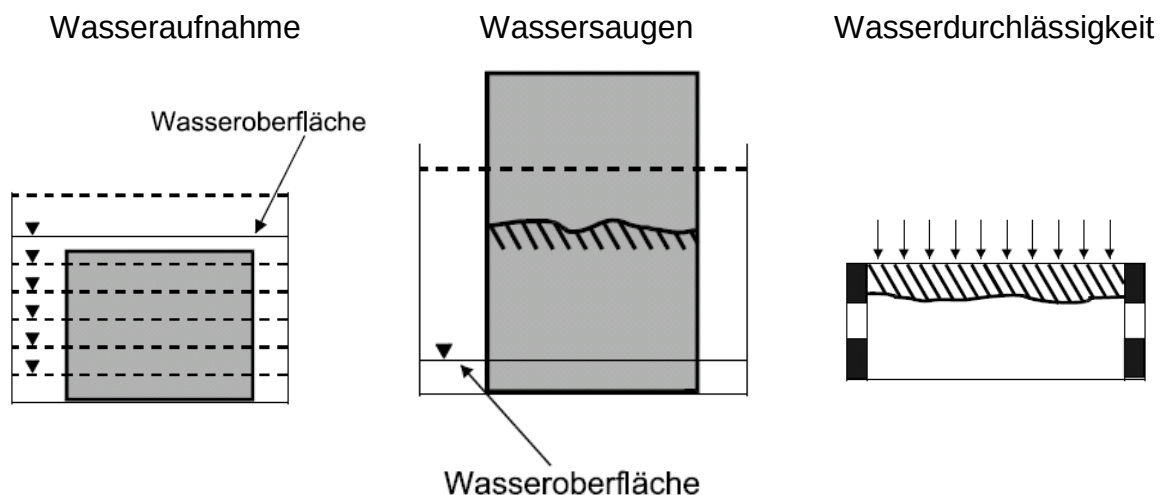


Bild 14: Prinzip der Prüfung des Verhaltens gegenüber Wasser

Um das Eindringen von Schlagregen in eine poröse Wand zu verhindern, können hydrophobierende Anstriche aufgebracht werden, durch welche die Stoffoberflächen schlechter benetzbar werden und so die kapillare Wasseraufnahme verringert oder ausgeschlossen wird. Der hydrophobierende Effekt lässt im Laufe der Zeit wieder nach.

5.4 Sättigungswert

Ist eine Probe durch kapillares Saugen und anschließende Unterwasserlagerung mit Wasser gesättigt worden (vgl. Bild 13 und Bild 14 links), kann durch Wägung die Wasseraufnahme bei normalem Atmosphärendruck (W_a) bestimmt werden. Taucht man eine trockene Probe sofort vollständig unter Wasser, ist es zwar nicht zwingend aber möglich, dass die in den Poren vorhandene Luft nicht vollständig entweicht. Ein noch besseres Entweichen der Luft erreicht man durch vorheriges Evakuieren der Probe und anschließende Druckwasserbeaufschlagung (W_d). Das Verhältnis von W_a zu W_d wird als Sättigungswert S bezeichnet ($S_{\max} = 1$). Ab einem bestimmten Sättigungswert können in porösen Baustoffen Frostschäden auftreten, weil nicht mehr genügend Poren zur Ausdehnung des im Gefüge gefrierenden Wassers zur Verfügung stehen.

5.5 Luftfeuchte

In Luft ist immer Wasserdampf enthalten. Die **absolute Luftfeuchte (u)** beträgt im baupraktisch relevanten Temperaturbereich von -20 °C bis $+40\text{ °C}$ etwa 1 bis 60 g/m^3 . Dabei kann die Luft immer nur eine bestimmte Menge Wasser als Dampf enthalten. Je größer die Temperatur der Luft, desto größer ist die maximal aufnehmbare Wasserdampfmenge, die als **Sättigungswassergehalt (u_s)** bezeichnet wird. Bei Überschreiten von (u_s) kommt es durch das Bilden von Kondensat zu Niederschlag (Nebel, Tau, Regen). Die Luftfeuchte wird in der Regel nicht als Wassergehalt in g/m^3 , sondern als Verhältnis zum jeweiligen Sättigungswassergehalt in % angegeben und als **relative Luftfeuchte (φ)** bezeichnet (Bild 15).

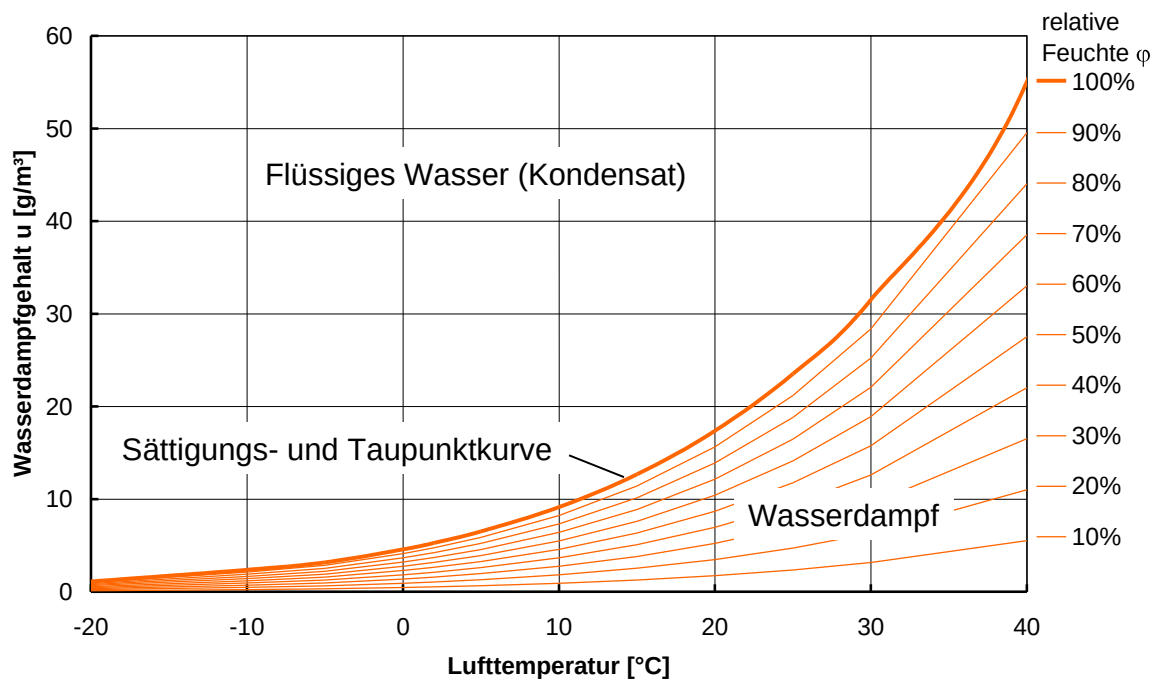


Bild 15: Wasserdampfgehalt von Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte φ

Die Wasserdampfkonzentration in der Luft wird auch mit dem **Wasserdampfpartialdruck p** angegeben. Beide stehen in folgendem Zusammenhang zueinander:

$$p = \frac{\varphi \cdot p_s}{100}$$

mit φ relative Luftfeuchte,
 p_s Partialdruck der wasserdampfgesättigten Luft.

Der **Sättigungspartialdruck** p_s ergibt sich aus der entsprechenden absoluten Luftfeuchte u_s [kg/m³] nach:

$$p_s = u_s \cdot R \cdot T$$

mit R Gaskonstante für Wasserdampf ≈ 462 [Nm/(kg · K)],
 T absolute Temperatur [K].

In Bild 16 ist der Zusammenhang aus Bild 15 noch einmal dargestellt. 20 °C warme Luft kann maximal 17,3 g/m³ Wasserdampf enthalten. Diese Temperatur wird in diesem Fall als **Taupunkt**(temperatur) bezeichnet. Wenn 20 °C warme Luft 8,65 g/m³ Wasserdampf enthält, so beträgt die relative Luftfeuchte $8,65/17,30 = 50$ % r.F..

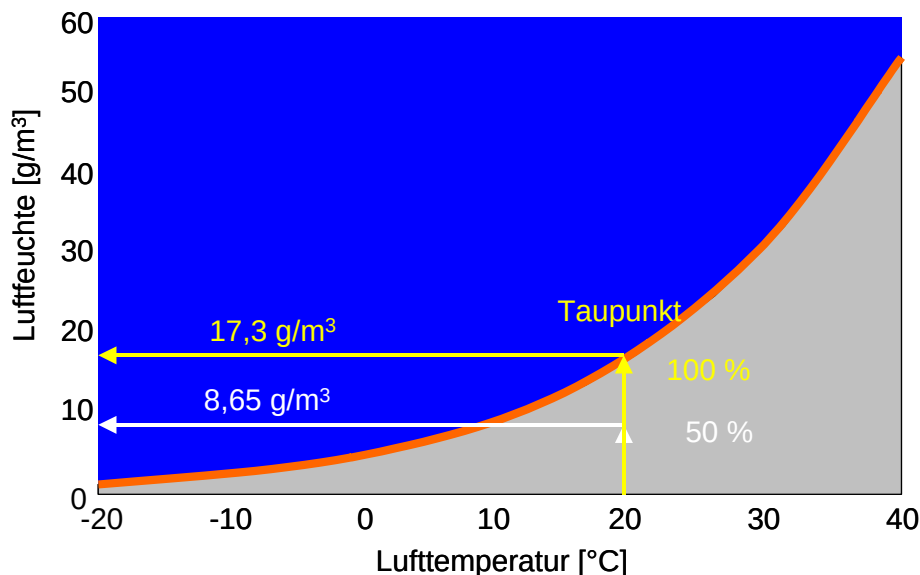


Bild 16: Luftfeuchte und Kondensation (1)

In Bild 17 ist der Zusammenhang beim Abkühlen von warmer Luft dargestellt. 30 °C warme Luft kann maximal 30 g/m³ Wasserdampf enthalten. In Bild 17 ist angenommen, dass die 30 °C warme Luft einen Feuchtegehalt von 15 g/m³ hat, mithin 50 % r. F. aufweist.

Wird diese Luft nun abgekühlt, so ändert sich der absolute Feuchtegehalt zunächst nicht. Jedoch nimmt die relative Luftfeuchte beim Abkühlen stetig zu, da kühlere Luft eine geringere Sättigungsfeuchte hat. Wenn die Luft auf ca. 18 °C abgekühlt ist, beträgt die Sättigungsfeuchte der Luft 15 g/m³, d. h., die relative Luftfeuchte beträgt 100 % r. F..

Bei weiterem Abkühlen auf ca. 5 °C beträgt die Sättigungsfeuchte nur noch 7 g/m³. Dies bedeutet, dass 8 g/m³ Feuchte ($15 - 7 = 8$) nicht mehr als Wasserdampf in der Luft enthalten sein können und als Tau oder Nebel ausfallen.

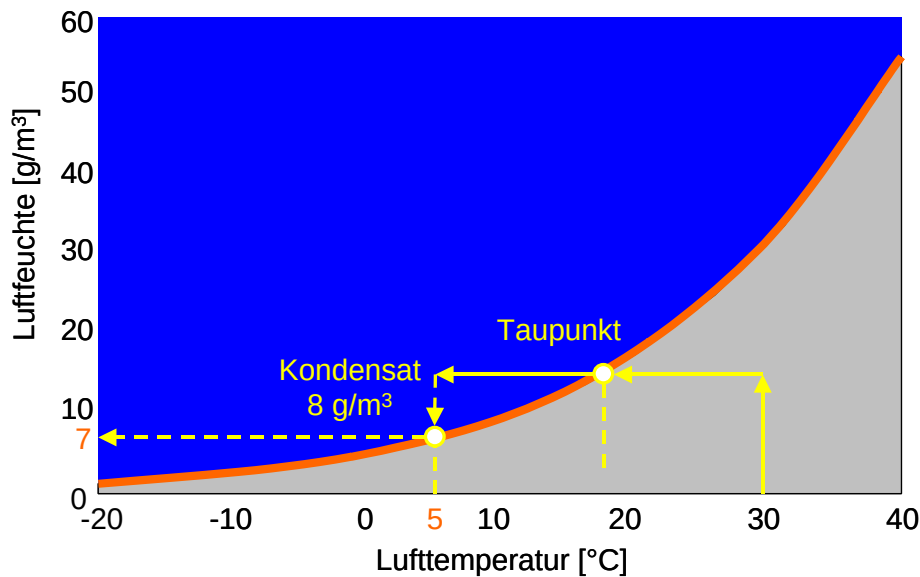


Bild 17: Luftfeuchte und Kondensation (2)

In Mitteleuropa liegt im langjährigen Mittel eine relative Luftfeuchte von knapp über 80 % vor. In Wohn- und Büroräumen beträgt sie im Sommer bei uns 50 - 70 %, im Winter infolge Beheizung 30 - 55 %. Bei bauphysikalischen Betrachtungen geht man daher von dem in Bild 18 dargestellten Feld für die Behaglichkeit aus.

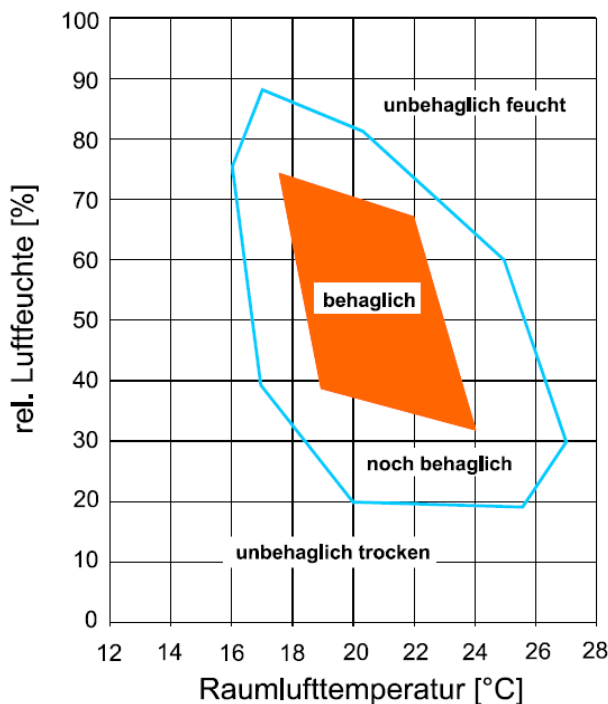


Bild 18: Behaglichkeitsfeld des Menschen in geschlossenen Räumen in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte

Die Luftfeuchte in geschlossenen Räumen kann durch Klimageräte (Regelung von Temperatur und Feuchte durch Heizen bzw. Kühlen und Verdampfen von Wasser bzw. Kondensieren an Kältefallen) oder durch bestimmte wässrige Lösungen beeinflusst werden. So lassen sich z. B. über Glycerin oder Schwefelsäure unterschiedlicher Konzentration oder über verschiedene, gesättigte Salzlösungen bestimmte relative Luftfeuchten einstellen (Tabelle 12).

Tabelle 12: Beispiele für relative Luftfeuchten über Trocknungsmittel und Salzlösungen

Relative Feuchte [%]	Gesättigte Salzlösung bzw. Trocknungsmittel	Temperatur [°C]
2	Silikagel	20
52	Natriumdichromat	20
66	Natriumnitrit	20
75	Natriumchlorid	25
85	Kaliumchlorid	20 – 23
90	Kaliumnitrat	25 - 38

5.6 Hygroskopie, Wasserdampfsorption

5.6.1 Hygroskopie

Setzt man z. B. trockenes Natriumchlorid (Kochsalz) bei einer Temperatur von 25 °C einer relativen Luftfeuchte von mehr als 75 % aus, so holt sich das Salz Wasser aus der Luft, in dem es sich löst, vergleiche Tabelle 12. Man sagt dann, der Stoff ist **hygroskopisch**.

5.6.2 Wasserdampfsorption

Obwohl die meisten porösen Baustoffe (z. B. Ziegel, Beton, Putz oder Holz) normal nicht hygroskopisch sind, so sind ihre Oberflächen aufgrund des hydrophilen Charakters doch bestrebt, sich je nach Höhe der relativen Luftfeuchte mit einer dünnen, wenige Moleküle umfassenden Wasserschicht zu bedecken. Diese **Adsorption** von Wasserdampf aus der Luft ist besonders ausgeprägt, wenn der Stoff eine sehr große, innere Oberfläche, d. h. einen hohen Anteil von sehr feinen Poren aufweist. Mikroporen oder auch Gelporen können dadurch im Freien bis zur Sättigung gefüllt sein.

Die Wasseraufnahme durch Adsorption von Wasserdampf aus der Luft hängt von der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ab. Es stellt sich im Baustoff jeweils eine bestimmte Gleichgewichtsfeuchte ein. Diese können experimentell für verschiedene Luftfeuchten bestimmt und in so genannten **Sorptionsisothermen** (Sorption = Wasseraufnahme; isotherm = gleiche, konstante Temperatur) grafisch dargestellt werden. Bild 19 zeigt ein typisches Beispiel der S-förmig verlaufenden Sorptionsisothermen hygroskopischer Baustoffe.

Die Sorptionsfähigkeit hängt von der offenen Porosität und der Verteilung der Porengrößen ab. Der trockene Baustoff lagert mit zunehmender relativer Luftfeuchte das Wasser zunächst adsorptiv auf seine inneren Porenflächen und in den sehr feinen Poren an. Die Schichtdicke dieses Wasserfilms wächst solange, bis es zur Kondensation in den größeren Kapillarporen kommt. Der Übergang zwischen adsorptiver Anlagerung und Kapillarkondensation ist fließend. Die vollständige Füllung der Poren bis zur Sättigungsfeuchte u_s wird durch eine Wasserlagerung erreicht.

Für den Vergleich verschiedener Baustoffe miteinander ist es sinnvoll, den Feuchtegehalt nicht auf die Masse (Bild 20), sondern auf das Volumen zu beziehen (Tabelle 13). Für Holz ist der Einfluss der Temperatur dargestellt. Weitere Angaben zu den massebezogenen Feuchtegehalten finden sich in DIN V 4108-4 und DIN EN 12524.

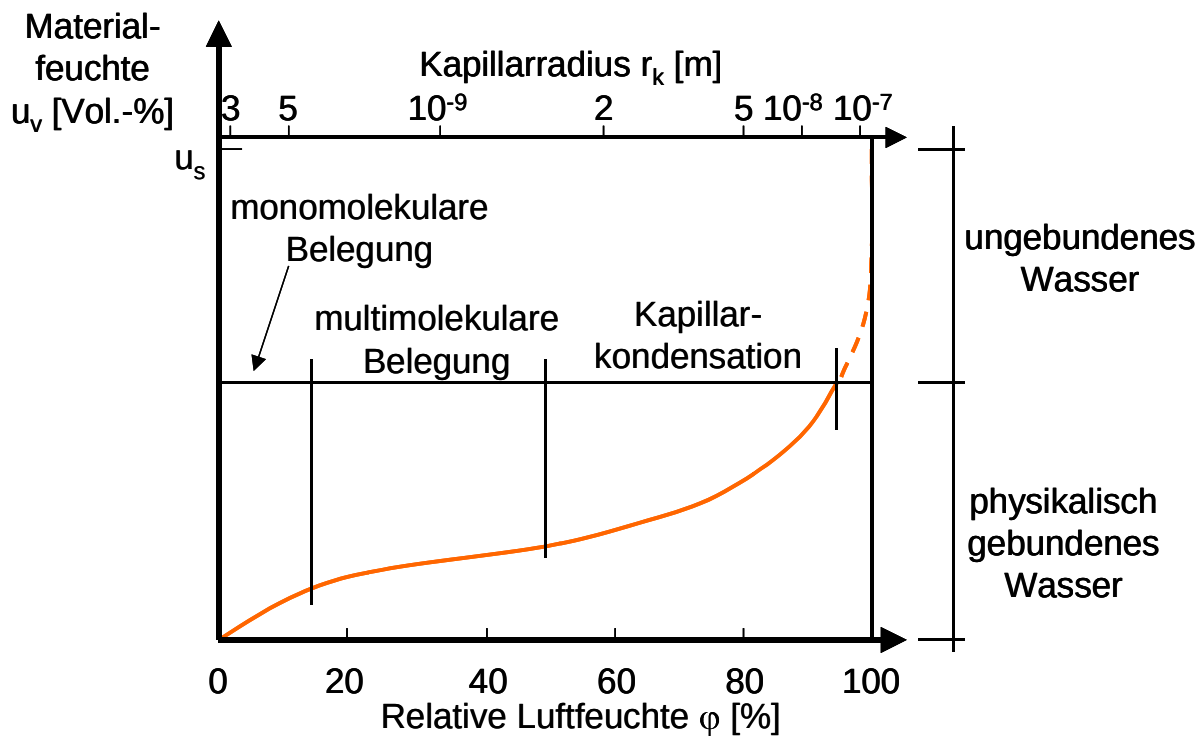


Bild 19: Typische Sorptionsisotherme für hygroskopische poröse Baustoffe

Durch ihr Sorptionsvermögen können die Baustoffe die Behaglichkeit in Wohnräumen beeinflussen, indem sie plötzliche oder kurzfristige Schwankungen der relativen Luftfeuchte ausgleichen. Hierbei zeichnen sich die organischen Baustoffe des Innenausbau gegenüber den mineralischen Baustoffen durch eine erhebliche höhere Aufnahmefähigkeit für die Luftfeuchte aus (Bild 20).

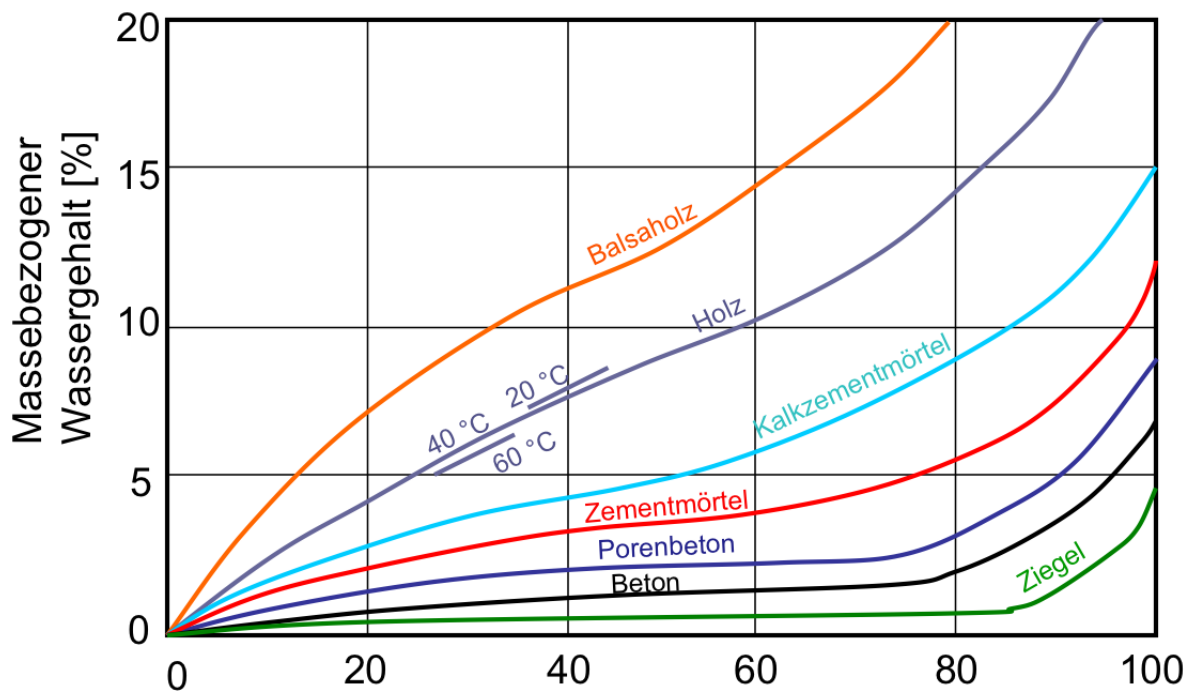


Bild 20: Schematische Sorptionsisothermen einiger poröser Baustoffe

Tabelle 13: Praktische Feuchtigkeitsgehalte für einige wichtige Baustoffe bei 20 °C und Rechenwerte der Ausgleichsfeuchtegehalte nach DIN V 4108-4

Baustoffe	Feuchtegehalt u_v [Vol.-%] bei rel. Luftfeuchte [%]					Ausgleichsfeuchtegehalt u [kg/kg]
	60	70	90	97	100	
Mauerziegel	0,2 – 1,0	0,2 – 1,0	0,2 – 1,0	0,5 – 2,3	0,6 – 4,0	
Zement- und kalkgebundene Steine	0,6 – 9,0	0,7 – 9,0	1,0 – 12	1,3 – 13	2,0 – 13	0,045
Normalbeton	1,2 – 1,6	1,5 – 1,8	1,7 – 2,0	2,5 – 3,0	3,0 – 4,0	0,13
Leichtbeton	1,0 – 5,5	1,2 – 6,0	2,0 – 8,0	-	-	0,03
Porenbeton	1,8 – 2,0	2,2 – 3,0	3,0 – 5,0	4,0 – 11	-	
Holz (Mittelwert)	3,5 – 11	4,0 – 15	6,5 – 20	7,5 – 25	12 – 35	0,15
Organische Dämmstoffe	2,0 – 17	-	2,0 – 28	2,3 – 55	9 – 55	0,15

Die Isothermen von Adsorption und **Desorption** decken sich nicht unbedingt. Wie Bild 21 zeigt, kann sich zwischen beiden Isothermen eine Hysterese ausbilden.

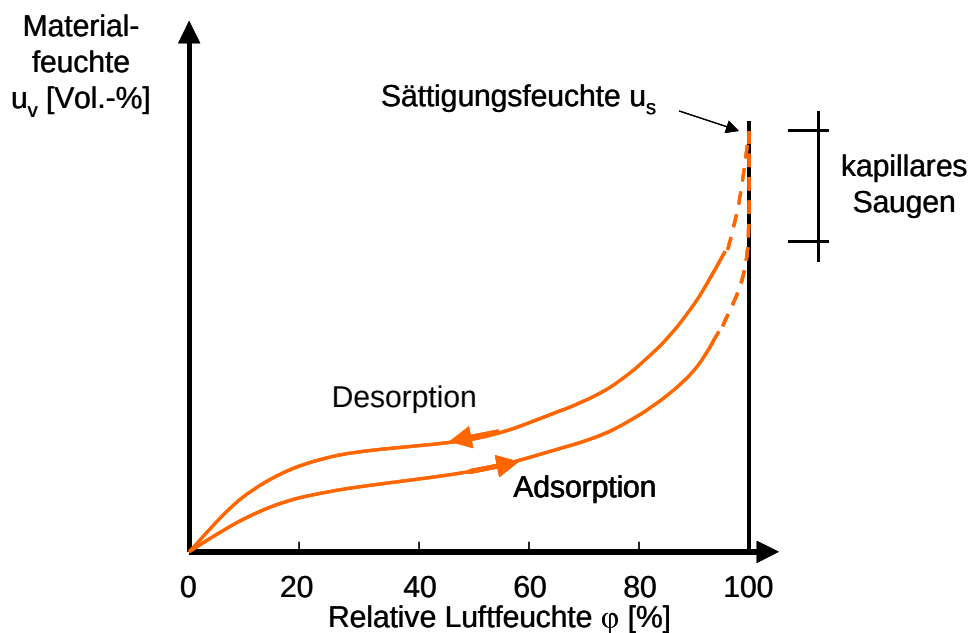


Bild 21: Schematische Darstellung der Adsorption und der Desorption eines porösen Baustoffs

5.7 Wasserdampfdiffusion

Diffusion ist der Transport freier Atome, Moleküle oder Ionen durch einen festen Stoff als Folge und in Richtung eines Konzentrationsgefälles. Bestehen z. B. auf beiden Seiten einer dampfdurchlässigen Wand der Dicke d_L unterschiedliche Partialdrücke $\Delta p = \Delta \phi \cdot p_s$, so streben die Wassermoleküle in der Luft einen Konzentrationsausgleich an, d. h., es diffundieren Wassermoleküle durch die Wand hindurch. In Bild 22 findet dieser Austausch stellvertretend durch die Röhre solange statt, bis die Dampfdrücke zu beiden Seiten der Wand gleich sind. Die **Diffusionsstromdichte** i_L des Wasserdampfes in Luft beträgt:

$$i_L = \delta_L \cdot \frac{\Delta p}{d_L} \quad [\text{g}/(\text{m}^2\text{h})]$$

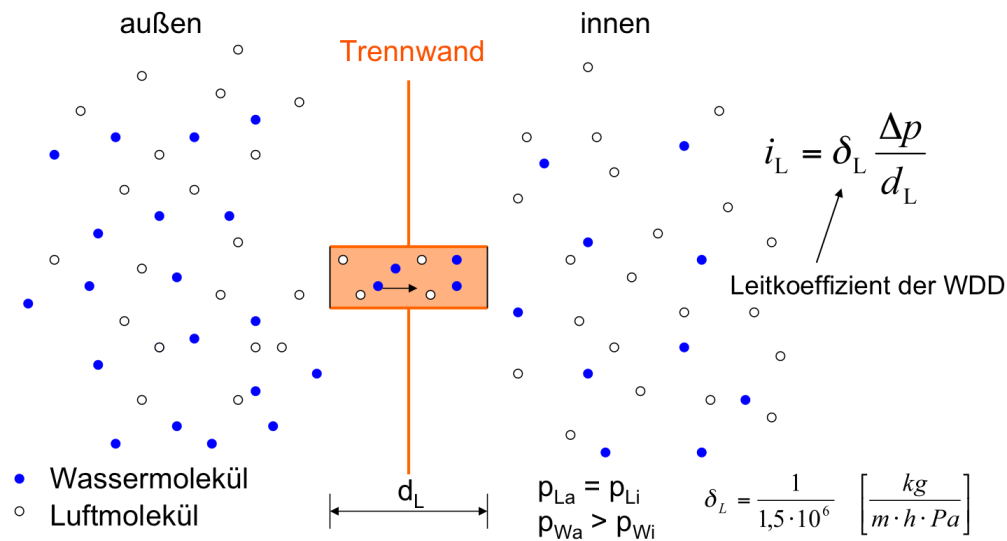


Bild 22: Vorgang der Wasserdampfdiffusion in Luft

δ_L ist der **Leitkoeffizient der Wasserdampfdiffusion (WDD)** in Luft. Der Wert des Leitkoeffizienten δ_L hängt vom Luftdruck und der Temperatur ab. Er beträgt bei 20 °C und 1013 hPa:

$$\delta_L = \frac{1}{1,5 \cdot 10^6} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{Pa}} \right]$$

Wäre die Röhre in Bild 22 mit einem porösen Baustoff gefüllt, könnte die Wasserdampfdiffusion nur noch deutlich verlangsamt ablaufen und mit folgender Beziehung beschrieben werden:

$$i = \delta \cdot \frac{\Delta p}{d} \quad [\text{g}/(\text{m}^2\text{h})]$$

δ bezeichnet die Wasserdampfmenge in g, die stündlich durch eine 1 m dicke poröse Baustoffschicht bei einem konstanten Druckunterschied diffundiert. Als **WDD-Durchlasszahl Δ** allgemein ist definiert:

$$\Delta = \frac{\delta}{d}.$$

Der Kehrwert $1/\Delta$ wird als Wasserdampfdiffusions-Durchlasswiderstand bezeichnet:

$$\frac{1}{\Delta} = \frac{d}{\delta}.$$

Das Diffusionsverhalten eines Baustoffes wird durch die **Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ** gekennzeichnet. Sie ist eine Verhältniszahl, die ausdrückt, wie viel mal größer der Widerstand des Stoffes im Vergleich zu ruhender Luft ist. Daher gilt für Luft als Bezugsgröße $\mu = 1$.

$$\mu = \frac{i_L}{i} = \frac{\delta_L}{\delta} \geq 1$$

Zur Messung des Diffusionswiderstandes werden auf beiden Seiten einer Probe unterschiedliche, konstante Luftfeuchten eingestellt und der Wasserdampfdurchgang gemessen. Nach DIN 52615 wird die Probe hierfür dicht auf eine Schale, z. B. aus Metall, aufgeklebt, die eine Lösung oder ein Trocknungsmittel zur Herstellung einer bestimmten relativen Luftfeuchte (φ_1) enthält (vgl. Tabelle 12) (Bild 23). Diese Anordnung wird in einem Raum mit einer anderen Luftfeuchte (φ_2) gelagert und in zeitlichen Abständen gewogen. Die Versuchsauswertung liefert zunächst die Wasserdampf-Diffusionsstromdichte i , aus der zusammen mit der Proben-
dicke s und der Partialdruckdifferenz Δp zunächst der Diffusionsleitkoeffizient δ des Baustoffs und dann dessen Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ bestimmt werden kann.

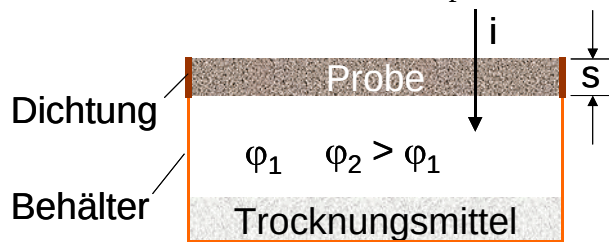


Bild 23: Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52615

Der Wasserdampfdiffusions-Widerstand von Beschichtungen und Anstrichen wird in vergleichenden Messungen ermittelt, indem beschichtete und unbeschichtete Proben gemessen und miteinander verglichen werden.

Bei Stoffen, die nur in bestimmter Konstruktionsdicke (s) zu betrachten sind, z. B. Anstriche, Beschichtungen, wird der Diffusionswiderstand auch als die **äquivalente Luftschichtdicke** s_d angegeben:

$$s_d = \mu \cdot s \text{ [m]}.$$

Der Transport von Wasserdampf durch die Poren eines Baustoffes ist nicht mehr möglich, wenn die mittlere, freie Weglänge der Wassermoleküle (Brown'sche Molekularbewegung im Gas) größer als die Porenabmessung ist. Durch Kondensation des Dampfes in den Poren (Sorption) kann jedoch auch Wasser in flüssiger Form transportiert werden und an der Rückseite der Wand wieder verdampfen. Da diese Transportart weit leistungsfähiger ist, als die reine Dampfdiffusion kann bei praktisch allen porösen Stoffen festgestellt werden, dass scheinbar um so mehr Dampf durchgelassen wird, je höher der mittlere Feuchtegehalt des Stoffes ist. Die Widerstandszahl μ ist daher stark Feuchte abhängig (Bild 24).

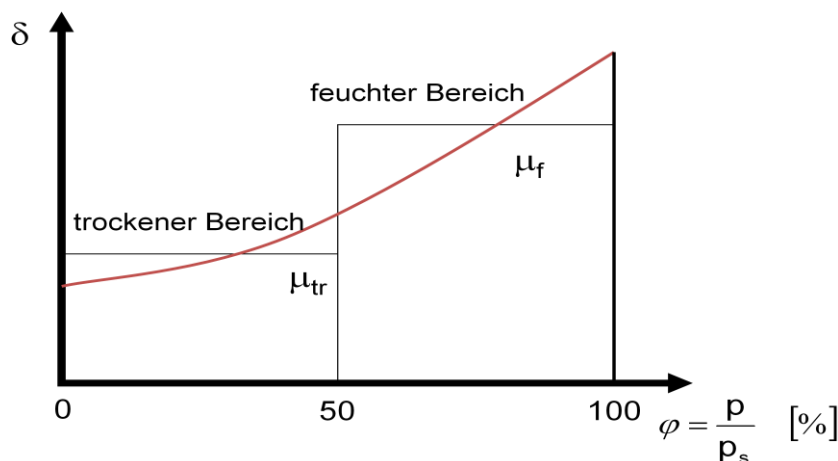


Bild 24: Einfluss der Feuchtigkeit auf die WDD-Leitzahl δ poröser Baustoffe

Der Einfluss der mittleren Feuchte des Stoffes wird häufig durch Messung bei den Feuchtegefällen 50/0 % r. F. und 100/50 % r. F. erfasst (Trocken-/Feuchtbereichsverfahren) (Bild 24). Das Verhältnis der Widerstandszahlen $\mu_{\text{feucht}}/\mu_{\text{trocken}}$ liegt je nach Stoff zwischen 0,008 und 1,0.

Für bauphysikalische Berechnungen werden in DIN V 4108-4 Richtwerte für verschiedene Stoffe genannt. Sie sind als Auszug in Tabelle 14. Mit diesen Richtwerten kann die Wirksamkeit unterschiedlicher Abdichtungsmaßnahmen leicht miteinander verglichen werden:

Mineralischer Putz 15 mm $\mu \cdot s = 15 \cdot 0,015 = 0,225 \text{ m}$

PVC-Folie ($d \geq 0,1 \text{ mm}$) $\mu \cdot s = 20000 \cdot 0,0001 = 2 \text{ m}$

Die Folie bietet also einen deutlich größeren Wasserdampf-Diffusionswiderstand als der Putz.

Tabelle 14: Richtwerte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl nach DIN V 4108-4

Baustoff	Richtwert der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ [–]
Putz	
Mineralisch	5/20 bis 15/35
Kunstharzputz	50/200
Normalbeton	70/150
Leichtbeton	
gefügedicht	70/150
haufwerksporig	5/15
Mauerwerk aus	
Hochlochziegel	5/10
Kalksandstein	5/10 bis 15/25
Porenbeton	5/10
Leichtbeton	5/10 bis 10/15
Holz	
Vollholz	40
Flachpressplatte	50/400
Dämmstoffe	
Mineralisch	1
pflanzlich	2/5 bis 5/10
Schaumkunststoffe	20/50 bis 80/250
Schaumglas	praktisch dampfdicht
Abdichtungen	
Bitumendachbahn	2000/20000 bis 10000/80000
PVC-Folie ($d \geq 0,1 \text{ mm}$)	20000/50000
Aluminiumfolie ($d \geq 0,05 \text{ mm}$)	praktisch dampfdicht

5.8 Tauwasserbildung [Lit 21]

Wenn bei bestimmten Temperatur- und Feuchteverhältnissen im Innern der Wand die Temperatur unterhalb der Taupunkttemperatur liegt, kann es durch Kondensation zu Tauwassernie-

derschlag und zu einer starken Durchfeuchtung des Wandbaustoffes kommen. Die folgenden Maßnahmen verringern diese Gefahr für den Wärmeschutz und gleichzeitig mögliche Schäden:

- Wärmedämmschichten auf der "kalten" Seite (Wohnungsbau = außen),
- keine dampfdichte Schicht auf der "kalten" Seite, d. h. Putze/Anstriche, welche die kapillare Wasseraufnahme infolge Schlagregen vermindern sollen. Solche Schichten müssen "dampfdurchlässig" sein,
- ggf. dampfdichte Schicht auf der "warmen" Seite (Dampfsperre).

5.9 Wasserabgabe [Lit 21]

Ein erhöhter Feuchtegehalt (bei Außenwänden z. B. infolge Schlagregen, häufig hohe Feuchte in Bädern etc., bei Estrichen z. B. als "Baufeuchte" aus der Herstellung) ist nicht immer ganz zu verhindern. Daher ist es günstig, wenn der Baustoff gut dampfdurchlässig ist und so leicht austrocknen kann.

Beim Baustoffen mit einer guten Wasserabgabefähigkeit nimmt die Feuchte mit der Zeit sehr schnell ab und es kommt nur zu geringen Feuchtegradienten zwischen Oberfläche und Kern. Baustoffe mit einer schlechten Wasserabgabefähigkeit geben die Feuchte mit der Zeit sehr langsam ab und es kommt zu großen Feuchtegradienten zwischen Oberfläche und Kern. Obwohl diese Baustoffe oberflächlich genauso trocken sind wie Baustoffe mit guter Wasserabgabefähigkeit, weist der Kern noch eine große Feuchte auf. Würde der Baustoff jetzt auch auf der Oberfläche mit einer dampfdichten Beschichtung versehen, könnte die Feuchte aus dem Kern an die Oberfläche wandern und diese wieder befeuchten. Bei einer feuchteempfindlichen Beschichtung käme es dann zu Feuchteschäden, z. B. Blasenbildung.

Bei Bauteilen, die durch Regen beaufschlagt werden, sind auch Anstriche/-Beschichtungen oder Imprägnierungen von Vorteil, welche die kapillare Wasseraufnahme stark behindern, den Dampftransport zwecks Wasserabgabe und Trocknung aber noch zulassen.

6 Beständigkeit [Lit 21]

Baustoffe sollen unter allen auftretenden Einflüssen möglichst unbegrenzt beständig sein. Diese Forderung bedeutet, dass sich die wichtigen Eigenschaften nicht verschlechtern, also Form und Zusammenhalt bewahrt bleiben, die Festigkeit nicht verloren geht, das Formänderungsverhalten sich nicht verschlechtert und weitgehend auch das gewünschte Aussehen erhalten bleibt.

6.1 Witterungsbeständigkeit

Die Einflüsse der Witterung, vor allem Wind, Regen, Sonnenschein, Temperaturwechsel und Frost, wirken zerstörend auf Baustoffe. Es können auch chemische Einwirkungen eine Rolle spielen, besonders in Industrie- und Großstadtluft. Die größte Bedeutung haben in unserem Klima die Zerstörungen durch Wasser und durch Frost.

Unbeständig gegen Wasser sind Gips (der gelöst wird) und Lehm (der weich wird). Wasser kann auch manche Stoffe "auslaugen", z. B. einige Natursteine oder zu Pilzbefall und Fäulnis bei Holz führen.

6.2 Frostwiderstand

Frostwiderstand wird in unserem Klima von allen Baustoffen gefordert, die der Witterung ausgesetzt sind. Frostzerstörungen entstehen überwiegend durch "Sprengwirkung" des Eises (Volumenzunahme um rund 9 % beim Übergang von Wasser zu Eis). Gefährdet sind nur poröse Stoffe (Beton, Ziegel, manche Natursteine), und diese auch nur, wenn die Poren zum Großteil wassergefüllt (Kapitel 0) sind. Da durch die Frosteinwirkung eine allmähliche Gefügelockerung auftritt, d. h. bei jedem Einfrieren eine erneute Mikro-Rissaufweitung stattfindet, wird der Frostwiderstand durch Frostversuche geprüft, bei denen die Proben häufigen Wechseln (25 bis 50, unter Umständen auch bis 200 und mehr) von Gefrieren bei -20 °C und Auftauen bei +20 °C ausgesetzt werden. Man beurteilt die Proben anschließend anhand der Zerstörungen wie z. B. Kantenabplatzungen, Risse, Absprengungen, bleibende Dehnungen oder häufig anhand des Abfalls des E-Moduls. Bei gleichzeitiger Einwirkung von Frost und Tausalz (meist NaCl) werden die Zerstörungen meistens wesentlich stärker.

6.3 Zerstörung durch Kristallisationsdruck

Beim Verdunsten von Lösungen, die Salze (meist Sulfate, seltener Nitrate) enthalten, entstehen nicht nur unschöne Ausblühungen, sondern es kann durch die in den Poren des Baustoffes wachsenden Salzkristalle ein hoher Druck entstehen, der zu Zerstörungen führt.

6.4 Alterung

Die Alterung bezeichnet die im Laufe der Zeit eintretenden chemischen und physikalischen Veränderungen von Stoffen, oft in dem Sinne, dass sie spröde oder brüchig werden oder ihr Aussehen verändern. Sie wird durch verschiedene Einflüsse hervorgerufen oder verstärkt, z. B. durch hohe Temperaturen, UV-Strahlen und chemische Einwirkungen. Eine merkliche Alterung kann z. B. bei kalt verformten Stählen, bituminösen Stoffen und Kunststoffen auftreten.

6.5 Chemische Beständigkeit (Korrosionsverhalten)

Die Zerstörung oder Zersetzung von Baustoffen durch chemische Einflüsse (z. B. Rosten von Stahl) ist in allen Bereichen des Bauwesens besonders zu beachten und gegebenenfalls durch Schutzmaßnahmen (Anstriche usw.) zu verhindern.

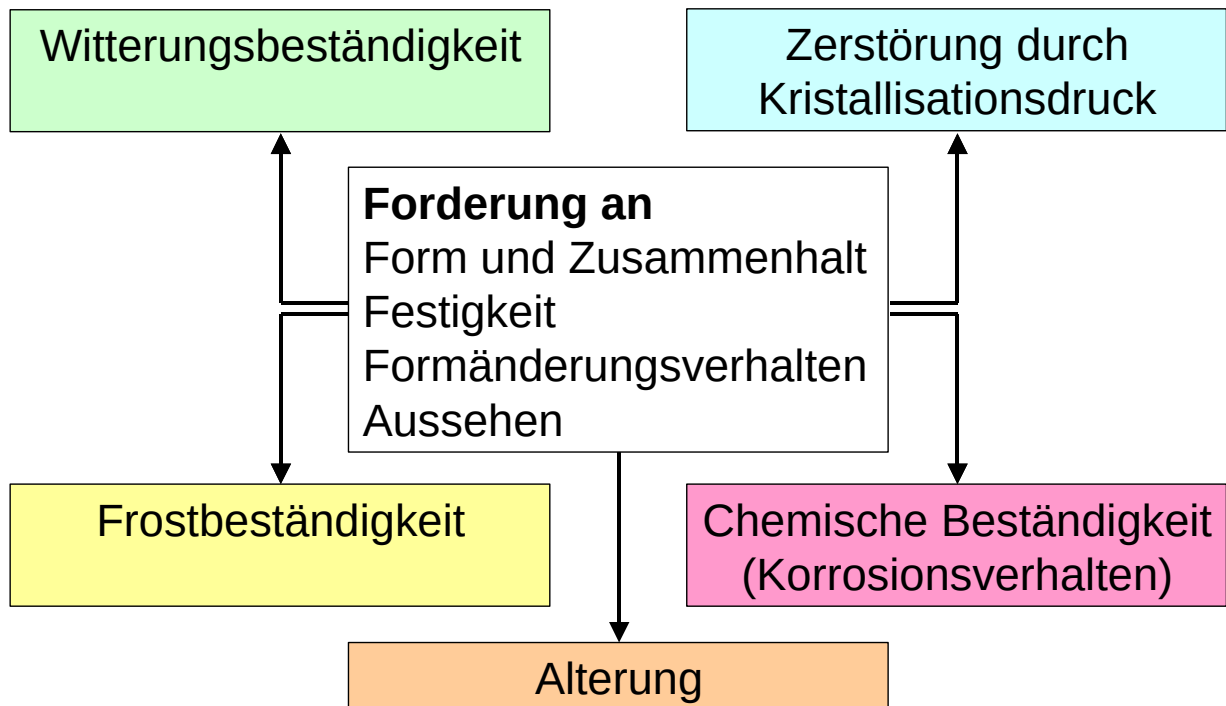


Bild 25: Beständigkeit

7 Bauphysikalische Eigenschaften

7.1 Verhalten gegenüber Wärme und Kälte

7.1.1 Einleitung

Der bauliche Wärmeschutz verfolgt allgemein folgende Ziele:

- Nutzer von Bauwerken sollen vor klimatischen Einwirkungen wie Kälte, Hitze, Sonneneinstrahlung usw. geschützt werden. Dazu soll in den Bauwerken ein gesundes und behagliches Wohnklima ermöglicht werden.
- Sparsamer Einsatz von Heiz- und Kühlanlagen.
- Schutz der Bauwerke gegen Feuchteschäden z. B. infolge von Feuchtekondensation auf den Oberflächen oder im Inneren von Bauteilen.

Seit Anfang 2002 gilt in Deutschland die **Energieeinsparverordnung (EnEV)**. Sie wurde mit dem Ziel eingeführt, den Energiebedarf von Gebäuden in Deutschland um 25 bis 30 % zu senken. Diese Maßnahme gehört zu den wesentlichen Elementen des bundesdeutschen Klimaschutzprogramms. Sie hat zu Ziel, bis 2005 die CO₂-Emission gegenüber 1995 um 25 % zu reduzieren. Die Regelungen der EnEV wurden zuletzt zum 1.10.2009 verschärft.

Der bauliche Wärmeschutz umfasst mehrere Bereiche:

- Der **Mindestwärmeschutz** gemäß EnEV und DIN 4108-2 gewährleistet eine Mindesttemperatur auf den inneren Raumbegrenzungsflächen. Der Ausfall von Tauwasser durch das Unterschreiten der Taupunkttemperatur auf diesen Flächen wird vermieden und ein gesundes und behagliches Wohnklima sichergestellt. Es muss auf jeden Fall ausgeschlossen werden, dass sich durch eine ungenügende Wärmedämmung einzelner Bauteile eine zu niedrige Temperatur auf den Innenflächen der Bauteile einstellt und dadurch der Niederschlag von Wasserdampf (Tauwasserbildung) möglich wird. Schimmelbildung und ein ungesundes Raumklima wären die Folge.
- Durch den **energiesparenden Wärmeschutz** nach EnEV wird die CO₂-Emission durch eine effizientere Energienutzung und eine verbesserte Wärmedämmung eingespart.
Die gestiegene Qualität der Dämmung hat unter anderem zu erhöhten Anforderungen an die Luftdichtheit der äußeren Umfassungsflächen und verschärften Anforderungen an die bauliche Durchbildung mit dem Ziel geführt, lokale Wärmebrücken möglichst zu vermeiden.
- Im Sommer sollen sich die Räume nicht zu stark aufheizen. Der **sommerliche Wärmeschutz** soll eine behagliche Innentemperatur in Gebäuden auch bei hohen Außentemperaturen erhalten und das Kühlen durch Anlagen möglichst vermeiden. Der sommerliche Wärmeschutz betrifft weniger die Dämmung als vielmehr den Wärmeintrag durch Sonneneinstrahlung und die Fähigkeit zur Wärmespeicherung.

7.1.2 Wärmetechnische Größen

Im Zuge der europäischen Normung wurde vielen wärmetechnischen Größen ein anderes Symbol zugeordnet. Die neue Zuordnung enthält Tabelle 15. Gegenüberstellungen mit den früher verwendeten Symbolen finden sich unter anderem in [Lit 9] und [Lit 22]. Definitionen und physikalische Größen finden sich unter anderem in [Lit 14].

Tabelle 15: Größen, Symbole und Einheiten

Größe	Symbol	Einheit
Schichtdicke	d	m
Wärme übertragende Fläche	A	m ²
Spezifische Wärmespeicherkapazität	c	J/(kg · K)
thermodynamische Temperatur	T	K
Celsius-Temperatur	θ	°C
Temperaturdifferenz	ΔT	K
Wärme, Wärmemenge	Q	W · s (= J)
Wärmestrom	Φ	W (= J/s)
Wärmestromdichte	q	W/m ²
Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitzahl	λ	W/(m · K)
Wärmeübergangskoeffizient	h	W/(m ² · K)
Wärmedurchlasswiderstand	R	m ² · K/W
Wärmedurchgangswiderstand	R _T	m ² · K/W
innerer Wärmeübergangswiderstand	R _{si}	m ² · K/W
äußerer Wärmeübergangswiderstand	R _{se}	m ² · K/W
Wärmedurchgangskoeffizient	U (= 1/R)	W/(m ² · K)
Wärmespeicherfähigkeit (volumenbezogen)	Q'	J/(m ³ · K)
Wärmespeicherfähigkeit (flächenbezogen)	Q''	J/(m ² · K)
Wärmeeindringzahl	b	J/(m ² · s ^{1/2} · K)

7.1.3 Thermische Eigenschaften

Die **Spezifische Wärmespeicherkapazität c** (oder auch „Spezifische Wärmekapazität“) gibt an, wie viel Wärme [J] benötigt wird, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen [massenbezogen]. Mit der Spezifischen Wärmespeicherkapazität kann man den Wärmeinhalt von Körpern bei bestimmten Temperaturen und auch die Temperaturänderungen bei Zufuhr oder Abfluss von Wärme bestimmen. Die Spezifische Wärmespeicherkapazität hängt nicht von der Rohdichte oder der Temperatur ab. Sie bewegt sich in relativ engen Grenzen und nimmt mit steigender Feuchte zu [Lit 20].

Die **volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit Q'** kann mit der Spezifischen Wärmespeicherkapazität und der Rohdichte eines Baustoffes berechnet werden:

$$Q' = c \cdot \rho \quad [\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})].$$

Die volumenbezogene Wärmespeicherfähigkeit gibt an, wie viel Wärme notwendig ist, um 1 m³ eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Je höher Q' ist und je dicker ein Bauteil ist, desto länger dauert es, bis sich ein Innenraum z. B. infolge Sonneneinstrahlung auf die Außenflächen erwärmt. Für die praktische Anwendung ist diese **flächenbezogene Wärmespeicherfähigkeit Q''** von größerer Bedeutung:

$$Q'' = c \cdot \rho \cdot d \quad [\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})].$$

Aus den beiden vorstehenden Gleichungen ist sofort ersichtlich, dass die Wärmespeicherfähigkeit mit steigender Rohdichte zunimmt. Ein hohes Wärmespeichervermögen ist günstig für den sommerlichen Wärmeschutz. Ebenso kühlt ein Raum bei hohem Wärmespeichervermögen der Wände nicht so rasch aus, besonders wenn außen eine zusätzliche Wärmedämmung angeordnet ist. Dadurch werden die Tagestemperaturschwankungen bzw. die Schwankungen im Heizleistungsbedarf gedämpft.

Tabelle 16: Wärmeschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe [Lit 10, Lit 15]

Stoff	Spezifische Wärmespeicherkapazität c	volumenbezogen Wärmespeicherfähigkeit Q'
	[J/(kg · K)]	[kJ/(m ³ · K)]
Wasser	4190	4190
Eis	2000	1800
Luft	1008	1
Massivholz, Sperrholz	1600	800
Massive Kunststoffe	900 - 2200	1300 - 2200
Wärmedämmstoffe	1000 - 2300	90 - 160
Beton	1000	2300
Glas	750	1900
Stahl	450	3500
Aluminium	880	2500

7.1.4 Arten der Wärmeübertragung

Physikalisch betrachtet ist Wärme der Inhalt an kinetischer Energie der Moleküle eines Stoffes. Sie hängt unmittelbar mit der Temperatur zusammen. Die Wärme unterliegt einem natürlichen Ausgleichsbestreben. Bei der dazu erforderlichen Wärmeübertragung fließt ein **Wärmestrom** Φ von einem Bereich höherer Temperatur zu einem Bereich niedrigerer Temperatur. Es werden folgende Arten der Wärmeübertragung unterschieden (Bild 26):

1. **Wärmeleitung** (Brownsche Molekularbewegung). Sie ist der unmittelbare Wärmeaustausch benachbarter Teilchen in festen, flüssigen oder gasförmigen Stoffen.
2. **Konvektion** (Massetransport). Die Wärme wird mit Teilchen in Flüssigkeiten und Gasen mitgeführt, wobei diese ihren Energieinhalt mit sich führen.
3. **Wärmestrahlung**. Wärme wird in Form elektromagnetischer Strahlung von der Oberfläche eines Körpers abgegeben.

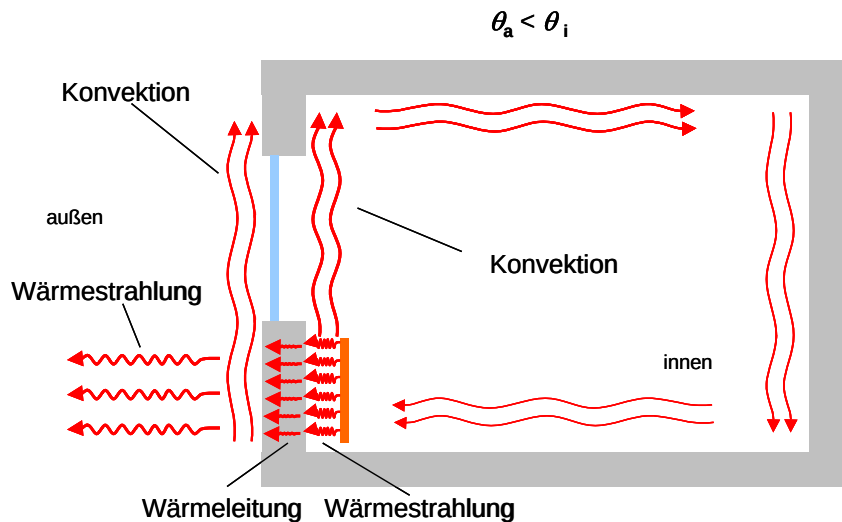


Bild 26: Arten der Wärmeübertragung

7.1.4.1 Wärmeübertragung durch Wärmeleitung

Im Winter stellt sich bei konstanter Bauteilinnentemperatur θ_i und konstanter Außentemperatur θ_a nach einiger Zeit ein stationärer **Wärmestrom Q** von innen nach außen ein. Der Wärmestrom, der dabei durch das Bauteil strömt, ist proportional zur Fläche A (**Wärmestromdichte q** [W/m^2]), dem Temperaturgefälle $\Delta\theta/d$ zwischen den Bauteiloberflächen und der **Wärmeleitfähigkeit λ** [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] (Bild 27).

$$Q = \lambda \cdot \frac{\theta_{oi} - \theta_{oa}}{d} = \lambda \cdot \frac{\Delta\theta}{d} \quad \text{W}$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ (oder Wärmeleitzahl) bezeichnet den Wärmestrom in W ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ Nm/s}$), der durch einen 1 m dicken Stoff auf einer Fläche von 1 m^2 bei einem Temperaturgefälle von 1 K pro Zeiteinheit hindurchgeht. Die Wärmeleitfähigkeit ist ein Stoffkennwert.

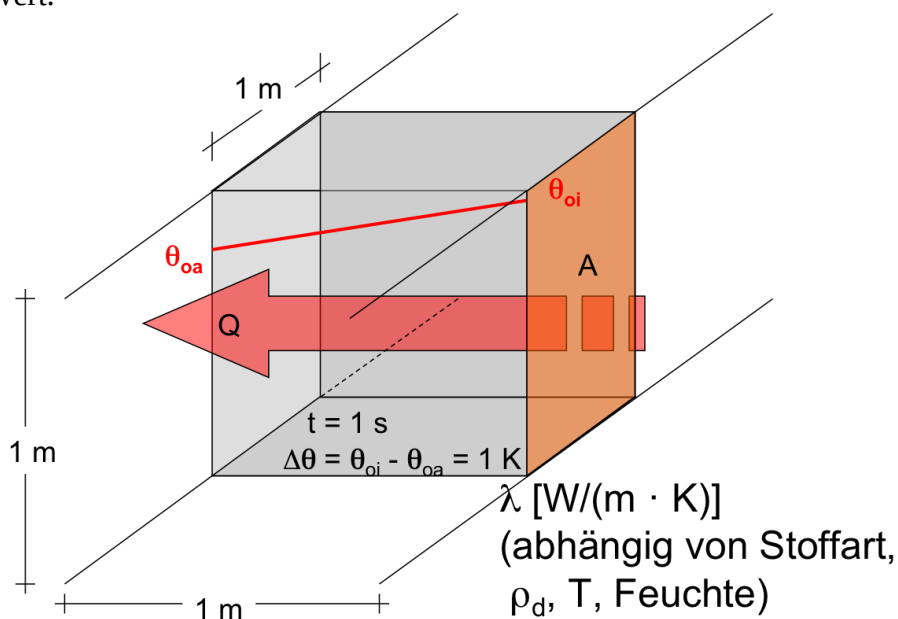


Bild 27: Wärmeleitfähigkeit

Das Baustoffgefüge hat einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit: Bei gleicher Dichte haben amorphe Stoffe geringere λ -Werte als kristalline. Große Bedeutung hat der Feuchtigkeitsge-

halt der Baustoffe (Bild 28), weil Wasser eine rund 24-mal größere Wärmeleitfähigkeit hat als ruhende Luft (vgl. Tabelle 17) und außerdem erhebliche Wärmemengen infolge Wasserdampfdiffusion übertragen werden. In DIN V 4108-4 [Lit 15] sind Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit λ angegeben, die den praktischen Feuchtigkeitsgehalt der Baustoffe berücksichtigen.

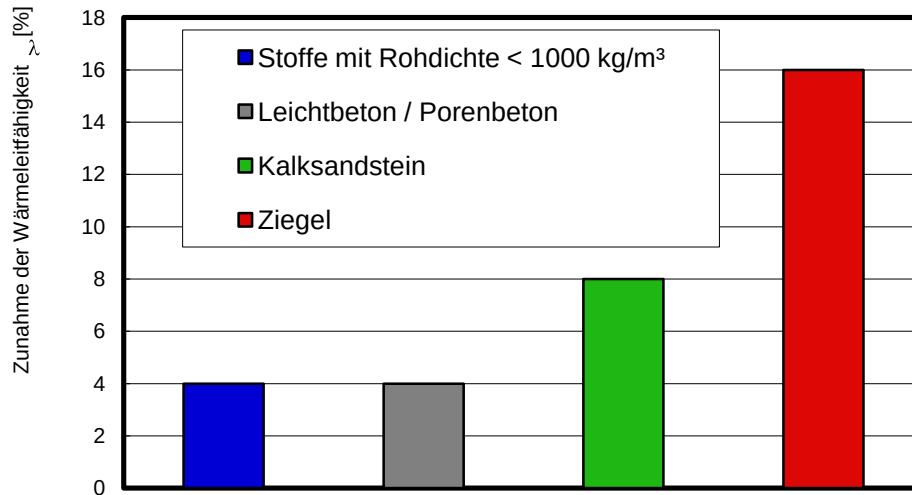


Bild 28: Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in [%] je Masse-% Feuchtezunahme

Tabelle 17: Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Stoffe

Stoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m · K)]
Kupfer	380
Aluminium	299
Stahl	60
Beton ($\rho_R = 2,4 \text{ kg/dm}^3$)	2,1
Stahlbeton ($\rho_R = 2,5 \text{ kg/dm}^3$)	2,33
Gefügedichter Leichtbeton ($\rho_R = 0,80 - 2,0 \text{ kg/dm}^3$)	0,36 – 1,92
Glas	0,80
Mauerwerk aus Voll- oder Lochziegeln, ($\rho_R = 1,4 \text{ kg/dm}^3$)	0,58
Moderne Mauersteine mit Dämmörtel, ($\rho_R = 0,35 - 0,60 \text{ kg/dm}^3$)	0,065 – 0,13
Wasser bei 0 °C	0,60
Eis bei 0 °C	2,23
Kunststoffe (häufiger Durchschnittswert)	0,23
Nadelholz	0,13
Schaum- und Faserdämmstoffe	0,024 – 0,065
Luft bei 20 °C	0,025 – 0,20
Vakuumpaneel	0,004

7.1.4.2 Wärmeübertragung durch Konvektion

Bei Baustoffen findet die Wärmeübertragung durch Konvektion im Wesentlichen durch sich bewegende Luft im Porenraum statt, die an der warmen Seite aufsteigt und an der kalten Seite abfällt. Hierdurch kommt es zu einer Zirkulation, die Wärme transportiert.

Die Wärmeleitfähigkeit wird mit zunehmendem Porenanteil eines Stoffes geringer (Bild 29), weshalb bei porigen Baustoffen immer die zugehörige Rohdichte mit angegeben werden muss. Viele kleine Poren sind günstiger als wenige größere Hohlräume, weil in Letzteren der Wärmetransport durch Konvektion stärker ins Gewicht fällt. Gleiches gilt für die Kammern und Schlitze in wärmedämmenden Mauersteinen (Bild 30).

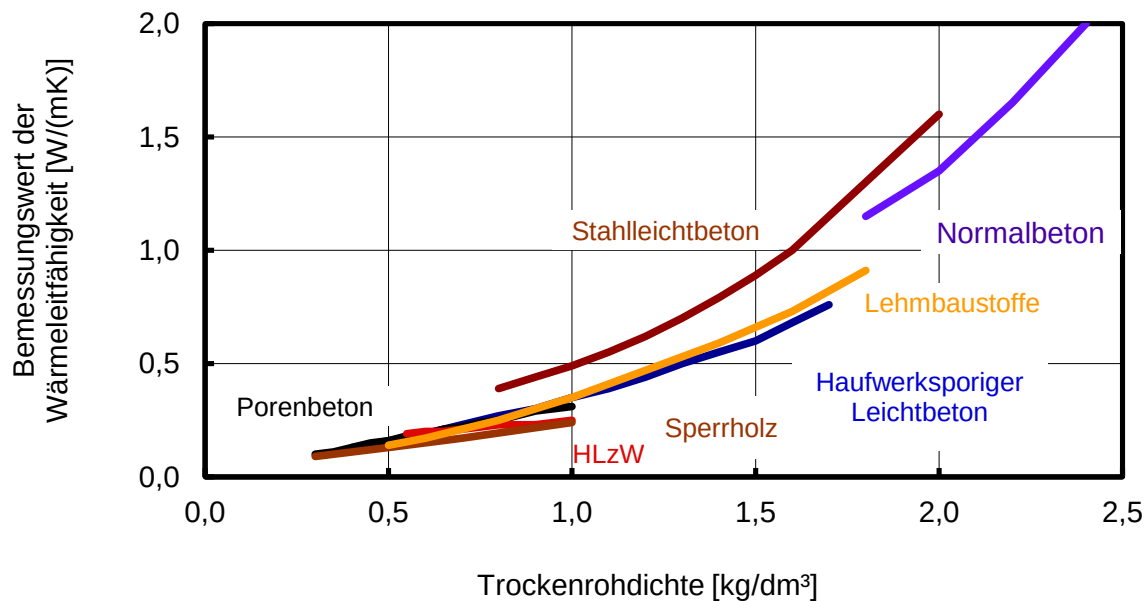


Bild 29: Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe [Lit 15, Lit 10]

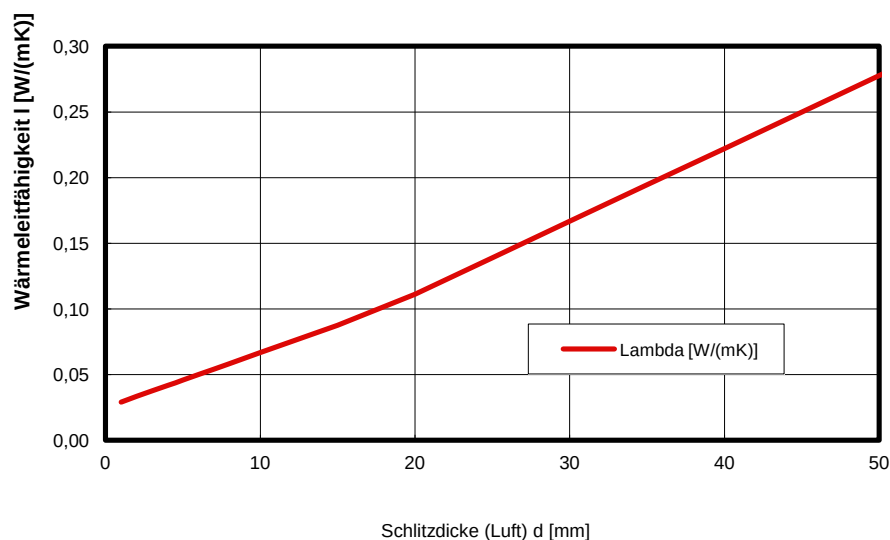


Bild 30: Wärmeleitfähigkeit stehender Luft (horizontaler Wärmestrom) [Lit 13]

Die Wärmedämmeigenschaft von Bauteilen wird durch den **Wärmedurchlasswiderstand R** [$\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$] beschrieben, der die Dicke d der Bauteilschicht berücksichtigt:

$$R = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right].$$

Der Wärmedurchlasswiderstand bezeichnet den Widerstand, ein Bauteil der Dicke d [m] einem Wärmestrom Q [W] durch eine Fläche A von 1 m^2 bei einem Temperaturunterschied von 1 K zwischen den Bauteiloberflächen entgegensetzt (Bild 31).

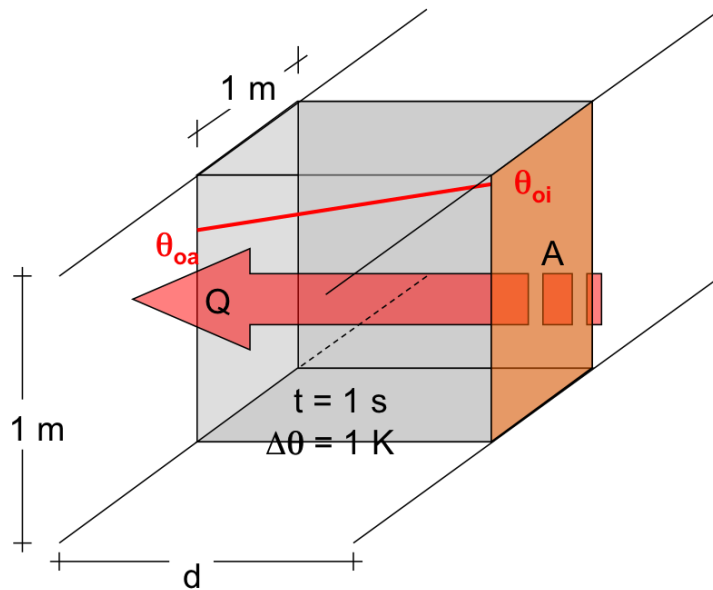


Bild 31: Wärmedurchlasswiderstand

Bei mehrschichtigen Bauteilen ist der Wärmedurchlasswiderstand des Bauteils:

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right].$$

Der Wärmedurchlasswiderstand ermöglicht einen Vergleich von verschieden aufgebauten, unterschiedlich dicken Bauteilen und ermöglicht die Bestimmung der Temperaturverteilung im Querschnitt (Bild 32). In DIN 4108-2 [Lit 9] sind für R Mindestwerte angegeben, die von Bauteilen nicht unterschritten werden dürfen, damit die geforderte Energieeinsparung erreicht wird. Der Wärmedurchlasswiderstand sollte möglichst groß sein, z.B. $R \geq 1,2 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$ bei Wohnungsaußenwänden.

Die **Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se}** kennzeichnen die Widerstände, die beim Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen, d. h. in der jeweils innen bzw. außen angrenzenden Luftschicht, überwunden werden müssen. Die Grenzschicht kann gewissermaßen wie eine auf den Oberflächen befindliche wärmedämmende Luftschicht betrachtet werden. Sie ist in Bild 32 durch den Temperaturabfall in der Luftschicht unmittelbar vor Wand dargestellt. Die Einheit für die Wärmeübergangswiderstände R_{si} und R_{se} ist wie bei R:

$$R_{si}, R_{se}, [\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}].$$

Der Wärmeübergangswiderstand ist um so kleiner, je größer die Windgeschwindigkeit ist. Außerdem hängt er von der Oberfläche, der Temperatur und der Richtung des Wärmestroms (aufwärts, horizontal oder abwärts) ab [Lit 13].

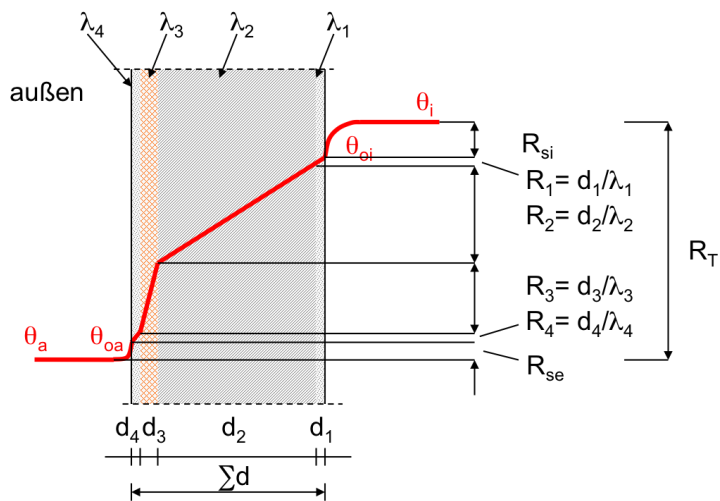


Bild 32: Wärmedurchgang durch ein mehrschichtiges Bauteil

Für Außenseiten beträgt der Wärmeübergangswiderstand bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 2 m/s: $R_{se} = 0,04 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W}]$.

Für Innenseiten von Bauteilen beträgt der Wärmeübergangswiderstand je nach Richtung des Wärmestroms: $R_{si} = 0,10 - 0,17 \text{ [m}^2 \cdot \text{K/W}]$.

Der **Wärmedurchgangswiderstand** R_T eines Bauteiles (z. B. Wand oder Fenster) ist die Summe aus R , R_{si} (innen) und R_{se} (außen).

($\Rightarrow$ Durchgangswiderstand = Summe der Durchlasswiderstände + Übergangswiderstände).

$$R_T = R_{si} + \sum R + R_{se} \left[\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right].$$

Den Kehrwert von R_T nennt man den Wärmedurchgangskoeffizient $U \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K)]}$.

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \sum R + R_{se}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient bezeichnet den Energiestrom in W (Energiestrom mal Zeit ergibt den Energieverlust in Ws), der durch eine Bauteilfläche von 1 m^2 bei 1 K Temperaturunterschied hindurchgeht. Für einen optimalen Wärmeschutz soll U möglichst klein sein.

Gemittelte Werte U_m werden für ganze Gebäude oder geschossweise für die Außenwände (einschließlich Fenster) aus den einzelnen Flächen $A_1, A_2, \dots, A_n$ mit den zugehörigen Werten $U_1, U_2, \dots, U_n$ berechnet zu:

$$U_m = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

Die zum 01.01.2002 in Kraft getretene und zuletzt zum 01.10.2009 novellierte Energieeinsparverordnung stellt Anforderungen an den maximal zulässigen Jahresheizwärmebedarf. In diesem Zusammenhang werden auch Höchstwerte für die Wärmedurchgangskoeffizienten verschiedener Bauteile vorgegeben. Für Außenwände von Gebäuden mit normaler Innentemperatur darf zum Beispiel der maximale Wärmedurchgangskoeffizient $U_{\max}$ nicht größer sein als $0,45 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Beispiele für U-Werte von Außenbauteilen sind in Tabelle 18 gegeben. Das Bild 33 zeigt anhand beispielhafter Wärmeleitfähigkeitswerte, wie sich eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit auf den Wärmedurchgangskoeffizienten auswirkt.

Tabelle 18: Beispiele für Wärmedurchgangskoeffizienten von Außenbauteilen

Bauteil - Baustoff	Wärmedurchgangskoeffizient U [W/(m ² · K)]
Fenster mit einfacher Verglasung	5,2
Altes Holzfenster mit Isolierglas, Luftzwischenraum > 10 mm bis ≤ 16 mm	2,6
Moderne Fenster (1,23 x 1,48m) mit zweifach Verglasung mit dreifach Verglasung	0,85 - 1,16 0,67 - 0,89
36,5 cm Außenwände mit 15 mm Innenputz und 20 mm Außenputz Beton ($\lambda = 2 \text{ W}/(\text{mK})$) Mauerstein nach Norm ($\lambda = 0,16 \text{ W}/(\text{mK})$) Mauerstein nach Zulassung ($\lambda = 0,10 \text{ W}/(\text{mK})$) Mauerstein nach Zulassung ($\lambda = 0,065 \text{ W}/(\text{mK})$)	2,22 0,39 0,26 0,17

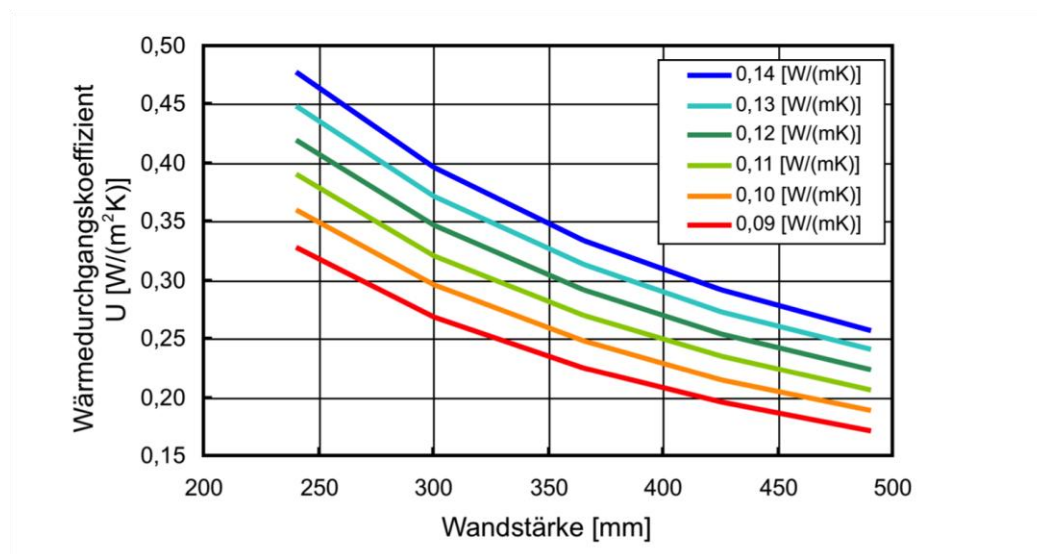


Bild 33: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf den Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wandstärke

Die **Wärmeeindringfähigkeit b** ist ein Maß dafür, wie schnell ein Stoff Wärme aufnehmen oder abgeben kann:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho} \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{K}} \right]$$

b ist vor allem bei Fußböden von Bedeutung. Wenn die Wärmeeindringfähigkeit groß ist, wird bei Berührung eines kalten Stoffes die Wärme rasch von der Berührungsfläche abgeführt. Stoffe mit großem b wirken "fußkalt". Tabelle 19 zeigt die Bandbreite der Wärmeeindringfähigkeit anhand verschiedener Baustoffe.

Tabelle 19: Beispiele für die Wärmeeindringfähigkeit in Baustoffe

Baustoffe	b [kJ/(m ² · h ^{1/2} · K)]
Stahl	879
Beton, (ρ _R = 2,4 kg/dm ³)	130
Ziegelmauerwerk, (ρ _R = 1,4 kg/dm ³)	54
Nadelholz	21
Dämmstoffe, (ρ _R = 0,04 kg/dm ³)	2,5

7.1.4.3 Wärmestrahlung

Durch die Sonneneinstrahlung können Bauteile erheblich erwärmt werden - besonders an strahlungsreichen Sommertagen. Die Temperaturen an den beschienenen Oberflächen liegen dabei oft höher als die Lufttemperatur. Die Farbe der Flächen hat einen erheblichen Einfluss auf den absorbierten bzw. reflektierten Strahlungsanteil und damit auf die auftretende Oberflächentemperatur (Bild 34).

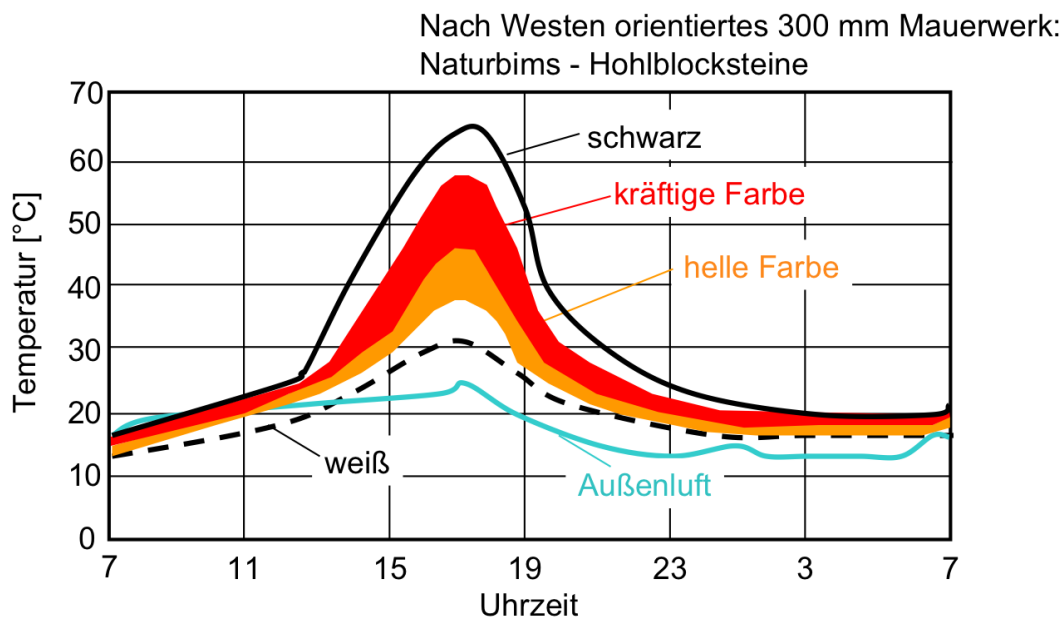


Bild 34: Oberflächentemperatur von Außenputzen verschiedener Färbung

Die Erwärmung der Oberfläche ist um so größer, je steiler der Einfallswinkel der Strahlung auf die Oberfläche ist. In Mitteleuropa erwärmen sich deshalb Westwände stärker als Süd-

wände (Bild 35), noch stärker werden horizontale Flächen aufgeheizt. Der Temperaturanstieg im Innenraum ist bei einer Erwärmung der Außenflächen um so geringer, je kleiner der Wärmedurchgangskoeffizient U (gute Wärmedämmung $\Rightarrow$ großes R) und je höher das Wärmespeichervermögen (spezifische Wärme, Rohdichte und Wanddicke) der Bauteile sind. Großen Einfluss haben auch der Fensteranteil und konstruktive Gegebenheiten (vorstehende Dächer und Balkone, Jalousien, belüftete Dächer usw.).

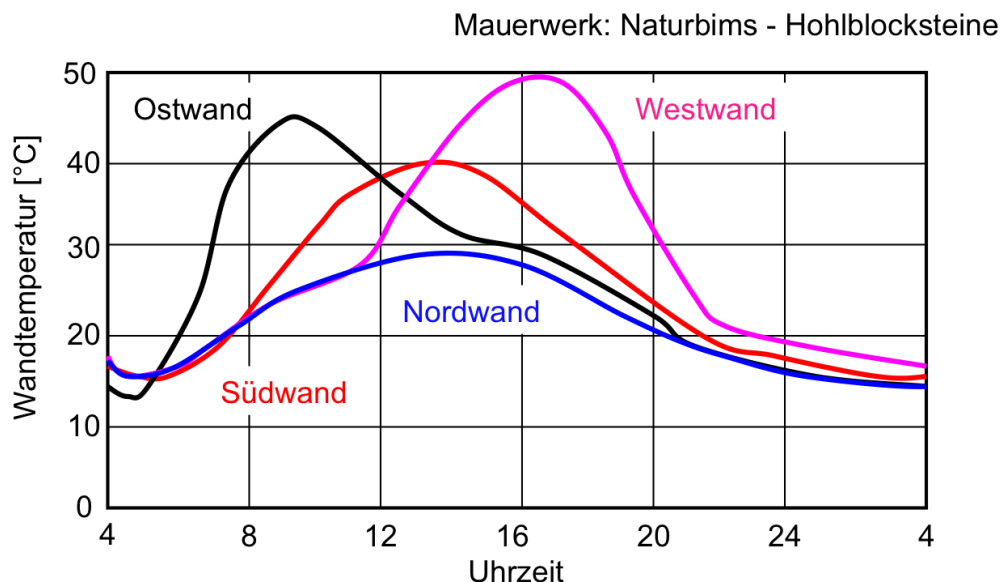


Bild 35: Oberflächentemperatur verputzter Außenwände an einem Sommertag

Die infolge der Erwärmung auftretende Temperaturdehnung muss beachtet werden, um mögliche Schäden zu vermeiden.

7.2 Schall [Lit 21]

Im Bauwesen wird unterschieden zwischen **Luftschall**, der sich in der Luft ausbreitet und **Körperschall**, der sich in festen Körpern ausbreitet. Die Arten der Schallanregung und der Schallausbreitung sind in Bild 36 dargestellt.

Eine hohe **Luftschalldämmung** wird erreicht durch

- Wände mit großer Masse je m^2 (Wandflächengewicht),
- zweischalige Wände (akustische Entkopplung) und/oder
- biegeeweiche Wandbekleidungen.

Wichtig sind schalldichte Anschlüsse z. B. der Wohnungstrennwände an die Außenwände und eine ausreichend große flächenbezogene Masse der flankierenden Wände. Haben die flankierenden Wände eine Masse von 300 kg/m^2 , so wird die Mindestschalldämmung $R'_w = 53 \text{ dB}$ mit einer Trennwand mit 410 kg/m^2 erreicht. Für die verbesserte Schalldämmung $R'_w = 55 \text{ dB}$ sind bei der Trennwand schon 490 kg/m^2 erforderlich.

Körperschall wird vor allem durch weichfedernde Stoffe gedämmt. Zur **Trittschalldämmung** eignen sich daher weiche Beläge (Kunststoff, Kork, Teppiche) und schwimmende Estriche, d.h. Estriche, die auf einer weichen Schicht, z. B. aus Mineralwolle- oder Kunststoffschaumplatten, verlegt werden. Installationsgeräuschen muss vor allem durch Verwendung leiser Armaturen sowie durch das Ummanteln der Leitungen mit weichfedernden Stoffen begegnet werden.

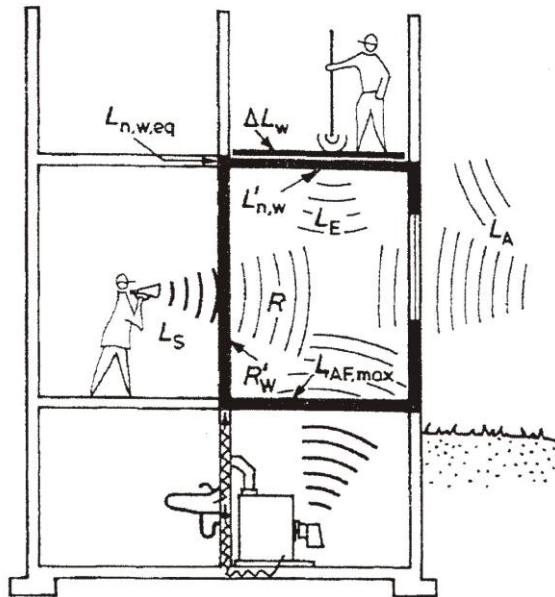


Bild 36: Arten der Schallanregung und der Schallausbreitung [Lit 22]

Der Nachhall in Räumen, der die Sprachverständlichkeit verschlechtern kann, wird durch porige Stoffe und oberflächlich gelochte Stoffe vermindert, die auf den Rauminnenflächen angebracht werden und **schallabsorbierend** wirken (d. h., der Schall wird an solchen Oberflächen wenig reflektiert). Wichtig ist eine geschlossene Rückseite der schallabsorbierenden Oberfläche. In gleicher Weise funktioniert die Eingrenzung von Schallquellen, z. B. durch Lärmschutzwände. Im Gegensatz zur Schalldämmung hängt die Schallabsorption nicht von der Masse des Bauteils ab.

7.3 Brandverhalten

7.3.1 Brandtechnische Bedeutung

In Deutschland kommen im Jahr ca. 1000 Menschen bei Bränden ums Leben, davon ca. 400 in brennenden Kraftfahrzeugen, ca. 500 im Wohnbereich. Der Sachwertverlust beträgt etwa € 3 Mrd. (1 – 2 % des jährlichen Bauvolumens). Vor diesem Hintergrund kommt der Gefahrenabwehr durch den baulichen Brandschutz eine große Bedeutung zu. Deshalb sollen Bauwerke so beschaffen sein, dass Schadensfeuer und deren mögliche katastrophale Auswirkungen auf die Menschen und die Volkswirtschaft weitgehend vermieden werden.

Die Bestimmungen sind vor allem so gehalten, dass bei einem Schadensfeuer

- die Ausbreitung so langsam vor sich geht, dass sich die im Gebäude befindlichen Personen in Sicherheit bringen können und
- die Löschmannschaften nicht gefährdet werden.

Von einem Brand gehen verschiedene Gefahren aus:

Rauchbildung	Sichtbehinderung
	Panik
	Erstickungsgefahr
Hitzeentwicklung	Verbrennungsgefahr
	Einsturzgefahr
Entstehung toxischer Gase	Vergiftungsgefahr

Aus diesen potenziellen Gefahren leiten sich verschiedene Eigenschaften ab, die beim Brandverhalten von Baustoffen für die bauliche Sicherheit von Bedeutung sind:

- Entflammbarkeit,
- Fähigkeit zur Brandweiterleitung,
- Hitzeentwicklung (erhöhte Brandlast),
- Rauchentwicklung,
- Entwicklung toxischer Gase sowie
- Entwicklung korrosiver Gase.

7.3.2 Brandentstehung und Brandverlauf

Ein Brand umfasst mehrere Teilvorgänge. Er entsteht in der Regel zunächst örtlich begrenzt durch das Entzünden brennbarer Stoffe. Auf die Zündphase folgt während der **Brandentstehung** die Schwelbrandphase. Hierbei nehmen die Wärme und die Menge entzündlicher Gase so weit zu, dass alle brennbaren Stoffe plötzlich entzündet werden. Dieses Ereignis wird als „**flash over**“ bezeichnet. Es leitet den voll entwickelten Brand ein. Der **Vollbrand** kann in eine Erwärmungs- und eine Abkühlphase unterteilt werden. Die Geschwindigkeit der Erwärmung und die entstehenden Temperaturen hängen von der **Brandlast** (Menge und Heizwert der brennbaren Stoffe), der Ventilation (Sauerstoffzufuhr) und anderen Faktoren ab.

Im Verlauf des Brandes verändern sich die mit dem Brand verbundenen Risiken. Die Zusammenhänge sind schematisch in Bild 37 dargestellt. Die Bedingungen realer Brände variieren. Für die Beurteilung von Baustoffen und Bauteilen werden standardisierte Szenarien herangezogen. Als Beispiel zeigt Bild 38 die **Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)**, die für die Beurteilung von Bauteilen genutzt wird. Daneben existieren noch andere Brandkurven, z. B. die Hydrocarbonkurve.

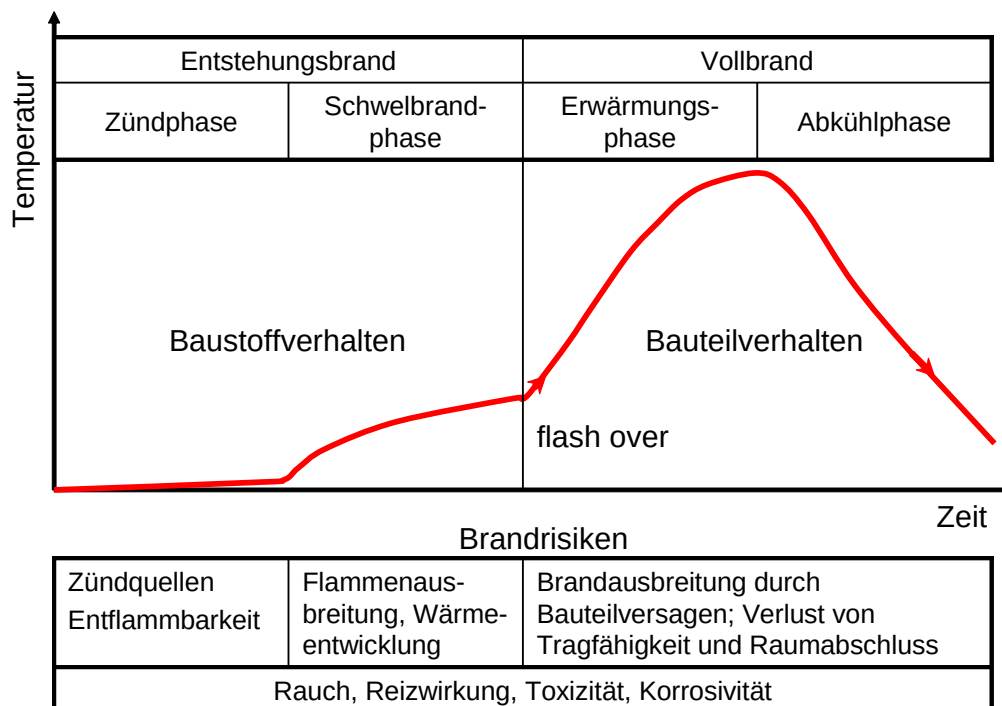


Bild 37: Schematischer Brandverlauf und Brandrisiken [Lit 16]

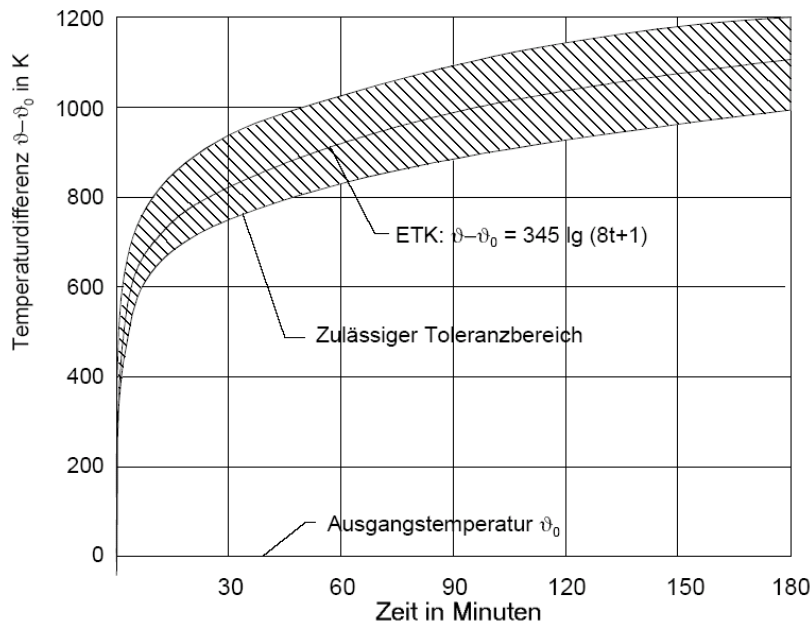


Bild 38: Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

7.3.3 Brandverhalten von Baustoffen

Die bauaufsichtlichen Brandschutzvorschriften sind als gesetzliche Forderungen in den Landesbauordnungen enthalten. Bei der Beurteilung des Brandverhaltens wird zwischen Baustoffen und Bauteilen unterschieden. Die Anforderungen für Baustoffe stehen in DIN EN 13501-1 [Lit 11] bzw. DIN 4102-1 [Lit 8]. Baustoffe werden aufgrund von Prüfungen in nichtbrennbar und brennbar (schwerentflammbar, normalentflammbar und leichtentflammbar) eingeteilt (Tabelle 20). Die europäischen **Brandverhaltensklassen** A bis F beurteilen zusätzlich die Rauchentwicklung (Kurzzeichen s (smoke)) und das brennende Abtropfens oder Abfallens (Kurzzeichen d (droplets)). Die Bedeutung der Kurzzeichen ist detailliert in [Lit 11] erläutert.

Tabelle 20: Bauaufsichtliche Zuordnung der Klassifizierung von Baustoffen nach DIN EN 13501-1 und DIN 4102-1

Bauaufsichtliche Anforderungen	Zusatzanforderungen		Europäische Klasse nach DIN EN 13501-1	Klasse nach DIN 4102-1
	kein Rauch	kein brenn. Abfallen/ Abtropfen		
nichtbrennbar	X	X	A1	A1
	X	X	A2 - s1 d0	A2
schwerentflammbar	X	X	B, C - s1 d0	B1
		X	B, C - s3 d0	
	X		B, C - s1 d2	
			B, C - s3 d2	
normalentflammbar		X	D - s3 d0	B2
			E	
			D - s3 d2	
			E - d2	
leichtentflammbar			F	B3

Tabelle 21: Zusätzliche Angaben zur Klassifizierung des Brandverhaltens von Baustoffen

Kurzzeichen	Kriterium	Anwendungsbereich
s (smoke)	Rauchentwicklung	Anforderungen an die Rauchentwicklung
d (droplets)	Brennendes Abtropfen / Abfallen	Anforderungen an das brennende Abtropfen/Abfallen
....fl (floorings)		Brandverhaltensklasse für Bodenbeläge

7.3.4 Brandverhalten von Bauteilen

Von Bauteilen wird erwartet, dass sie im Brandfall ausreichend lange ihre Aufgabe erfüllen. Tragende und aussteifende Bauteile müssen ihre Tragfähigkeit behalten. Raumabschließende Bauteile müssen den Brand so sicher abschließen, dass nicht durch unplanmäßig entstehende Öffnungen der Wärme-, Strahlungs- oder Gasdurchtritt eine Brandweiterleitung ermöglichen [Lit 22].

Bauteile (z. B. Wände, Decken, Stützen) werden nach [Lit 12] entsprechend ihren **charakteristischen Leistungseigenschaften** gekennzeichnet:

- Tragfähigkeit (R),
- Raumabschluss (E) und
- Wärmedämmung (I),

den **optionalen Leistungsparameter**:

- Strahlung (W),

sowie die **erweiterten Leistungsparameter**:

- Widerstand gegen mechanische Beanspruchung (M) und
- Rauchdichtheit (S).

Darüber hinaus gibt es noch Klassen für Türen, Abgasanlagen sowie Wand- und Deckenbekleidungen. Tabelle 22 und Tabelle 23 geben einen Überblick der Klassifizierungsmöglichkeiten.

Für die Angabe des Feuerwiderstandsverhaltens gelten folgende **Klassifizierungszeiten**: 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180 und 240. Die Zahl bedeutet die Zeit in Minuten, während der ein Bauteil im Brandversuch (Bild 38) die charakteristischen Leistungseigenschaften erfüllt.

Die **Klassifizierung des Leistungsverhaltens** von Bauteilen erfolgt durch Kombination der zutreffenden charakteristischen Leistungseigenschaften, der Klassifizierungszeiten und der zusätzlichen Leistungsparameter (z. B. REI 90-M, W 60) [Lit 12]. Eine Zuordnung der bauaufsichtlichen Benennung mit der Klassifizierung von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 und DIN 4102 enthält die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 22: Klassifizierung von Bauteilen nach DIN EN 13501-2

Herleitung des Kurzzeichens	Kriterium	Anwendungsbereich
R (Résistance)	Tragfähigkeit	zur Beschreibung der Feuerwiderstandsfähigkeit
E (Étanchéité)	Raumabschluss	
I (Isolation)	Wärmedämmung (unter Brandeinwirkung)	
W (Radiation)	Begrenzung des Strahlungsdurchtritts	
M (Mechanical)	Mechanische Einwirkung auf Wände (Stoßbeanspruchung)	
S (Smoke)	Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit (Dichtheit, Leckrate)	Rauchschtztüren (als Zusatzanforderung auch bei Feuerschutzabschlüssen), Lüftungsanlagen einschließlich Klappen
C... (Closing)	Selbstschließende Eigenschaft (ggf. mit Anzahl der Lastspiele) einschließlich Dauerfunktion	Rauchschtztüren, Feuerschutzabschlüsse (einschließlich Abschlüsse für Förderanlagen)
P	Aufrechterhaltung der Energieversorgung und/oder Signalübermittlung	Elektrische Kabelanlagen allgemein

Tabelle 23: Klassifizierung von Bauteilen nach DIN EN 13501-2

Herleitung des Kurzzeichens	Kriterium	Anwendungsbereich
I ₁ , I ₂	unterschiedliche Wärmedämmungskriterien	Feuerschutzabschlüsse (einschließlich Abschlüsse für Förderanlagen)
... 200, 300, (°C)	Angabe der Temperaturbeanspruchung	Rauchschtztüre
i→o i←o i↔o (in - out)	Richtung der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer	Nichttragende Außenwände, Installationsschächte/-kanäle, Lüftungsanlagen/-klappen
a→b a←b a↔b (above - below)	Richtung der klassifizierten Feuerwiderstandsdauer	Unterdecken
f (full)	Beanspruchung durch "volle" ETK (Vollbrand)	Doppelböden
v _e , h _o (vertical, horizontal)	für vertikalen/horizontalen Einbau klassifiziert	Lüftungsleitungen/-klappen

Tabelle 24: Zuordnung der bauaufsichtlichen Benennung mit der Klassifizierung von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 und DIN 4102 (Angaben in {})

Bauaufsichtliche Benennung	Tragende Bauteile		Nichttragende Innenwände	Nichttragende Außenwände
	ohne Raumabschluss	mit Raumabschluss		
feuerhemmend	R 30	REI 30	EI 30	E 30 (i→o) und E 30 (i←o)
	{F 30}	{F 30}	{F 30}	{W 30}
hochfeuerhemmend	R 60	REI 60	EI 60	E 60 (i→o) und E 60 (i←o)
	{F 60}	{F 60}	[F 60]	{W 60}
feuerbeständig	R 90	REI 90	EI 90	E 90 (i→o) und E 90 (i←o)
	{F 90}	{F 90}	{F 90}	{W 90}
Feuerwiderstandsfähigkeit 120 Min.	R 120	REI 120		
	{F 120}	{F 120}		
Brandwand		REI 90-M	EI 90-M	

8 Formänderung [Lit 21]

8.1 Einteilung der Formänderungen

Formänderungen von Baustoffen können mit und ohne mechanische Beanspruchung erfolgen. Eine Einteilung der Formänderungen zeigt Tabelle 25.

Tabelle 25: Einteilung der Formänderungen

	spannungsabhängig		spannungsunabhängig
	sofort auftretend	zeitabhängig	
umkehrbar, reversibel	elastisch ε_{el}	verzögert elastisch ε_v	Wärmedehnung ε_T Feuchtedehnung ε_s
nicht umkehrbar, irreversibel	Fließen, plastisch ε_{pl}	Kriechen viskos ε_{kr}	chemische Dehnung

Zum Beschreiben von Formänderungen wird in der Regel nicht der Absolutwert der Formänderung benutzt, sondern die Dehnung. Als **Dehnung** ε wird allgemein das Verhältnis der Längenänderung Δl zur Ausgangslänge l_0 bezeichnet:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad -$$

Da Dehnungen oftmals nur sehr kleine Werte aufweisen, werden sie häufig in [‰] oder [mm/m] angegeben.

8.2 Lastunabhängige Formänderungen

8.2.1 Temperaturdehnung (Wärmedehnung)

Die Dehnung ε_T infolge einer Temperaturänderung $\Delta \vartheta$ ist:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta \vartheta.$$

α_T ist der (lineare) **Temperaturkoeffizient (Wärmedehnzahl)** mit der Einheit 1/K. Oft wird α_T auch in [mm/(m · K)] angegeben.

Die thermische Längenänderung infolge einer Temperaturänderung $\Delta \vartheta$ ist dann:

$$\Delta l (\Delta \vartheta) = l_0 \cdot \alpha_T \cdot \Delta \vartheta.$$

Der Volumendehnkoeffizient α_{VT} ist entsprechend der Volumenvergrößerung bei einer Temperaturänderung um 1 K: $\alpha_{VT} = 3 \cdot \alpha_T$. Für Gase gilt näherungsweise $\alpha_{VT} = \frac{1}{273} \cdot \frac{1}{K}$.

Tabelle 26: Temperaturkoeffizient von Baustoffen

Baustoff	α_T [$10^{-6}/K$]
Holz in Faserrichtung	3 - 4
Holz, tangential	30 – 40
Glas	3 – 10
Ziegelmauerwerk	5 – 7
Kalksandsteinmauerwerk	7 – 9
Beton	5 – 14
Beton, Rechenwert	10
Stahl	10 – 17
Stahl, Rechenwert	12
Aluminium	23 – 24
Kunststoffe	30 - 230

8.2.2 Schwinden und Quellen

Die Volumenverkleinerung bei Feuchtigkeitsabgabe wird als **Schwinden** bezeichnet und die Volumenvergrößerung bei Feuchtigkeitsaufnahme als **Quellen**.

Tabelle 27: Schwinddehnung von Baustoffen

Baustoff	ϵ_s [mm/m]
Holz in Faserrichtung	< 1,5
Holz, tangential	60 – 120
Holz, radial	30 – 60
Mauerwerk	0 – 1
Beton	0,1 – 0,9

8.2.3 Schrumpfen und Treiben

Chemische Vorgänge können irreversibel Volumenänderungen bewirken, die als **Schrumpfen** und **Treiben** bezeichnet werden. Beispiele hierfür sind:

- bei Zementleim:
Schrumpfen durch die Wasserbindung des Zements (führt zur Volumenminderung), im Beton entstehen dadurch nur Poren und kaum äußere Formänderungen,
- bei Beton:
Treiben bei Beginn eines Zerstörungsvorganges, z.B. bei Frostscha den oder Sulfatscha den,
- bei Gips:
Treiben beim Erhärten, so genannte Bindedehnung um 1 Vol.-%,
- bei Kunstharzen:
Schrumpfen durch die chemische Reaktion bei der Erhärtung, z. B. bei ungesättigten Polyesterharzen (UP-Harzen): 8 Vol.-%, bei Epoxidharzen 0,5 Vol.-%.

8.3 Formänderung durch Belastung

8.3.1 Allgemeines

Die Brauchbarkeit eines Werkstoffs im konstruktiven Ingenieurbau wird vor allem durch seine mechanischen Eigenschaften bestimmt. Neben den Festigkeitswerten spielt auch die Formänderung durch die jeweilige Belastung eine wesentliche Rolle. Die Formänderungseigenschaften hängen u. a. von der aufgetragenen Spannung, der Belastungsgeschwindigkeit, der Temperatur und der Prüfkörpergeometrie ab. Durch genormte Prüfverfahren versucht man Formänderungseigenschaften so zu beschreiben, dass sie ein klares Bild über das Verhalten des Werkstoffs liefern können.

Ein einfacher und übersichtlicher Fall einer Beanspruchung ist die reine axiale Zugbeanspruchung. Im Prüfverfahren im Labor wird sie definiert erzeugt, indem man einen langen, stabförmigen Probekörper in eine Zugprüfmaschine einspannt und an beiden Enden in Längsrichtung des Stabes eine Zugkraft F angreifen lässt.

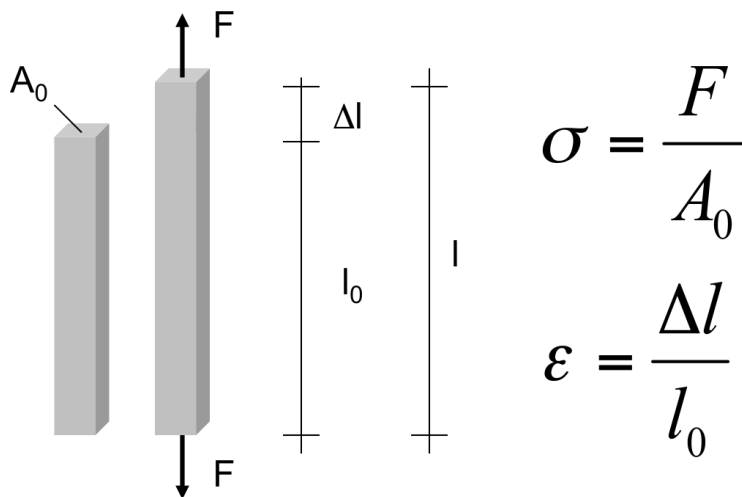


Bild 39: Schematische Darstellung eines Zugversuchs

Mit

- F Zugkraft (N),
- l_0 ursprüngliche Länge,
- A_0 ursprüngliche Querschnittsfläche,
- l Länge bei Kraft F ,
- Δl Verlängerung zufolge F und
- A Querschnittsfläche bei F .

Man misst die Kraft F und die zugehörige Verlängerung Δl . Die **Spannung** σ ist definiert als Kraft F geteilt durch die Ausgangsfläche A_0 :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right].$$

Die **Dehnung** ε ist die Längenänderung Δl bezogen auf die Ausgangslänge l_0 :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Trägt man in einem Diagramm auf der Abszisse die Dehnung ε und auf der Ordinate die Spannung σ auf, so erhält man ein **Spannungs-Dehnungs-Diagramm** (σ - ε - Diagramm), siehe Bild 40.

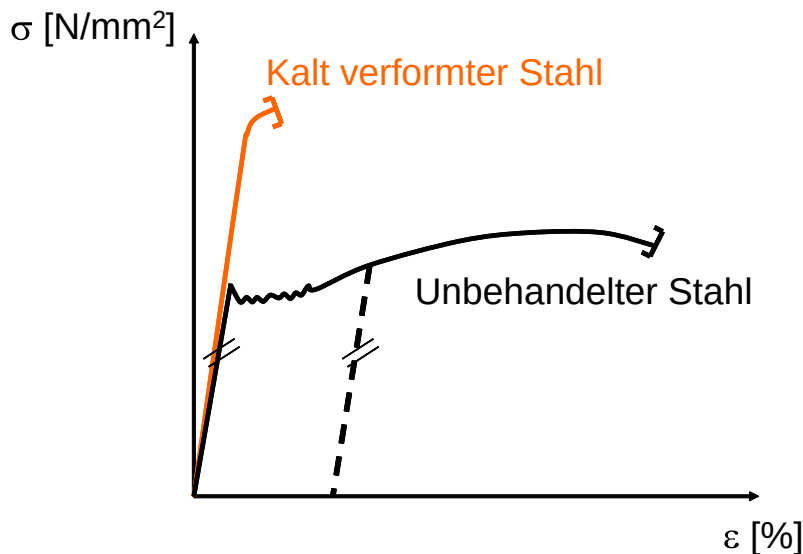


Bild 40: Beispiele für Spannungs-Dehnungs-Linien von Stahl

Solche Diagramme charakterisieren das Verformungsverhalten der Baustoffe. Dabei ist sowohl die Kurve für Belastung als auch für Entlastung von Interesse. Die Spannungs-Dehnungs-Linie nennt man auch **Arbeitslinie**, da die Fläche, die von dieser Linie mit der Abszisse gebildet wird (d.h. das Integral der Kurve), die bei der Belastung aufgewandte Arbeit darstellt. Die bis zum Bruch aufgewandte Energie nennt man **Bruchenergie** (Bild 41).

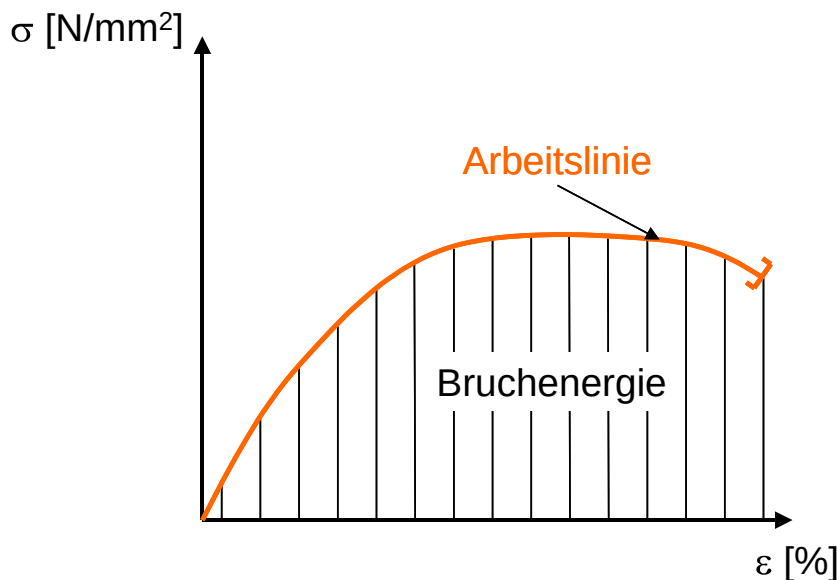


Bild 41: Arbeitslinie und Bruchenergie

Beim Verformungsverhalten unterscheidet man bei den Werkstoffen zwischen **elastischen**, **plastischen** und **viskosen** Verformungsanteilen, aus denen sich die Arbeitslinie zusammensetzen kann.

8.3.2 Elastisches Verhalten

Elastisches Verhalten zeigt sich darin, dass durch äußere Kräfte verursachte Dehnungen nach der Entlastung sofort und vollständig zurückgehen. Wenn die Spannungs-Dehnungs-Linie dabei linear ist, spricht man von **linear oder ideal elastischem Verhalten**. Die Steigung der Geraden gibt einen wesentlichen Materialkennwert wieder; den **Elastizitätsmodul** (kurz E-Modul) E :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}, \text{N/mm}^2].$$

E hat also dieselbe Einheit wie die Spannung, da ε dimensionslos ist. Die Gleichung drückt aus, dass zwischen σ und ε eine lineare Beziehung besteht, die als **Hooke'sches Gesetz** bekannt ist. R. Hooke umschrieb 1678 das Gesetz mit "ut tensio sic vis", „wie die Dehnung so die Kraft“. Bei nicht linear elastischen Stoffen (Bild 43) ist der Elastizitätsmodul nicht konstant:

$$\sigma = E(\sigma) \cdot \varepsilon.$$

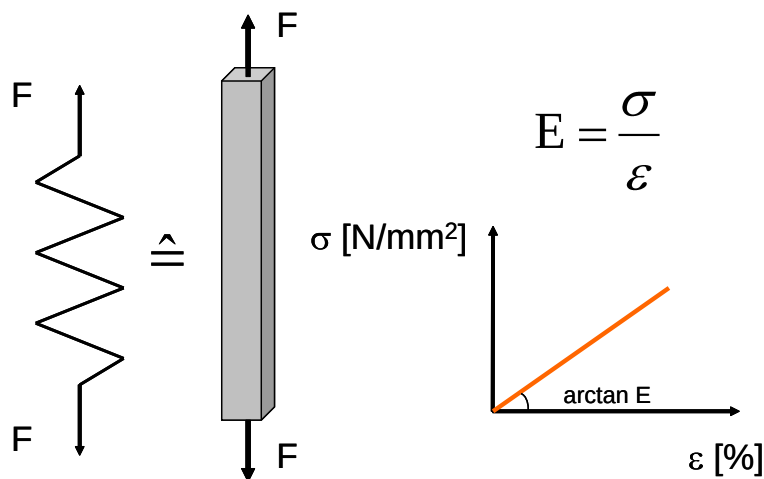


Bild 42: Elastisches Verhalten

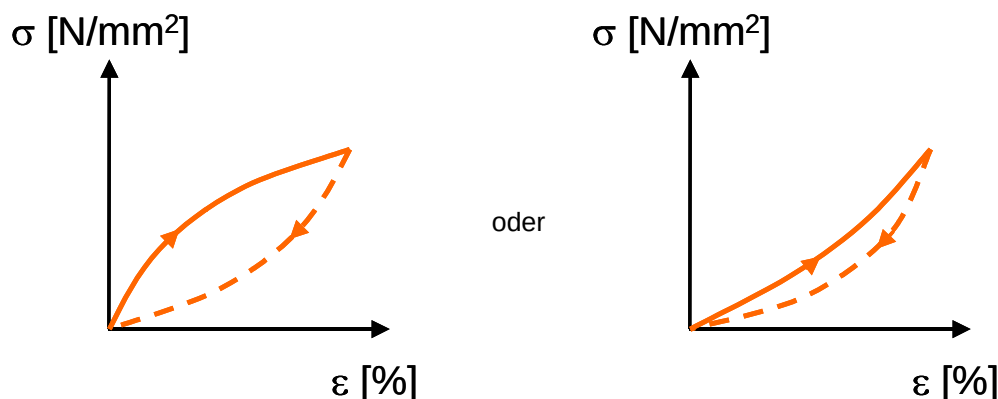


Bild 43: Nicht linear elastisches Verhalten

Da die Spannungen σ senkrecht zu der betrachteten Fläche wirken, nennt man sie **Normalspannungen** σ (Bild 44). Wenn sie **Zugspannungen** sind, sind sie positiv (+), als **Druckspannungen** sind sie negativ (-). Ebenso gibt es positive (+) und negative (-) Dehnungen. Letztere nennt man auch **Stauchungen**. Spannungskomponenten, die parallel zur betrachteten

Fläche wirken, nennt man **Schubspannungen** τ (Bild 44). Durch eine Schubbeanspruchung wird eine Gestaltänderung verursacht, die als **Verzerrung** bezeichnet wird.

Wenn man beim Zugversuch die Dicke des Stabes mit steigender Last misst, stellt man fest, dass gleichzeitig mit der **Längsdehnung** ε_l eine negative **Querdehnung** ε_q auftritt (siehe Bild 44). Die **Querdehnzahl** μ ist damit das Verhältnis der Querdehnung zur aufgetragenen Längsdehnung.

$$\mu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l}$$

Die **Poissonzahl** ν ist der Kehrwert von μ :

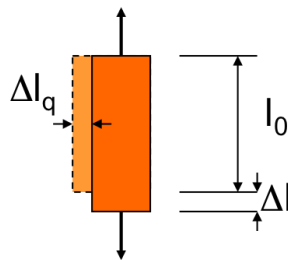
$$\nu = \frac{1}{\mu}$$

Bei Stahl, Aluminiumlegierungen und Gusseisen sind E, G und μ bis etwa 90 % der Streckgrenze konstant. Im elastischen Bereich ist $\mu \approx 1/3$. μ kann höchstens 0,5 erreichen. Dies ist bei plastischen Verformungen der Fall. Tabelle 28 führt exemplarisch einige Werte auf.

Aus E und μ kann der **Schub- oder Gleitmodul** G ermittelt werden.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el,l}} = \frac{\sigma \cdot l_0}{\Delta l_{el,l}} = \tan \alpha$$



Querdehnzahl

$$\mu = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon_l} \rightarrow 0 < \mu \leq 0,5$$

Poissonzahl $\nu = \frac{1}{\mu}$

Schubmodul

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

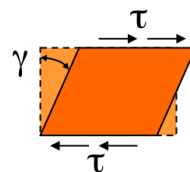


Bild 44: Verformungen infolge von Normalspannungen σ und Schubspannungen τ

Tabelle 28: Elastisches Verhalten, Beispiele für E und μ

Baustoff	Elastizitätsmodul E [N/mm ²]	Querdehnzahl μ [-]
Stahl	~210000	0,27 – 0,30
Beton	15000 – 50000	~ 0,20
Holz quer zur Faser	300 – 1500	-
Holz längs zur Faser	7000 – 18000	-

Im Zugversuch entsteht in dem Stab ein einachsiger Spannungszustand, d. h., es gibt nur in einer Richtung eine Hauptspannung. Wenn in einem Körper in 2 oder 3 Richtungen Spannungen wirken, so spricht man von einem zweiachsigen (biaxialen) oder dreiachsigen (triaxialen) Spannungszustand. Das Hooke'sche Gesetz lautet dann für homogene, isotrope Körper:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \sigma_1 - \mu \cdot \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} \sigma_2 - \mu \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{E} \sigma_3 - \mu \cdot \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$$

Die auf einen Körper einwirkenden Normalspannungen σ und Schubspannungen τ zeigt Bild 45. Wirken nur gleich große negative Normalspannungen auf den Körper ein ($-\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = -\sigma_{zz}$), dann herrscht **hydrostatischer Druck**.

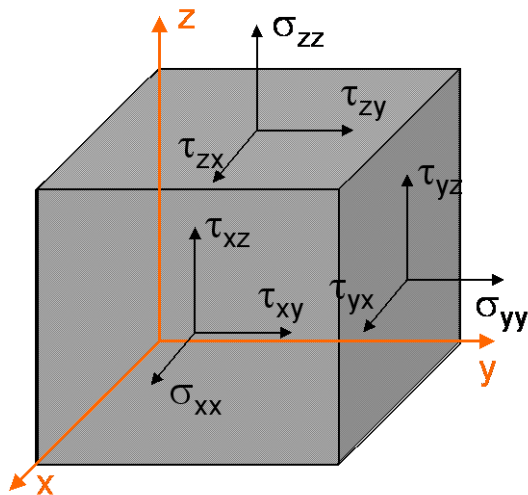


Bild 45: Normalspannungen σ und Schubspannungen τ

Das reale Baustoffverhalten entspricht nicht dem einfachen **Hooke'schen Federmodell**. In Bild 40 ist schematisch die Spannungs-Dehnungs-Linie eines unbehandelten Stahls dargestellt. Während bei geringen Spannungen der lineare Zusammenhang zwischen σ und ε gegeben ist, nimmt ab einer bestimmten Spannung, der so genannten **Streckgrenze**, die Dehnung stetig zu. Der Stahl fließt und weist plastische Dehnungen auf. Wird er danach entlastet, so gehen nur die elastischen Dehnungen zurück, die plastischen Dehnungen bleiben erhalten.

8.3.3 Plastisches Verhalten

Bei vielen kristallinen technischen Stoffen tritt nach Erreichen einer bestimmten Grenzspannung ein "**Fließen**" des Werkstoffes auf, bei dem die Verformung plötzlich zeitabhängig zunimmt, ohne dass die Spannung erhöht zu werden braucht. Ein derartiges Verhalten wird durch das **St. Venant'sche Reibungselement** beschrieben (Bild 46).

Am Reibungselement greift eine Kraft F an. Solange diese Kraft die **Haftreibung** (μ_H) nicht überschreitet, treten keine Verschiebungen des Reibungselementes auf. Wenn die Kraft die Haftreibung, als Summe der Grenzspannung, überschreitet, beginnt das Reibungselement zu rutschen, eine Verschiebung tritt auf.

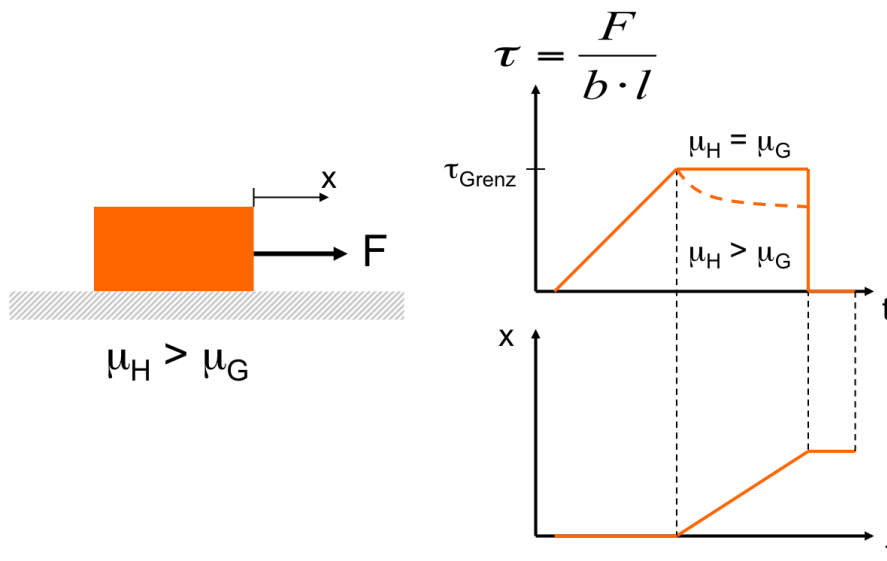


Bild 46: St. Venant'sches Reibungselement

Falls die **Gleitreibung** (μ_G) gleich der Haftreibung ist muss die Kraft konstant gehalten werden, um das Reibungselement weiter zu verschieben. Unterschreitet die angreifende Kraft die Reibkraft, kommt das Reibelement zum Stillstand. Eine weitere Verschiebung tritt nicht auf. Die aufgebrachte Verschiebung geht auch nicht zurück (Bild 46 und Bild 47).

Bei einer geringeren Gleitreibung kann die Kraft nach Erreichen der Grenzspannung verringert werden (gestrichelte Linie in Bild 46).

Ein **ideal plastisches Verhalten**, d. h., es kommt bei Erreichen einer bestimmten Grenzkraft zu immer größeren Verformungen bei konstanter Kraft (F), kann damit durch das St. Venant'sche Reibungselement dargestellt werden, wenn Gleitreibung gleich Haftreibung ist (Bild 47).

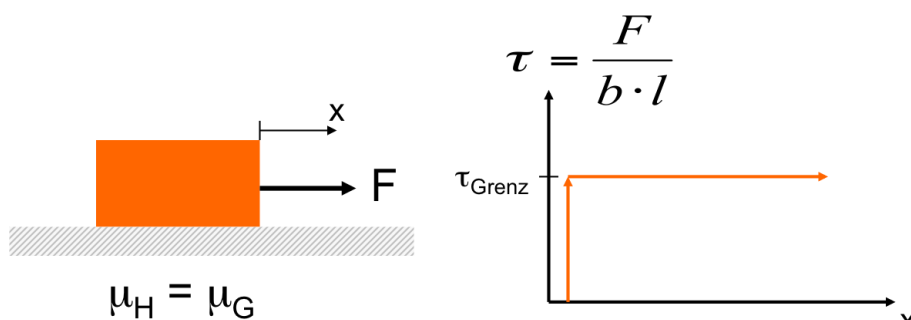


Bild 47: St. Venant'sche Reibungselement und die ideal plastische Spannungs-Dehnungs-Linie

Unbehandelter Stahl zeigt ein elastisch-plastisches Verhalten (Bild 40). Zunächst nimmt die Dehnung mit der Spannung linear zu (elastischer Bereich). Nach Erreichen einer gewissen Spannung, nehmen die Dehnungen annähernd linear zu, ohne dass die Kraft erhöht werden muss (plastischer Bereich). Die plastischen Verformungen gehen bei einer Entlastung nicht mehr zurück (bleibende Verformungen) (Bild 40).

Ein solches Verhalten lässt sich brauchbar annähern, wenn man nach Ende der elastischen Verformung eine plastische Verformung annimmt, was im σ - ϵ -Diagramm durch zwei Geraden angenähert wird. Eine für den elastischen Bereich und eine für den plastischen Bereich.

Die Entlastungslinie verläuft jeweils parallel zur Belastungslinie des elastischen Bereichs (Bild 40).

Um das Verhalten eines unbehandelten Stahls modellhaft zu beschreiben, wird also eine Hooke'sche Feder und ein St. Venant'scher Körper benötigt. Die Kombination der beiden Körper in Reihe wird als **Prandtl-Körper** bezeichnet (Bild 48).

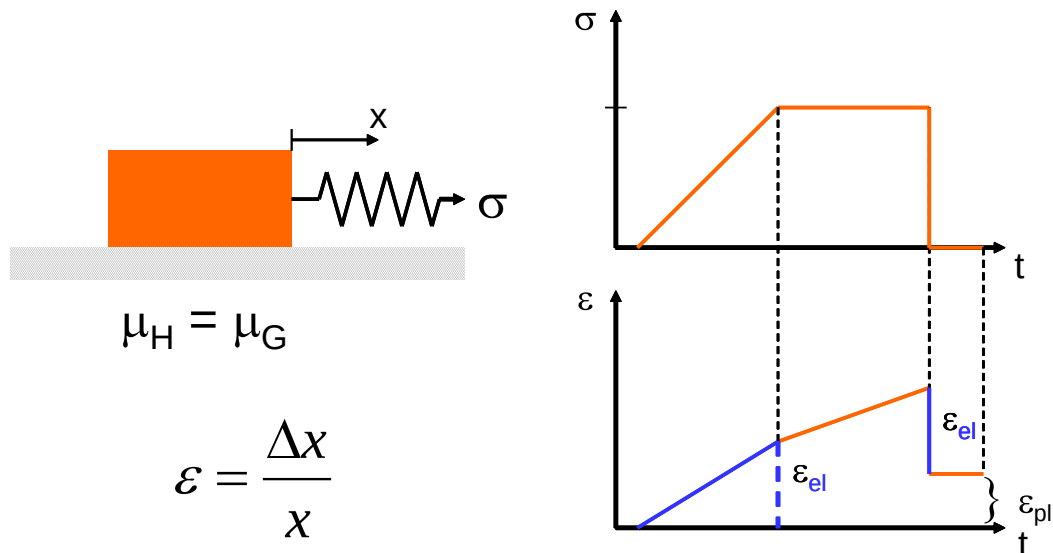


Bild 48: Prandtl-Körper

Wird die angreifende Spannung langsam von Null aufgebracht, so wird die Hooke'sche Feder zunächst mit zunehmender Spannung linear gedehnt. Der St. Venant'sche Körper bewegt sich zunächst nicht. Bei Erreichen der Grenzspannung ist die Feder um den elastischen Anteil gedehnt. Nun beginnt der St. Venant'sche Körper zu rutschen. Die Dehnung nimmt zu, ohne dass die Spannung gesteigert werden muss. Da die Gleitreibung gleich der Haftreibung angenommen wurde, muss die Spannung aber gleich hoch bleiben, daher bleibt auch die Hooke'sche Feder um den elastischen Anteil gedehnt. Wird die Spannung entfernt, so geht die elastische Dehnung, die in der Hooke'schen Feder gespeichert ist, wieder vollständig zurück, während die plastische Dehnung erhalten bleibt. Dieser Zusammenhang ist in Bild 48 und Bild 49 dargestellt.

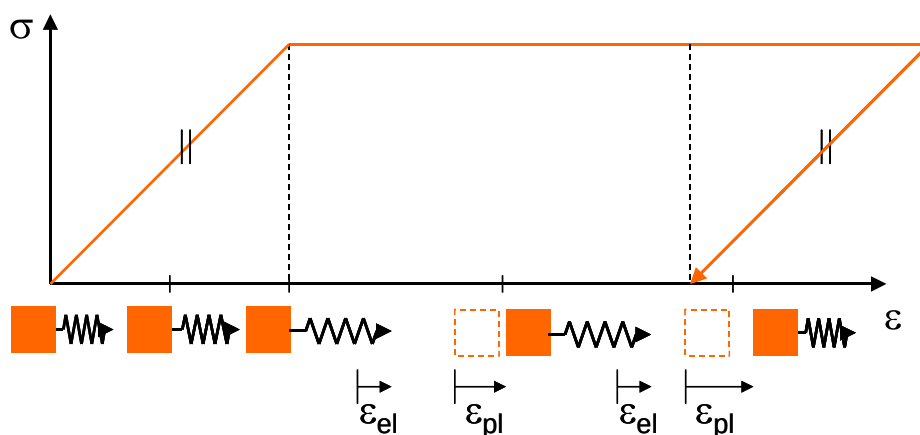


Bild 49: Schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnungs-Linie am Beispiel des Prandtl-Körpers

8.3.4 Viskoses Verhalten

Der Zugversuch mit stetig steigender Spannung genügt häufig nicht, um das Verhalten eines Werkstoffs unter Last ausreichend zu beschreiben. Viele Werkstoffe zeigen bereits bei geringen aufgetragenen Spannungen eine deutliche Zunahme der Verformung mit der Zeit. Dieses Verhalten nennt man **viskoelastisch**. Das heißt, ihre Verformung unter Last lässt sich auf viskose und elastische Anteile zurückführen. Während die elastischen Anteile unabhängig von der Zeit sind, bedeutet viskos, dass die Verformung unter einer konstanten Last, auch auf geringem Niveau, mit der Zeit stetig zunimmt.

Bei genauer Betrachtung verhalten sich alle realen, festen Werkstoffe viskoelastisch. Es gibt jedoch große Unterschiede im Ausmaß der viskosen Verformungsanteile. Bei Stahl z.B. sind sie bei geringer Belastung sehr klein und man kann ihn deshalb als elastischen Werkstoff ansehen. Bei Kunststoff dagegen fallen sie meist spürbar ins Gewicht und man spricht deshalb von einem viskoelastischen Werkstoff. Das viskoelastische Verhalten wird im Allgemeinen durch **Kriechen** und **Relaxation** beschrieben.

8.3.4.1 Kriechen

Belastet man einen viskoelastischen Stoff rasch mit einer Spannung σ , so stellt sich sofort die **elastische Dehnung** ε_{el} ein. Lässt man dann σ über längere Zeit wirken, so tritt mit der Zeit eine zunehmende Verformung auf. Diese Erscheinung nennt man Kriechen. Entlastet man nach einer gewissen Zeit, so geht ε_{el} sofort zurück und die Kriechverformung bleibt. In der weiteren Zeit geht auch die Kriechverformung teilweise zurück (**reversible Kriechverformung** $\varepsilon_{k,r}$) und nur der **irreversible Teil der Kriechverformung** $\varepsilon_{k,ir}$ bleibt erhalten (Bild 50).

Den zeitabhängigen Quotienten aus Kriechverformung ε_k und elastischer Verformung ε_{el} nennt man die **Kriechzahl** φ_t :

$$\varphi_t = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{el}}$$

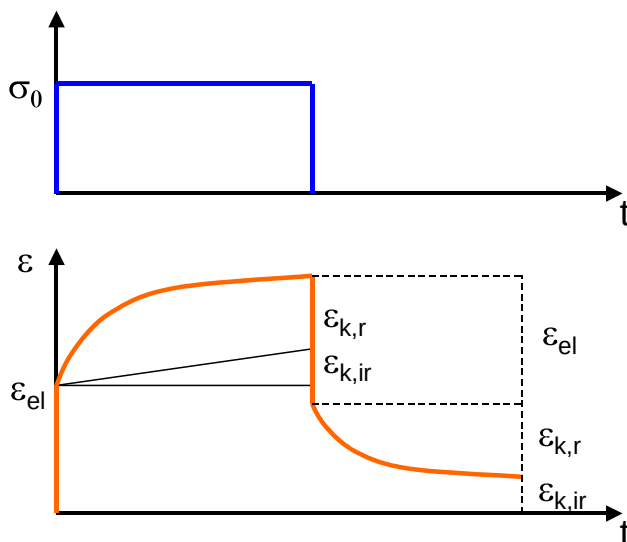


Bild 50: Kriechen eines viskoelastischen Stoffes

Die gesamte Dehnung unter Dauerlast ist dann:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_{el} + \varepsilon_k = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{el} \varphi_t = \frac{\sigma}{E} (1 + \varphi_t) .$$

φ_t kann für Beton bis zu 6 betragen, sodass die Kriechverformung sechs mal größer als die elastische Verformung werden kann.

In Anlehnung an den Elastizitätsmodul ($E(t_0)$) zum Zeitpunkt der Erstbelastung (t_0) wird der Kriechmodul ($E_k(t)$) für jeden beliebigen späteren Zeitpunkt t mithilfe der das Kriechen erzeugenden Spannung σ_k und der resultierenden Kriechverformungen definiert:

$$E_k(t) = \frac{\sigma_k}{\varepsilon_{el}(t_0) + \varepsilon_k(t)} = \frac{E(t_0)}{1 + \varphi_t} .$$

Der Kehrwert dieses zeitabhängigen Ausdrucks wird als Kriechfunktion bezeichnet:

$$J = \frac{1}{\sigma_k} \cdot \varepsilon_{el} + \varepsilon_k .$$

8.3.4.2 Relaxation

Während beim Kriechversuch die Spannung konstant gehalten wird, bleibt beim Relaxationsversuch die Dehnung konstant. Dabei wird durch die Relaxation des Stoffes die Spannung abgebaut (Bild 12-13).

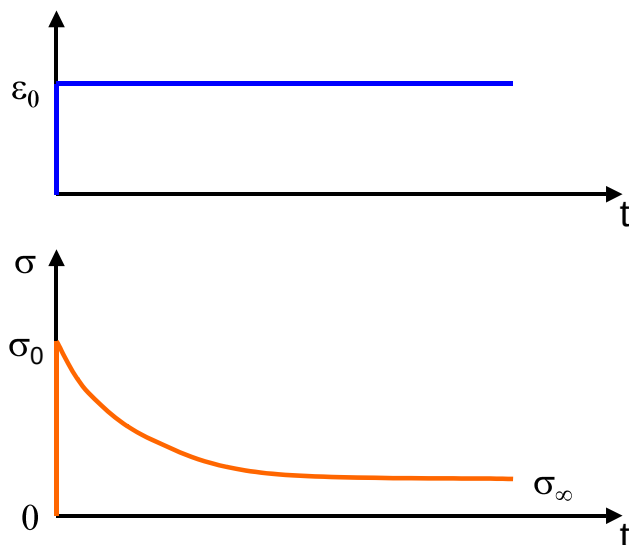


Bild 51: Relaxation eines viskoelastischen Stoffes

Ähnlich wie beim Kriechen kann der zeitabhängige Spannungsverlauf auf die Ausgangsspannung σ_0 bezogen und über die **Relaxationszahl** ψ_t beschrieben werden.

$$\psi_t = \frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_0} = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_0} ,$$

$$\sigma_t = \sigma_0 (1 - \psi_t) .$$

8.3.4.3 Modelle

Der viskose Verformungsanteil lässt sich durch einen **Newton'schen Dämpfer** beschreiben (Bild 52). Den Dämpfer stellt man sich als Zylinder mit gelochtem Kolben und einer Flüssigkeit mit der Viskosität η vor. Wirkt eine Kraft auf den Kolben, so bewegt sich dieser proportional zur einwirkenden Kraft und der Zeit. Wird die Kraft entfernt, so bleibt der Kolben in seiner Position stehen.

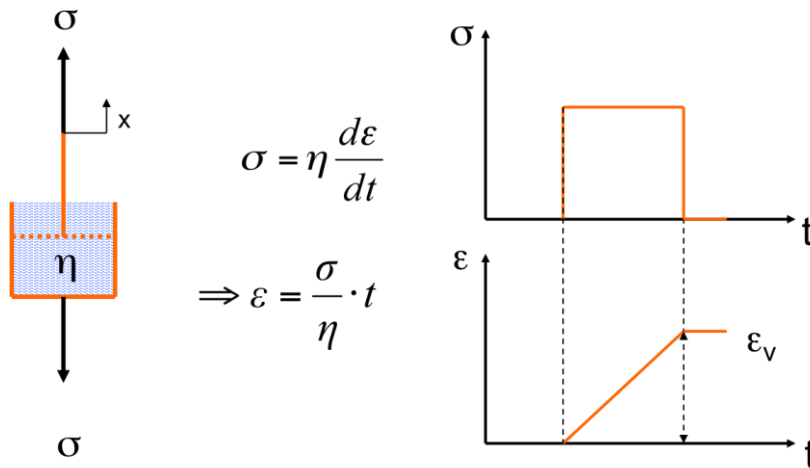


Bild 52: Newton'scher Dämpfer (1)

Wird auf den Newton'schen Dämpfer eine konstante Spannung aufgebracht, so zeigt der Dämpfer eine linear mit der Zeit veränderliche Verformung, die umso größer ist je größer die aufgebrachte Spannung (Bild 52).

Wird die Spannung mit der Zeit linear verändert, so weist der Dämpfer eine mit der Zeit quadratisch veränderliche Verformung auf (Bild 53). Dieses lässt sich mathematisch über

$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}$
ausdrücken.

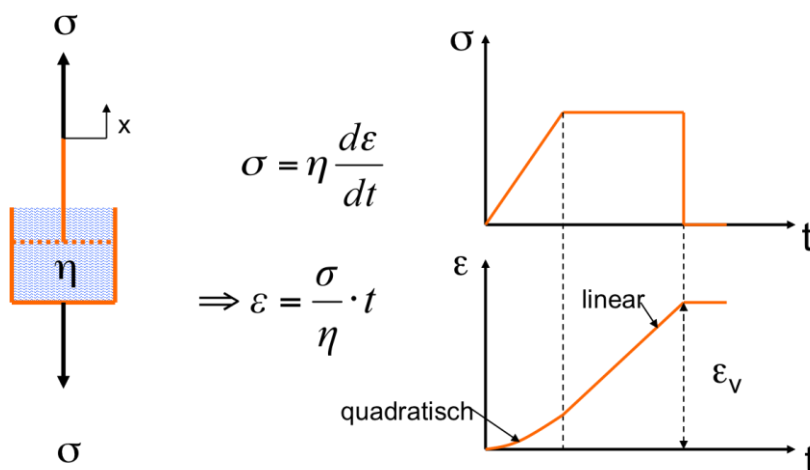


Bild 53: Newton'scher Dämpfer (2)

Da der Dämpfer in seiner Position stehen bleibt, sobald die Spannung entfernt wird, bedeutet dies, dass mit dem Newton'schen Dämpfer allein nur eine (zeitlich) verzögerte bleibende Verformung simuliert werden kann.

Um das Verhalten eines viskoelastischen Werkstoffs zu beschreiben, müssen daher Elemente gekoppelt werden, die zum einen die elastischen und zum anderen die viskosen Eigenschaften hinreichend beschreiben können.

Ein bekanntes Modell ist das so genannte **Maxwell-Modell**, das man durch Hintereinanderschaltung der Hooke'schen Feder und des Newton'schen Dämpfers erhält. Das Maxwell-Modell ist in Bild 54 dargestellt. Da die beiden Elemente in Reihe geschaltet sind, ist die Spannung in beiden gleich groß, und die Gesamtverformung ergibt sich als Summe der beiden Einzelverformungen.

Beim Aufbringen der Spannung, wird das Federelement zunächst sofort gedehnt und beschreibt die elastische Verformung. Das Dämpferelement zeigt beim Aufbringen der Spannung zunächst keine Verformung. Mit der Zeit nimmt die Verformung zu. Nach dem Entlasten verformt sich das Federelement sofort zurück. Das Dämpferelement verformt sich nicht zurück. Damit kann man mit dem Maxwell-Modell nur elastische und bleibende viskose Verformungen modellieren.

Wird die Spannung mit der Zeit linear verändert, so weist der Dämpfer eine mit der Zeit quadratisch veränderliche Verformung auf (Bild 55).

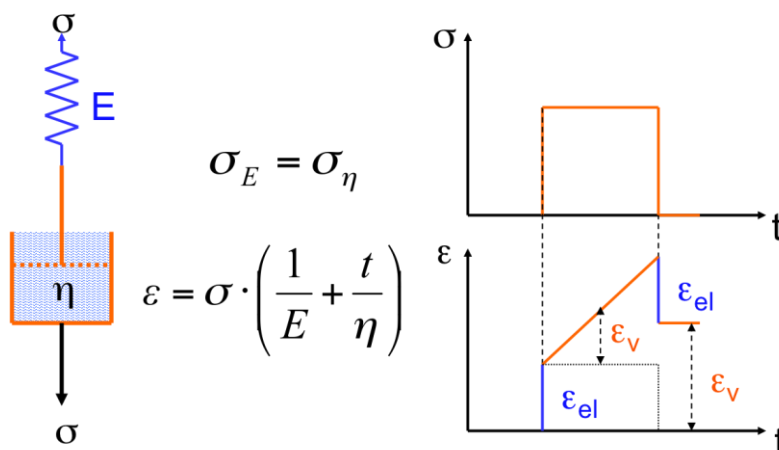


Bild 54: Maxwell-Modell (1)

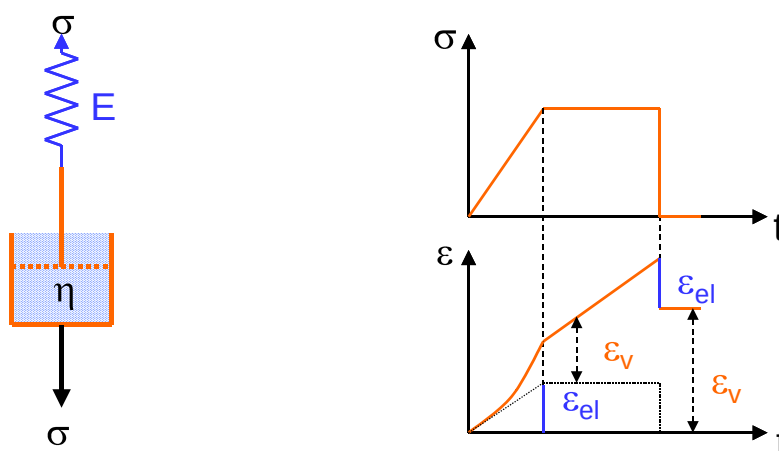


Bild 55: Maxwell-Modell (2)

Ein weiteres Modell ist das **Kelvin-Modell**, das man durch Parallelschaltung der Hooke'schen Feder und des Newton'schen Dämpfers erhält (Bild 56). Da die beiden Elemente

durch einen gedachten starren Riegel parallel geschaltet sind, ist die Verformung in beiden gleich groß, und die Gesamtspannung ergibt sich als Summe der beiden Einzelspannungen.

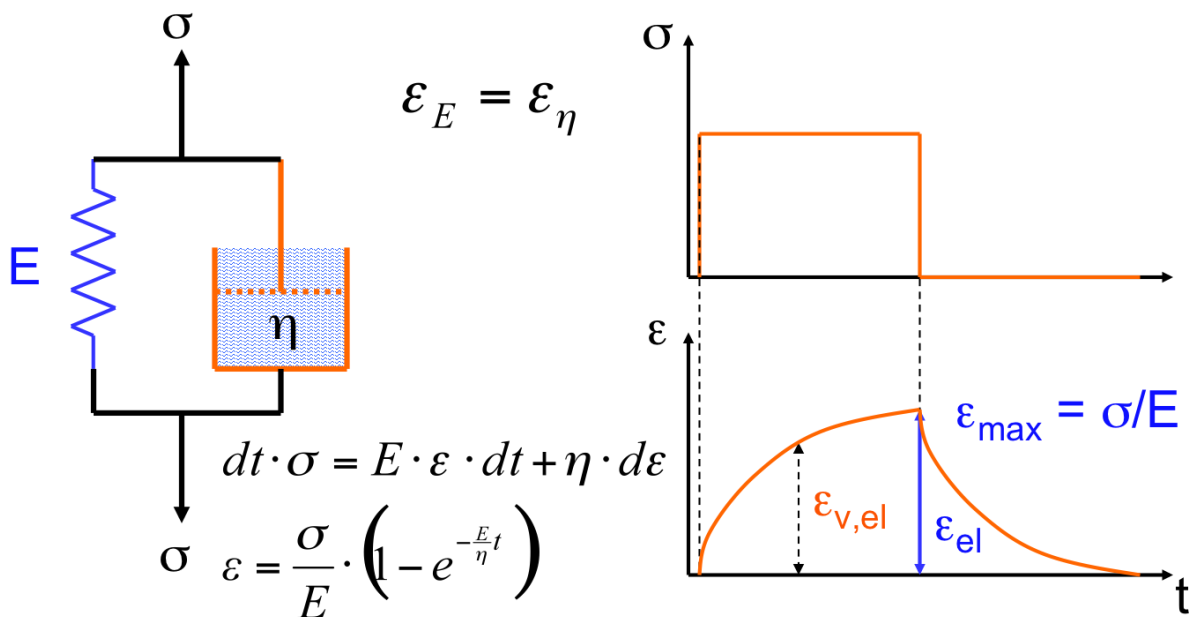


Bild 56: Kelvin-Modell (verzüglich elastische Verformung)

Beim Aufbringen der Last, kann das Federelement nicht sofort gedehnt werden, da das Dämpferelement beim Aufbringen der Last zunächst keine Verformung zeigt. Mit der Zeit nimmt die Verformung im Dämpferelement jedoch zu und das Federelement wird zeitabhängig gedehnt. Dabei nimmt das Federelement immer mehr Last auf sich, während der Dämpfer der Last immer weiter ausweicht. Nach ausreichend langer Zeit ist der Dämpfer spannungsfrei und die Feder trägt die ganze Last. Da die Spannung im Dämpfer mit der Zeit abnimmt, wird die Verformungskurve mit der Zeit immer flacher.

Nach dem Entlasten will sich das Federelement zurückverformen, wird jedoch durch das Dämpferelement gebremst, in dem sich der Kolben nun abwärts bewegt. Dabei wird die Feder immer weiter entlastet. Nach genügend langer Zeit wird der Ausgangszustand jedoch wieder erreicht.

Damit kann man mit dem Kelvin-Modell nur reversible viskose Verformungen modellieren.

Um elastische, verzögert elastische und verzögert plastische Verformung zu modellieren, wie sie bei vielen Werkstoffen, wie z. B. Beton auftreten, kann man im so genannten **Burger-Modell** das Maxwell- und das Kelvin-Modell in Reihe schalten (Bild 57). Wird hier die Spannung aufgebracht, so stellt sich im Hooke'schen Federelement 1 sofort rein elastische Dehnung ein. Bei konstanter Spannung entstehen im Newton'schen Dämpferelement 3 mit der Zeit linear veränderliche bleibende Dehnungen. Hieraus setzt sich das Maxwell-Element zusammen. Das in der Mitte angebrachte Kelvin-Element erzeugt die verzögert elastischen reversiblen Dehnungen.

Bei vielen Baustoffen spielt das viskoelastische Verhalten nicht nur bei einer dauernd aufgebrachten Spannung eine Rolle, sondern bereits im Kurzzeitversuch können sie nicht mehr als ideal elastisch angesehen werden, z. B. Kunststoffe. Bild 58 zeigt die σ - ε -Linien eines derartigen Stoffes bei Erstbelastung und Entlastung. Nach der Entlastung ist die Dehnung nicht vollkommen zurückgegangen. Die Be- und Entlastungskurve bilden eine **Hysteresisschleife**,

deren Flächeninhalt eine Energie als Formänderungsarbeit darstellt, die dabei verbraucht wird und zu einer Erwärmung der Probe führt.

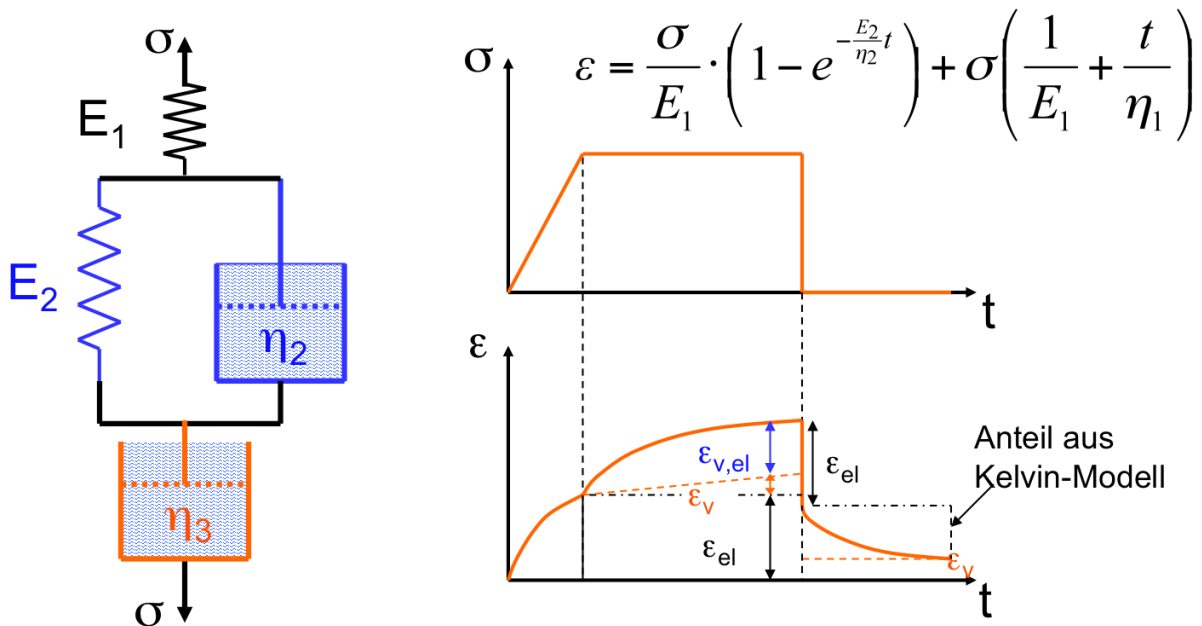


Bild 57: Burger-Modell

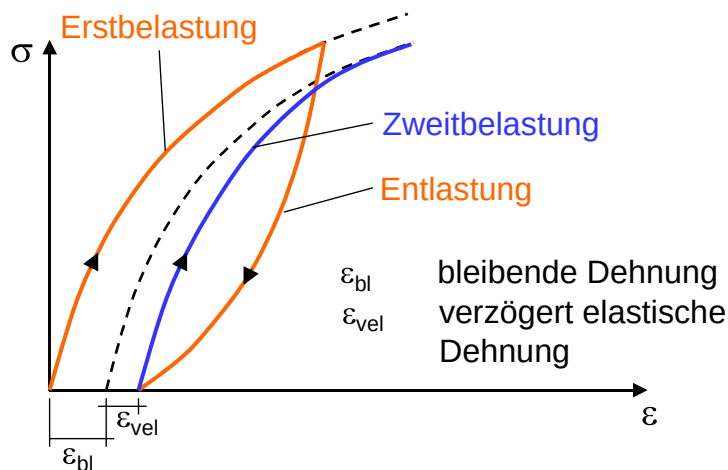


Bild 58: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für viskoelastische Werkstoffe

Bei viskoelastischen Werkstoffen spielt auch die Belastungsgeschwindigkeit eine große Rolle für das Verformungsverhalten (Bild 59). Mit niedrigerer Belastungsgeschwindigkeit werden die σ - ϵ -Linien flacher, da die zeitabhängigen viskosen Verformungsanteile zunehmen (siehe Bild 56, Formel Kelvin-Modell). Mit höherer Temperatur sind die viskosen Verformungsanteile größer. Das macht sich insbesondere bei Kriechen, Relaxation, Dauerstandfestigkeit und Dauerschwingfestigkeit bemerkbar.

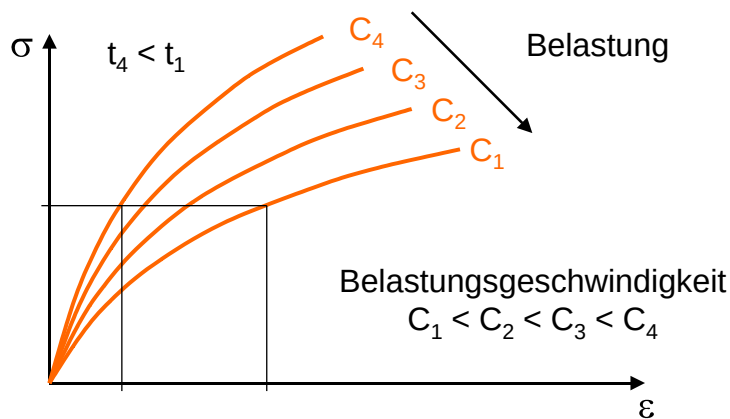


Bild 59: Spannungs-Dehnungs-Linien für viskoelastische Werkstoffe bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten $C_1 < C_2 < C_3 < C_4$

8.3.4.4 Schwingende Belastung

Bringt man bei einem *viskoelastischen Stoff* eine schwingende Belastung auf, so stellt man fest, dass Spannung und Dehnung gegeneinander zeitlich versetzt sind. Dies bezeichnet man als phasenverschoben und kennzeichnet es durch den Phasenwinkel ϑ [rad] (Bild 60). Man bezeichnet $\tan \vartheta$ als Verlustfaktor. Die **Dämpfung** ist der Energieverlust pro Schwingung. Die Dämpfung wird auch bei der freien Schwingung einer Probe durch die Abnahme der Amplitude deutlich (Bild 61).

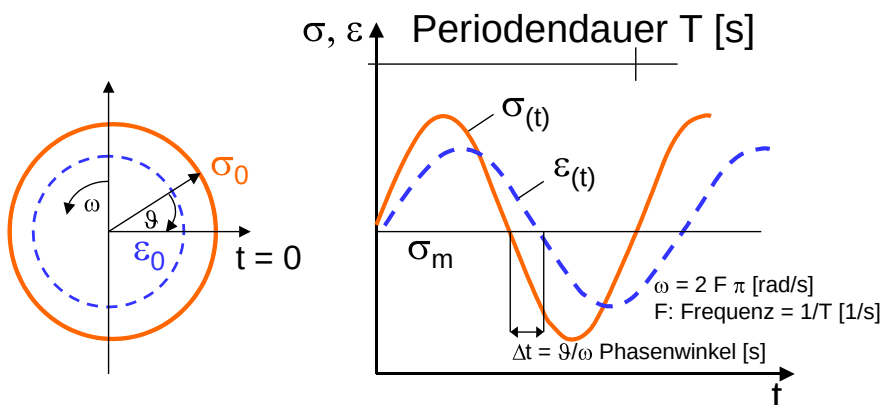


Bild 60: Spannung und Dehnung bei zyklischer Belastung

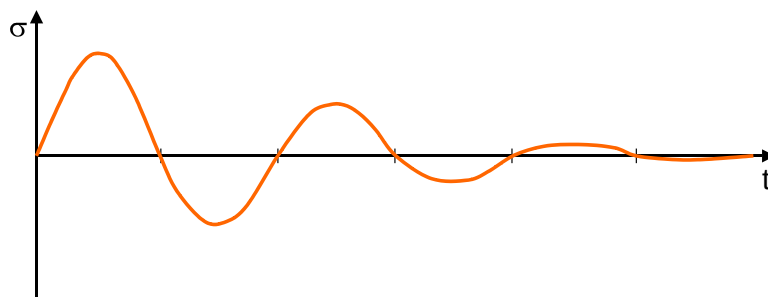


Bild 61: Spannungsverlauf bei freier Schwingung eines Werkstoffs mit starker Dämpfung, z. B. Gummi, Gusseisen

9 Festigkeit [Lit 21]

9.1 Allgemeines

Alle Spannungs-Dehnungs-Linien erreichen einen Punkt, an dem die Spannung nicht weiter gesteigert werden kann (Bild 62). Die höchste aufbringbare (= maximale) Spannung wird als **Festigkeit R** bezeichnet. Das Gefüge eines Stoffes ändert sich bis zum Erreichen von R mehr und mehr, bis der Bruch eintritt. Bei konstanter Spannungszunahme gibt es keinen abfallenden Verlauf der σ - ϵ -Linie. Wenn man eine Probe mit konstanter Dehnungszunahme belastet, kann die σ - ϵ -Linie nach Erreichen der Festigkeit (R) noch mehr oder weniger rasch abfallen. Der abfallende Ast der σ - ϵ -Linie lässt sich versuchstechnisch nur mit verformungsgesteuerten Prüfmaschinen verfolgen.

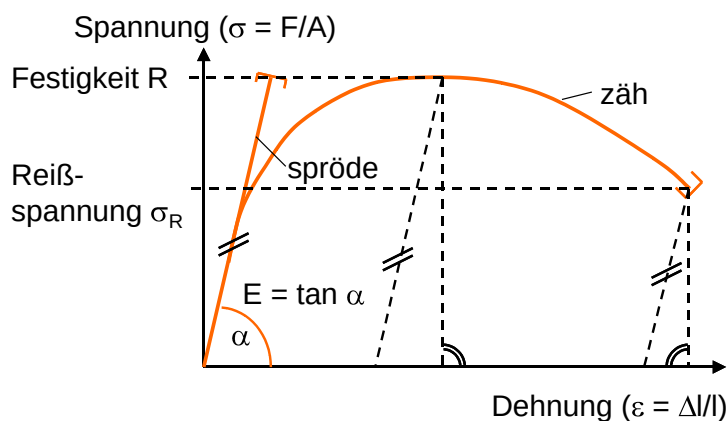


Bild 62: Schematische Spannungs-Dehnungs-Linien metallischer Stoffe

Viele Werkstoffe verformen sich vor dem Bruch stark. Zähne Stähle (wie z. B. Baustähle) schnüren sich am Bruchquerschnitt (Bild 63) ein. Die Spannung (und daher auch die Festigkeit) wird aber stets auf den Ausgangsquerschnitt bezogen. Die "wahre" Festigkeit - Bruchlast geteilt durch Bruchquerschnitt bezeichnet man als **Reißfestigkeit**.

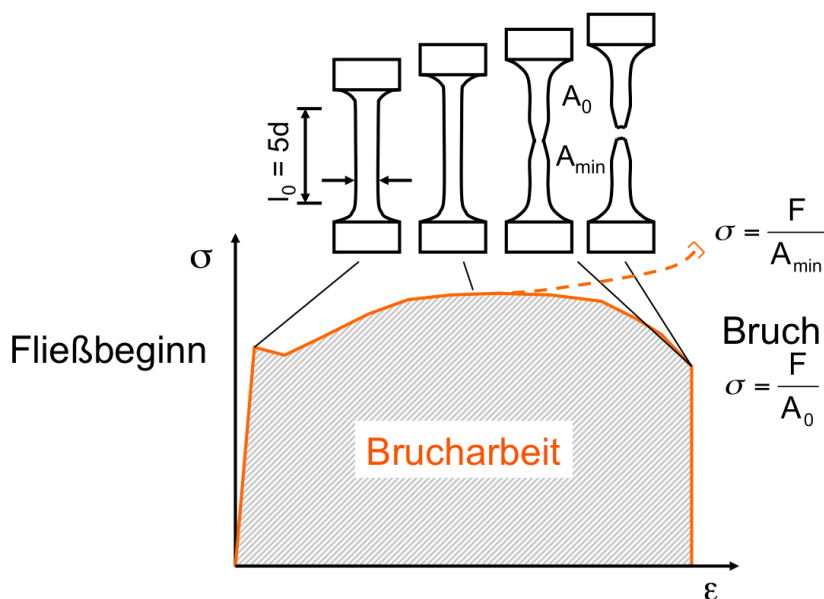


Bild 63: Spannungs-Dehnungs-Linie mit Einschnürung der Zugprobe

Die zulässige Spannung wird als bestimmter Prozentsatz der Festigkeit oder der Spannung an der Fließgrenze gewählt.

$$\sigma_{zul} = \frac{R}{\gamma}$$

mit dem **Sicherheitsbeiwert** $\gamma = 1,3 - 7$. Die Höhe von γ wird u. a. bestimmt von:

- den zu erwartenden Güteschwankungen des Baustoffes,
- Unsicherheiten der Belastungsannahme und der Berechnung,
- Imperfektion der Bauausführung,
- vom Schadensumfang bei Versagen (Menschenleben?) und
- der Frage der Ankündigung des Versagens.

In Bild 64 sind einige Spannungs-Dehnungs-Linien (Arbeitslinien) bis zum Erreichen der Festigkeit dargestellt. Stoffe, die linear elastisch sind und beim Bruch nur eine kleine Dehnung aufweisen, nennt man **spröde** (z. B. Glas). Ist die Dehnung bis zum Bruch und damit die aufnehmbare Formänderungsarbeit groß, nennt man den Stoff **zäh** (z. B. Baustahl).

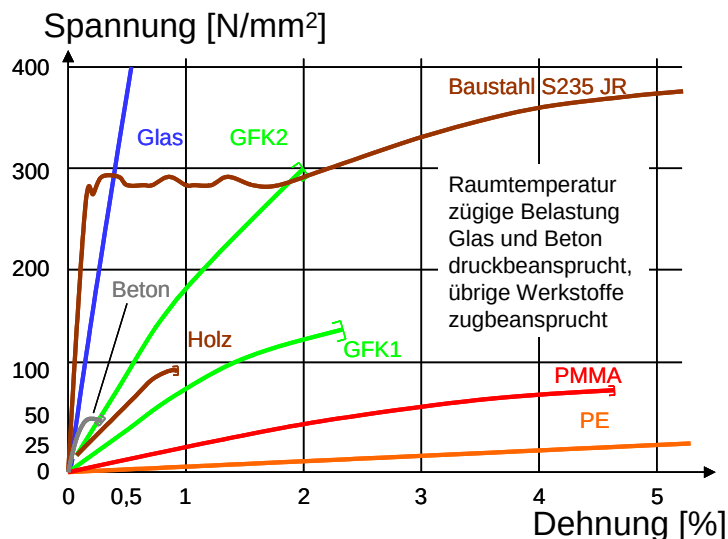


Bild 64: Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Baustoffe

Die Festigkeit wird sehr stark von Poren und **Kerben** beeinflusst, da an solchen Stellen in einer Probe hohe Spannungsspitzen auftreten können (Bild 65), die um so größer sind, je kleiner der Krümmungsradius an der Spitze der Kerbe ist.

Bei einem zähen Werkstoff wird die Spannungsspitze im Kerbgrund abgebaut, der Kerbradius r_0 wird durch plastische Verformung größer, die Spannungskonzentration nimmt ab. Ein spröder Werkstoff kann sich nicht plastisch verformen. Im Kerbgrund entsteht ein Anriss mit der Folge eines verformungslosen Trennbruches (Bild 66). Spröde Werkstoffe sind im Gegensatz zu zähen sehr **kerbempfindlich**. Glas lässt sich zum Beispiel durch sehr kleine Kerben brechen (Prinzip des Glasschneiders).

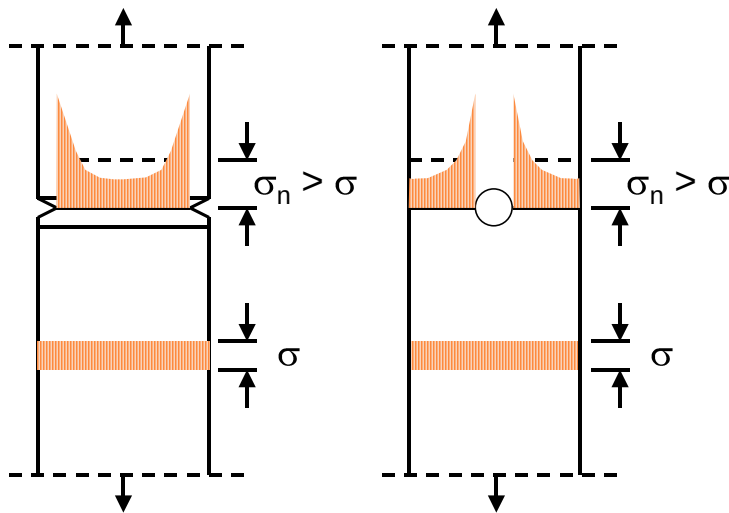


Bild 65: Spannungsspitzen durch Kerbe und Loch

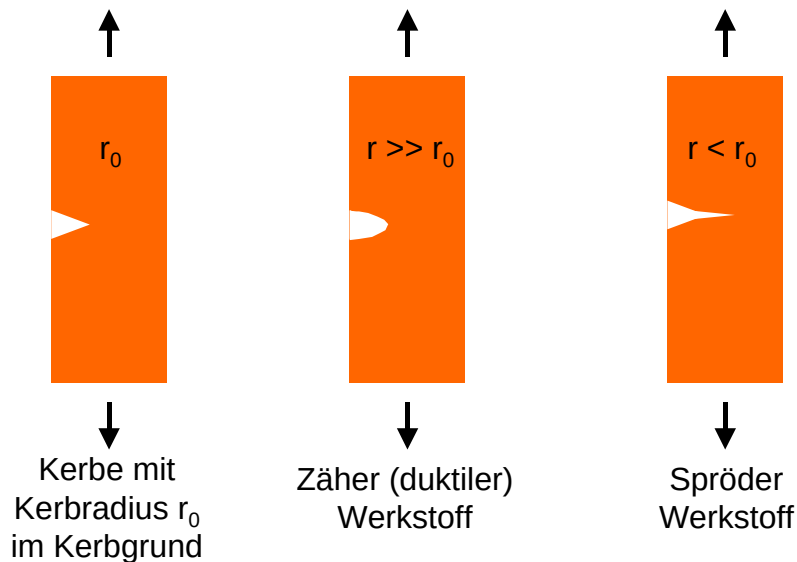


Bild 66: Auswirkung einer Kerbe auf zähen und spröden Werkstoff unter Zugbeanspruchung (schematisch)

9.2 Prüfung der Kurzzeitfestigkeiten

Die statische Festigkeit wird in **Kurzzeitversuchen** bestimmt, bei denen die Zeit bis zum Erreichen der Höchstlast i. A. etwa 1 Minute beträgt. Die in solchen Versuchen ermittelte Festigkeit wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst (**Prüfeinflüsse**), z. B. Temperatur, Belastungsgeschwindigkeit, Form und Größe der Probekörper, Feuchtigkeitsgehalt. Um Prüfergebnisse vergleichen zu können, müssen die Prüfverfahren genau festgelegt werden und alle störenden Einflüsse so weit wie möglich ausgeschaltet werden.

Neben der Zug-, Biege- und Druckfestigkeit prüft man die Festigkeit auch unter komplizierteren Spannungszuständen, wobei man jeweils Beanspruchungen nachahmt, die von praktischem Interesse sind (Bild 67, Bild 69 und Bild 71).

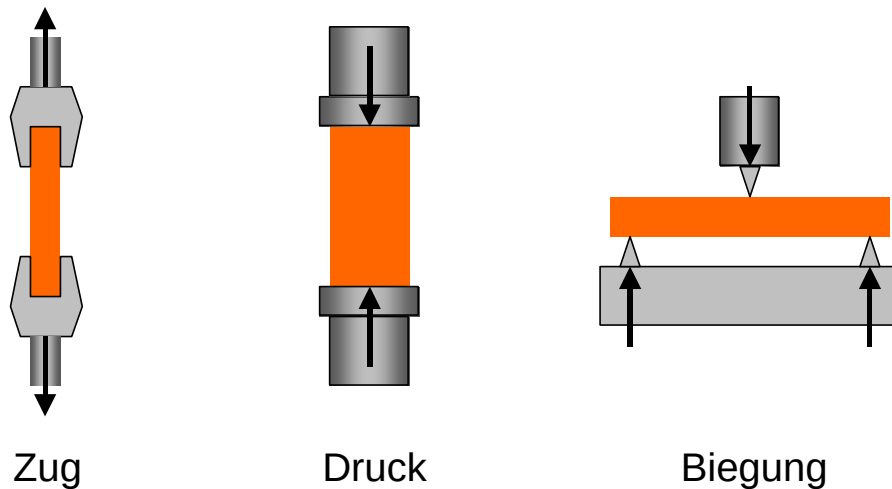


Bild 67: Wichtigste Arten der Beanspruchung von Baustoffen: Normalkräfte

9.2.1 Druckfestigkeit

$$R_D = \frac{\max F}{A}$$

Die Druckfestigkeit R_D wird z. B. geprüft bei

- Beton: meist an Würfeln, mit 15 cm Kantenlänge oder, aber auch an Zylindern mit Durchmesser 15 cm und Länge 30 cm,
- Natursteinen: meist an 5 cm Würfeln,
- Mauersteinen: meist an ganzen Steinen oder aufeinander gemörtelten Steinhälften,
- Dämmstoffplatten.

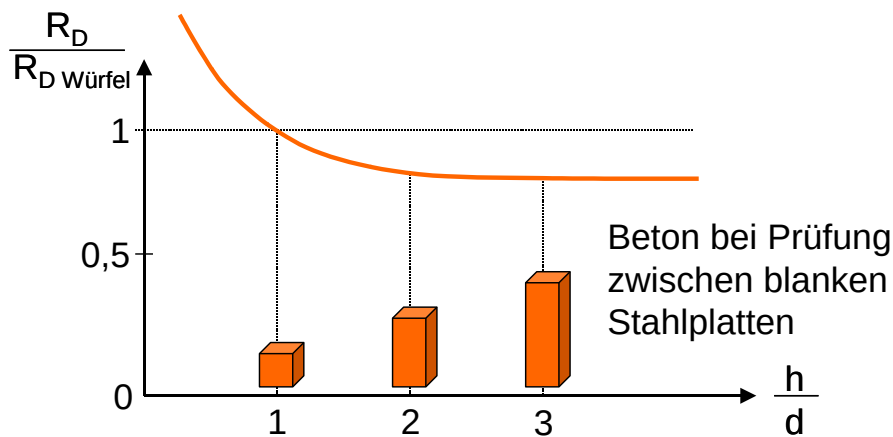
Tabelle 29 enthält den praktischen Bereich für die Druckfestigkeitswerte verschiedener Baustoffe.

Tabelle 29: Beispiele für Druckfestigkeiten verschiedener Baustoffe

Baustoff	R_D [N/mm ²]
Erstarrungsgestein	160 – 400
Beton	8 – 130
Nadelholz parallel zur Faser	25 - 80

Die Druckflächen der Probekörper und der **Prüfmaschine** müssen exakt eben und parallel sein. Eine der beiden Platten der Prüfmaschine muss eine Kalotte haben, damit sich die Platte an die Probekörperfläche anlegen kann. Unter Last darf sich die Platte nicht mehr drehen (Kalottenreibung), damit die Probe nicht ungleichmäßig verformt wird.

Durch die Reibung zwischen Prüfplatte und Probekörper wird die Querdehnung in den gedrückten Flächen der Probe behindert. Infolge dieser **Querdehnungsbehinderung** baut sich dort eine senkrecht zur Druckrichtung wirkende Druckspannung auf. Unter dieser dreiaxsi- gen Druckbeanspruchung können höhere Druckspannungen in Lastrichtung ertragen werden als bei einachsiger Beanspruchung. Die Festigkeit gedrungener Probekörper (z. B. Würfel) ist deshalb höher als die prismatischer Körper (z. B. Höhe zu Dicke wie 3 : 1) (Bild 68).



Prismendruckfestigkeit $R_D \sim 0,75 - 0,85 R_{D \text{ Würfel}}$

Bild 68: Einfluss der Schlankheit auf die Druckfestigkeit von Beton

Neben der **Gestalt** hat auch die **Größe der Probe** einen Einfluss auf die im Versuch ermittelte Festigkeit. Bei größeren Proben ergibt die Prüfung eine niedrigere Festigkeit, weil sich die Stahldruckplatten der Prüfmaschine geringfügig verformen. So haben 30 cm-Betonwürfel eine 5 bis 10 % geringere Druckfestigkeit als 20 cm-Würfel.

9.2.2 Zugfestigkeit

$$R_z = \frac{\max F}{A}$$

Die **zentrische Zugfestigkeit** R_z wird an stabförmigen Proben (z. B. Betonstählen) bestimmt (Bild 67). Es werden auch Zugproben verwendet, die zur Lasteinleitung an der Einspannstelle verstärkt sind (vgl. Bild 63 und Bild 69 links). An Beton, Naturstein und ähnlichen Stoffen ist die axiale Zugfestigkeitsprüfung schwierig. Man prüft deshalb ersatzweise die Spaltzug- oder Biegefestigkeit.

9.2.3 Spaltzugfestigkeit

Werden begrenzt große Körper durch linien- oder punktförmige Kräfte belastet, so treten durch das "Umlenken" der Spannungen im Lasteinleitungsbereich senkrecht zur Lastrichtung Zugspannungen auf (Bild 69 Mitte). Dadurch ist es möglich, in einer Druckprüfmaschine mit dem relativ einfachen Spaltzugversuch die **Spaltzugfestigkeit** R_{sz} zu bestimmen, die meist eine ähnliche Größe hat wie die zentrische Zugfestigkeit. Die Unterschiede zwischen den beiden sind durch den zweiachsigen Spannungszustand beim Spaltzugversuch bedingt.

Bei einem Zylinder, der an zwei einander gegenüberliegende Mantellinien mit Lasten F belastet wird, berechnet sich die Spaltzugfestigkeit nach den Gesetzen der Elastizitätstheorie zu:

$$\text{Spaltzugfestigkeit } R_{sz} = \frac{2 \cdot \max F}{\pi \cdot l \cdot d} = \frac{\max F \cdot \text{Linienlast}}{l} \cdot \frac{1}{\pi \cdot d \cdot \text{Umfang}} \approx 0,64 \frac{\max F}{d \cdot l},$$

d: Zylinderdurchmesser,
l: Zylinderlänge.

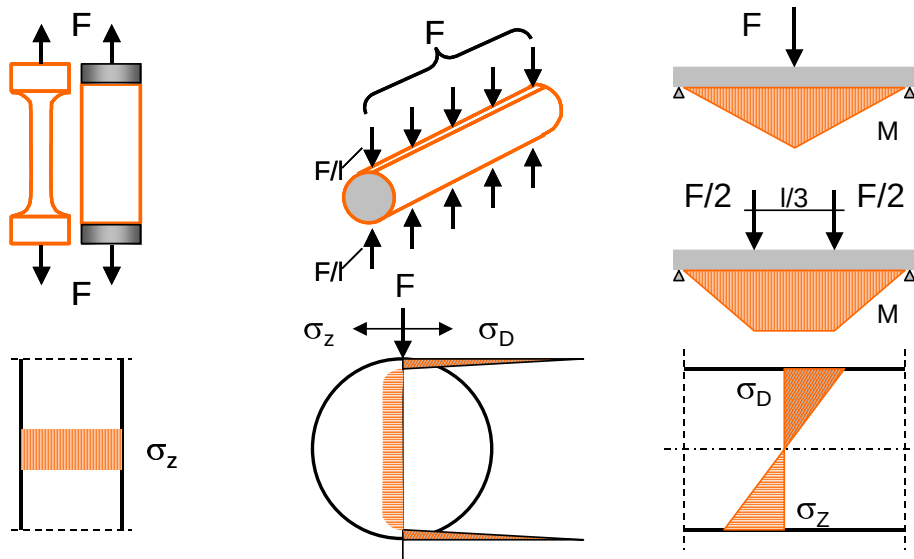


Bild 69: Prüfanordnung und Spannungszustände bei verschiedenen Zugbeanspruchungen

9.2.4 Biegefestigkeit

Man lagert Probekörper auf zwei Stützen und belastet sie durch eine mittige Einzellast oder durch zwei in den Drittelpunkten der Stützweite angreifende Einzellasten (Bild 69 rechts). Die **Biegefestigkeit** R_B berechnet man unter der Annahme von bis zum Bruch für Zug und Druck gleich bleibenden E-Moduln zu:

$$R_B = \frac{\max M}{W},$$

max M: größtes Biegemoment,
W: Widerstandsmoment.

Bei zwei Einzellasten ist das Moment zwischen den Einzellasten konstant und der Bruch tritt auf dieser Strecke an der schwächsten Stelle ein. R_B wird dadurch bei Prüfung mit zwei Einzellasten kleiner als mit einer Einzellast.

Bei Baustoffen, bei denen die Zugfestigkeit kleiner als die Druckfestigkeit ist, tritt der Bruch durch Versagen der Zugzone ein. Man spricht dann von **Biegezugfestigkeit** R_{BZ} (z. B. bei Beton, Naturstein).

9.2.5 Haftfestigkeit

Mit Haftfestigkeit R_H bezeichnet man die höchste erreichbare Haftspannung zwischen zwei Stoffen (z. B. bei Anstrichen, Beschichtungen, Putzen). Die Kraft wirkt senkrecht zur Haftfläche

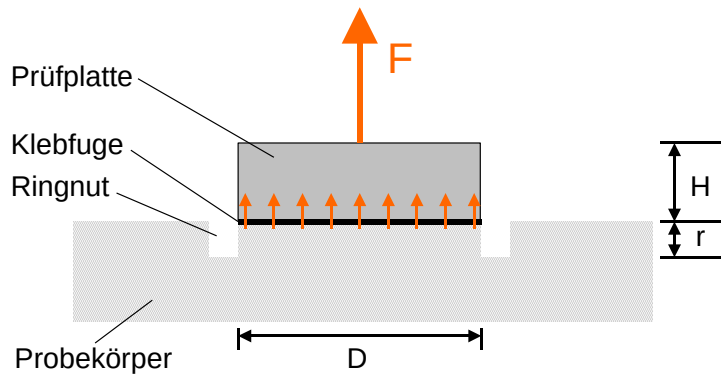


Bild 70: Schematische Darstellung einer Prüfplatte mit den Abmessungen $D:H = 2:1$

9.2.6 Scherfestigkeit

Von **Scherfestigkeit** R_S spricht man, wenn das Versagen in einer bestimmten Ebene durch in dieser Ebene wirkende Kräfte (Scherkräfte) eintritt, wie es z. B. vorkommt bei Nieten, Schrauben, Holzbaudübeln und in Fugenebene belasteten Klebfugen (Bild 71).

9.2.7 Torsionsfestigkeit

Die **Torsionsfestigkeit** R_T ist die Festigkeit bei Beanspruchungen durch Verdrehen (Bild 71).

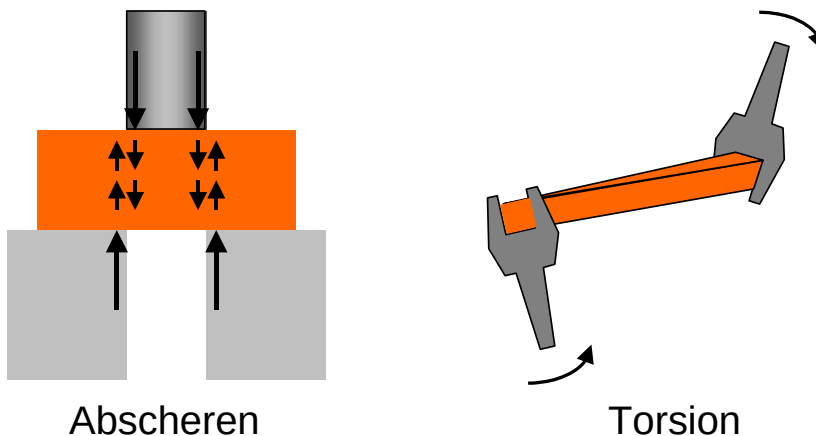


Bild 71: Wichtigste Arten der Beanspruchung von Baustoffen: Normalkräfte (Scher- und Schubbeanspruchung)

9.2.8 Schlagfestigkeit

Die **Schlagfestigkeit** ist der Widerstand gegen Schlag- bzw. Stoßbeanspruchung. Der Schlagbiegeversuch (Bild 72) wird vor allem bei Stählen als **Kerbschlagbiegeversuch** zur Beurteilung der Zähigkeit angewandt. Gemessen wird dabei die Arbeit (oder Energie), die die Probe beim Bruch aufnimmt. Je zäher ein Stoff ist, desto mehr Arbeit nimmt er auf.

Mit der Schlagfestigkeit wird auch der Zertrümmerungsgrad körniger Stoffe bei festgelegter Schlagarbeit beschrieben. Dabei wird durch Absieben nach z. B. 10 Schlägen mit einem definierten Fallgewicht festgestellt, wie viel % der Gesteinsmasse zertrümmert oder abgesplittet wurde. Der **Schlagzertrümmerungswert SZ** ist ein Kennzeichen für die Festigkeit von Gesteinssplitt.

Ansicht

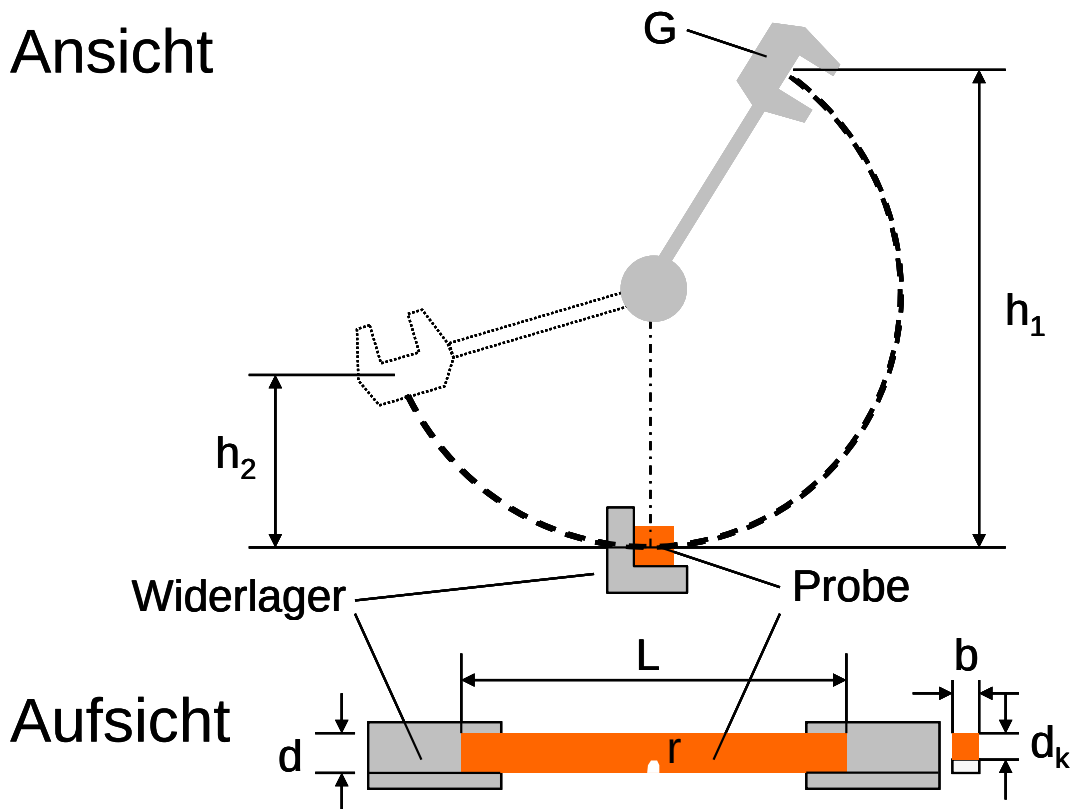


Bild 72: Kerbschlagversuch

9.3 Festigkeit unter statischer Langzeitbeanspruchung (Dauerstandfestigkeit)

Die **Dauerstandfestigkeit** ist die größte Spannung, die ein Stoff "dauernd" ertragen kann. Die Werkstoffprüfung kann natürlich nur Aussagen für einen begrenzten Zeitraum liefern.

Man kann z. B. Versuche mit einer Zeitdauer von 10^4 h (42 d) machen und dann eventuell auf 10^5 h (11,4 a) extrapolieren. Man kann dann ferner annehmen, dass der darüber hinausgehende Zeiteinfluss für die Nutzungsdauer einer Konstruktion nicht mehr stark ins Gewicht fällt und die Dauerfestigkeit damit genau genug in Rechnung gestellt ist. Zum Teil kann man sich auf praktische Erfahrungen für längere Zeiträume stützen.

Die Verminderung der Dauerstandfestigkeit gegenüber der Kurzzeitfestigkeit ist auf das Kriechen bei den hohen auftretenden Spannungen zurückzuführen. Ein Stoff, der stark kriecht, wird also auch eine geringe Dauerstandfestigkeit haben.

Folgende Beispiele geben einen Anhalt für die Größe der Dauerstandfestigkeit im Vergleich zur Kurzzeitfestigkeit:

- Kunststoffe: sehr verschieden, je nach Kunststoffart und Klima, teilweise erheblich unter 50 %,
- Beton (Druckfestigkeit): ca. 80 %,
- Holz (Biegezugfestigkeit): ca. 50 bis 60 %,
- Stahl: nahezu 100 %.

Eine Spannung, die nur über eine begrenzte Standzeit (das können wenige Minuten bis mehrere Jahre sein) ertragen werden kann, nennt man **Zeitstandfestigkeit**.

9.4 Festigkeit bei dynamischer Beanspruchung (Ermüdungsfestigkeit)

Baukonstruktionen werden durch ruhende Belastung - z. B. Eigenlast - und veränderliche Belastung - z. B. Verkehr, Wind - beansprucht. Der Einfluss der veränderlichen Last wird im Versuch durch sinusförmig schwingende Lasten studiert (Bild 73 und Bild 74). Dabei zeigt sich, dass die Festigkeit mit steigender **Lastspielzahl** kleiner wird, was in der "**Wöhlerkurve**" (Bild 75) zum Ausdruck kommt (Wöhler 1819-1914). Jede der ca. 10 Einzelproben wird mit einer Spannungsamplitude geprüft. Sie wird über ihrer Bruch- oder (ohne Bruch) Grenzlastspielzahl eingetragen. Die Verbindung der Punkte ergibt die Wöhlerkurve.

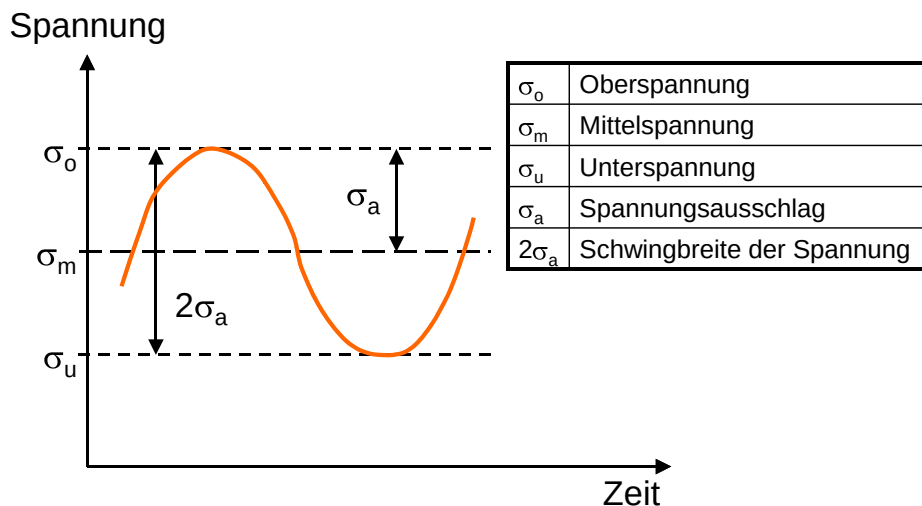


Bild 73: Begriffe der Dauerschwingbeanspruchung am Beispiel einer sinusförmigen Schwingung

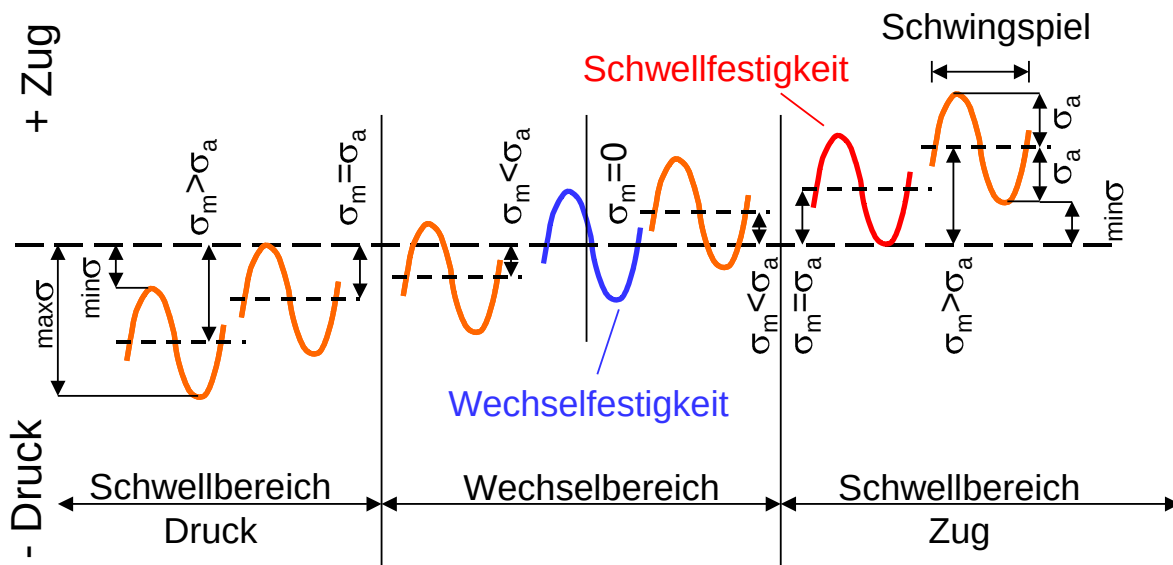


Bild 74: Beanspruchungsfälle im Dauerschwingversuch

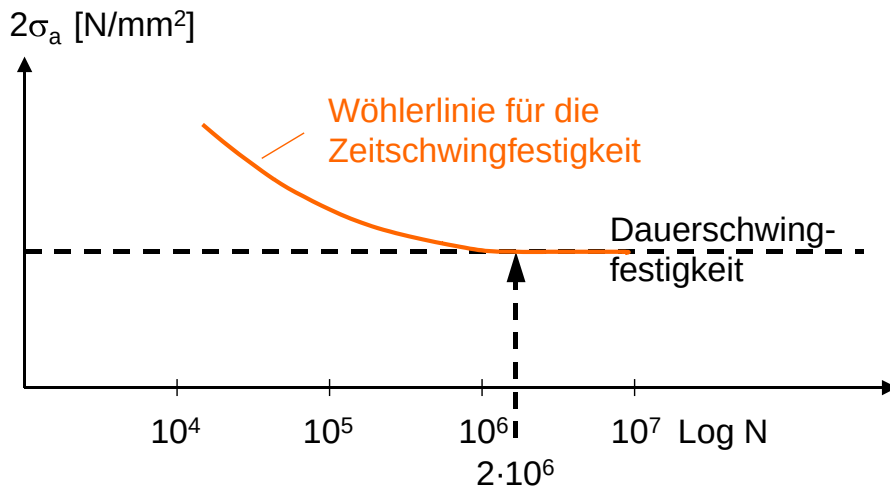


Bild 75: Wöhlerschaubild

Die "unendlich oft" ertragbare Spannung ist die **Dauerschwingfestigkeit** R_{Be} :

$$R_{Be} = \sigma_m + \sigma_a,$$

σ_m : Mittelspannung,

σ_a : unendlich oft ertragbarer Spannungsausschlag (Spannungsamplitude).

Die Dauerschwingfestigkeit wird bei Stahl nach ca. 10^7 , bei nicht aushärtbaren Aluminiumlegierungen nach 10^6 , bei aushärtbaren Aluminiumlegierungen erst nach 10^8 Lastwechseln mit ausreichender Genauigkeit erreicht. In der Werkstoffprüfung führt man bei Stahl in der Regel $2 \cdot 10^6$, bei Aluminiumlegierungen $50 \cdot 10^6$ Lastwechsel durch.

Im Maschinen- und Flugzeugbau geht man oft von einer begrenzten Nutzungsdauer und dementsprechend von einer endlichen Lastspielzahl aus. Man spricht dann von der **Zeitschwingfestigkeit**.

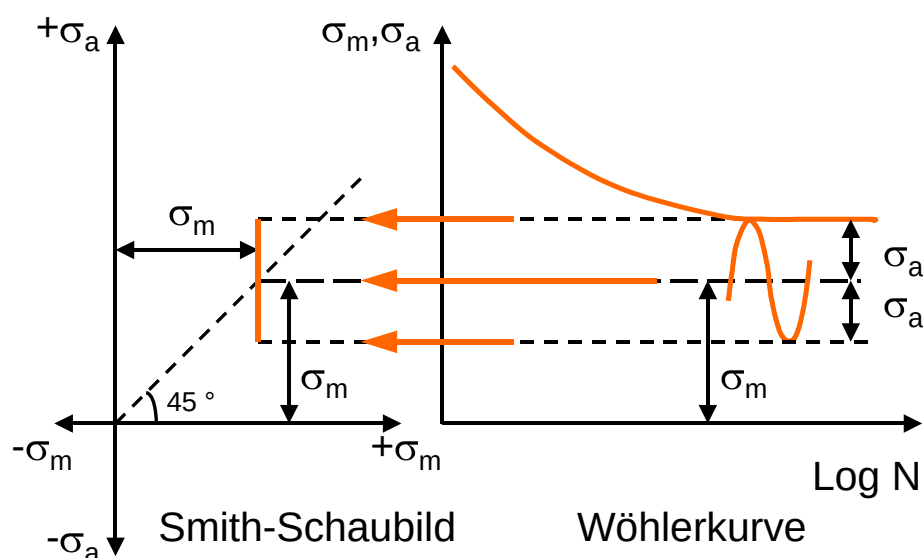


Bild 76: Entwicklung des Dauerfestigkeitsschaubilds nach Smith aus der Wöhlerlinie

Das **Dauerfestigkeitsschaubild nach Smith** zeigt, wie die Dauerschwingfestigkeit von der Mittelspannung $\sigma_m = 0,5 (\sigma_o + \sigma_u)$ abhängt.

Die Schwingfestigkeit wird sehr stark von Kerben und Inhomogenitäten im Material beeinflusst. An diesen Stellen treten Spannungsspitzen auf (s.o.), durch die es unter der Einwirkung der wechselnden Last zur Rissbildung und zum Risswachstum kommt, bis schließlich plötzlich, ohne große Werkstoffverformung der Bruch eintritt. Sprödbrüche können so auch bei duktilen Werkstoffen auftreten. Gefährliche Kerben können z. B. Korrosionsnarben sein.

9.5 Verschleißfestigkeit

Verschleiß (Abnutzung) ist der Masseverlust (Oberflächenabtrag) einer Stoffoberfläche durch:

- schleifende Beanspruchung (Rutschen von Schüttgütern, Geschiebe in Gerinnen, Fußgänger auf Treppen),
- rollende Beanspruchung,
- schlagende und kratzende Beanspruchung (Spikereifen, Schneeketten, Schneepflüge).

Die Beanspruchung des Werkstoffes ist dabei vielfältig und schwer überschaubar. Es müssen daher stets Prüfverfahren gewählt werden, die den Werkstoff ähnlich wie in der Praxis beanspruchen. Kennwerte, die einen Vergleich verschiedener Stoffe bei schleifender Beanspruchung ermöglichen, ermittelt man z. B. mit der Böhmescibe nach DIN 52 108 (Bild 77).

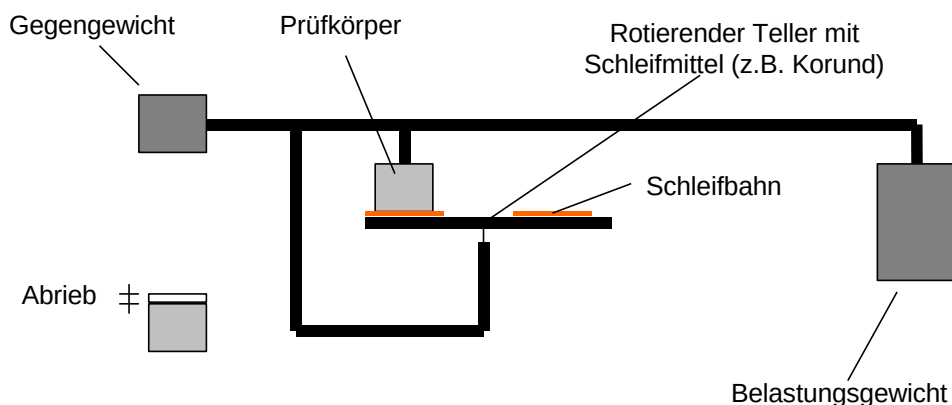


Bild 77: Verschleißprüfgerät nach Böhme

Man führt 16 Prüfperioden mit je 22 Umdrehungen der Scheibe durch. Nach jeder Periode wird die Probe um 90° gedreht. Die Abnutzung beträgt z. B.:

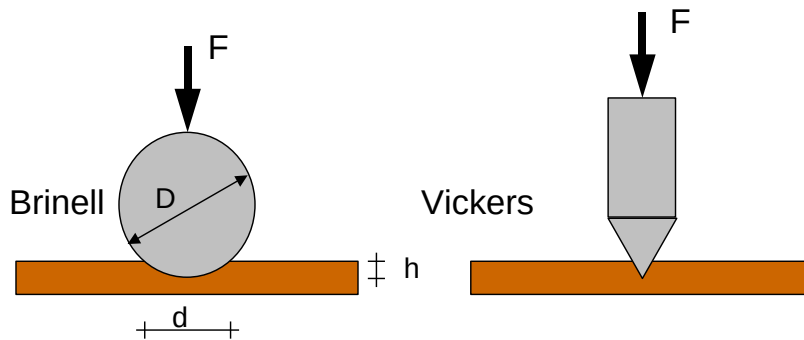
- gutes Gestein ca. 1 mm,
- Beton trocken 2 bis 3 mm und
- Beton nass 4 bis 6 mm.

9.6 Härte

Härte ist der Widerstand, den ein Material dem Eindringen eines anderen Körpers entgegensetzt. Als direkter Festigkeitswert ist die Härte im Bauwesen selten wichtig, sie ist jedoch ein hilfreiches Mittel zur Klassifizierung von mineralischen Stoffen (mit der **Ritzhärte** nach Mohs) oder zur indirekten Zugfestigkeitsbestimmung bei Stählen (mit den verschiedenen Eindruckhärten).

Bei vielen Stoffen wird die **Eindruckhärte** nach Brinell, Rockwell oder Vickers geprüft, wobei eine Kugel, eine Kegelspitze oder eine Pyramidenspitze mit einer Kraft F in die Oberflä-

che eingedrückt werden (Bild 78). Die Härte wird als Quotient aus der Kraft F und der Eindrucksfläche A angegeben.



(Plastische Verformung)

(Materialverdrängung)

Bild 78: Prinzip der Härteprüfung nach Brinell und Vickers

Die Härte nach Mohs bezieht sich auf die gegenseitige Ritzbarkeit von Mineralien (Tabelle 30).

Tabelle 30: Härte verschiedener Minerale

	Ritzhärte nach Mohs		Vickers-Härte
Härte	Mineral	Vergleichsstoff, der das Mineral ritzt	[N/mm²]
1	Talk		20
2	Gips	Fingernagel	300
3	Kalkspat	Kupfermünze	1700
4	Flussspat		2430
5	Apatit		5980
6	Feldspat (Orthoglas)	Stahlaschenmesser	9120
7	Quarz	Stahl guter Feilen	10980
8	Topas		12260
9	Korund		20590
10	Diamant		98070

10 Kraft- und Wegmessung

10.1 Allgemeines

Die Messtechnik lässt sich allgemein nach den bekannten Teilgebieten der Physik wie Mechanik, Akustik, Optik, Thermodynamik, Elektrodynamik und Kerntechnik unterteilen. Alle diese Teilgebiete sind heute in der Messtechnik des Bauingenieurwesens enthalten. Aufgabe der Messtechnik ist das Messen physikalischer Größen und Kennwerte von Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken, um deren Eigenschaften beschreiben und beurteilen zu können.

Da die direkt gemessenen Größen in der Regel umzurechnen und zu verarbeiten sind, muss die Messwerterfassung so gewählt werden, dass eine weitere Bearbeitung der Daten möglichst einfach realisiert werden kann. Soweit die prüftechnischen Gegebenheiten dies zulassen, werden die Messdaten heute direkt (online) einem Rechner zugeführt. Eine automatische Messdatenerfassung hat zusätzlich den Vorteil, dass die Ausgabe der Messwerte auch in größerer Entfernung vom Messobjekt möglich ist, wodurch eine eventuelle Gefährdung der Messenden bei einem Bruch der Probe ausgeschlossen wird.

Um die Verformungs- und Festigkeitseigenschaften von Werkstoffen zu prüfen und zu erforschen, braucht man Messvorrichtungen, mit denen Längenänderungen bzw. Kräfte genau und zuverlässig gemessen werden können. In jüngster Zeit werden auch schwierige Bauwerke immer mehr mit stationären Messgeräten ausgerüstet, z. B. Talsperren, verankerte Stützwände oder besondere Brücken. Ziel ist es dabei, die Rechenannahmen nach der Fertigstellung zu überprüfen, und somit während der gesamten Gebrauchsdauer die maßgebenden Sicherheitskenngrößen verfolgen zu können.

Die Messgeräte haben jeweils einen bestimmten Messbereich, innerhalb dem Messwerte erfasst werden können, der mehr oder weniger begrenzt ist. Man muss sich also vor einer Messung zunächst fragen, wie groß die Messwerte sein werden, und das Messgerät entsprechend auswählen. Je kleiner der Messbereich eines Gerätes ist, um so größer wird üblicherweise die Ablesegenauigkeit, d. h. die kleinste Einheit, die an der Anzeige des Gerätes gerade noch abgelesen werden kann (z. B. 1 mm, 1/1000 mm, 10 N, 0,1 N usw.).

Von der Ablesegenauigkeit streng zu unterscheiden ist die Messgenauigkeit (Messfehler). Die Ablesegenauigkeit kann durch "Spreizen" der Anzeige, also die mechanische Vergrößerung oder elektrische Verstärkung eines aufgenommenen Messsignals, fast beliebig gesteigert werden, womit jedoch nicht die Messgenauigkeit in gleichem Maße steigt. Diese hängt von der Vollkommenheit der gesamten Messeinrichtung ab, wobei die Ablesegenauigkeit nur einen Teil des gesamten Messfehlers ausmacht. Der absolute Fehler ist die Differenz zwischen angezeigtem (falschen) Wert und dem wahren (richtigen) Wert. Der absolute Fehler kann bestehen aus

1. zufälligen Fehlern (Messungenauigkeit). Sie werden durch Wiederholung der Messung und Mittelwertbildung verringert,
2. systematischen Fehlern, wie z. B. Abweichungen der Meterangabe eines Maßbandes vom Urmeter oder Abweichung der Anzeige einer Druckprüfmaschine von der wahren Kraft. Sie können nur durch Verwendung verschiedener Messgeräte aufgedeckt werden.

Darüber hinaus spricht man von

3. groben Fehlern, wenn z. B. Kommazahlen falsch gesetzt oder Messpunkte verwechselt werden.

Die zufälligen Fehler sind einer statistischen Auswertung zugänglich. Durch Wiederholung der Messung oder durch die Verwendung mehrerer Messgeräte kann die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Messung erhöht werden.

Bei Langzeitmessungen muss besonders auf die Nullpunktkonstanz geachtet werden, die bei elektrischen Messwertaufnehmern oft nicht gewährleistet ist.

Man unterscheidet mechanische und elektrische Messverfahren. Die elektrischen Messverfahren bieten die Möglichkeit, die Messwerte automatisch zu registrieren, aufzuschreiben und auszuwerten oder auch den Prüfvorgang durch die Messsignale zu steuern.

10.2 Messung einer Längenänderung

Man misst entweder die Dehnung ε direkt oder (die auf eine Ursprungslänge l_0 zu beziehende) Längenänderung Δl , womit man $\varepsilon = \Delta l / l_0$ berechnen kann. Δl wird auch gemessen, um die gegenseitige Verschiebung von zwei Punkten, z. B. bei der Rissöffnung oder beim Schlupf eines Betonstahles im Beton, zu bestimmen.

Tabelle 31: Wichtige Verfahren der Längen- und Verformungsmessung und zugehörige Messgenauigkeit

Gerät	Kurzbezeichnung	Funktionsprinzip	Maximaler Messwert [mm]	Messgenauigkeit [μm]	Anwendungskriterien
Messuhr	-	Mechanisch	5 – 100	1 – 10	Verformungsstillstand im Messzeitraum, Langzeitversuche, Korrosionsgefahr, kostengünstig
Magnetinduktiver Wegaufnehmer	LVDT	Elektrische Induktivitätsänderung	1 – 600	0,1	Statische und dynamische Verformung, geringe Trägheit, Beschleunigungsmessungen
Dehnungsmessstreifen	DMS	Elektrische Widerstandsänderung	0,6 – 150	0,1 (bei 10 % Längenänderung des DMS)	Statische und dynamische Verformung, geringe Trägheit, kostengünstig, Beschleunigungsmessungen, Temperaturkompensation

10.2.1 Mechanische Messuhr

Mit der **mechanischen Messuhr** kann man Längenänderungen Δl kostengünstig messen. Der Taststift der Messuhr folgt den Verschiebungen von zwei Messpunkten. Über ein Räderwerk ("Uhr") wird die Verschiebung übersetzt und an einem Zifferblatt angezeigt (Bild 79). Die Ablesegenauigkeit beträgt i.d.R. 1/100 oder 1/1000 mm (Die Messgenauigkeit steigt nicht in gleichem Maße wie die Ablesegenauigkeit, s. o.). Moderne Uhren nutzen anstelle der analogen eine digitale Anzeige. Dadurch können Ablesefehler vermieden werden. Zugleich kann

Technical drawing of a Stöbergeschütz Z1 pressure gauge. The left part is a photograph of the gauge, showing its circular face with a scale from 0 to 45.5, a needle, and a small sub-dial. The right part is a detailed technical drawing of the gauge's mechanical assembly with dimensions in millimeters.

Technical Drawing Dimensions (mm):

- Total height: 112
- Top flange diameter: $\varnothing 58$
- Top flange thickness: 23
- Top flange outer diameter: 7.5
- Top flange inner diameter: 7.5
- Top flange hole diameter: $\varnothing 8$
- Top flange hole depth: 17
- Top flange hole diameter: $\varnothing 52$
- Top flange hole depth: 22
- Top flange hole diameter: $\varnothing 8_{h6}$
- Top flange hole depth: 1
- Top flange hole diameter: $\varnothing 4_{h6}$
- Top flange hole depth: 15
- Top flange hole diameter: M2.5
- Top flange hole depth: 6
- Top flange hole diameter: 33
- Top flange hole depth: 16.5

10.2.2 Induktive Wegaufnehmer

The diagram on the left shows a cross-section of a Hall effect sensor assembly. A green wire passes through a blue cylindrical core. The core is surrounded by four orange cylindrical magnets. The assembly is housed in a grey cylindrical casing. A circuit diagram is overlaid on the diagram, showing a power source (A) connected to the magnets and a load (B) connected to the core. The photograph on the right shows the physical components: a grey cylindrical casing, a blue cylindrical core, and a green wire. A paperclip is used to hold the components together.

Bild 80: Induktiver Wegaufnehmer [Lit 23]

Mit dem **Dehnmessstreifen (DMS)** kann man Dehnungen messen. Dehnmessstreifen bestehen aus buchtenförmig gelegten dünnen Drähten, die sich gut isoliert auf einem dünnen Trägermaterial befinden (Bild 81). Die DMS werden an den Stellen, an denen man Dehnungen messen will, auf die Prüfkörper mit einem möglichst kriecharmen Kleber fest aufgeklebt. Wenn ein Prüfkörper gedehnt wird, überträgt sich die Dehnung auf den DMS. Durch die Dehnung des DMS wird der Ohm'sche Widerstand des feinen Drahtes vergrößert, weil sich infolge der Querdehnung der Querschnitt des Drahtes verringert und weil der Widerstand in

Abhängigkeit von der im Draht herrschenden mechanischen Spannung verändert wird. Die Widerstandsänderung kann über eine Brückenschaltung verstärkt und elektrisch sehr genau gemessen werden.

Die Messwerte können bei DMS durch Temperaturänderungen, die während des Messvorganges eintreten, und durch Feuchtigkeitseinflüsse, die zu unplanmäßigen Stromübertragungen und entsprechenden Änderungen des elektrischen Widerstandes führen, verfälscht werden. Um diese Einflüsse auszuschalten, sind besondere Vorkehrungen nötig.

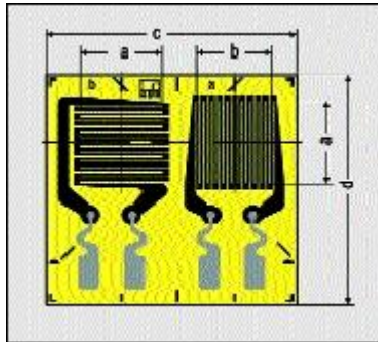


Bild 81: Aufbau eines Dehnmessstreifens

10.3 Kraftmessung

Kräfte kann man nicht direkt, sondern nur indirekt messen. Meist führt die Kraftmessung auf die Messung einer Längenänderung zurück. Kraftmessgeräte sind so gestaltet, dass unter einer einwirkenden Kraft eine zu ihr proportionale Längenänderung (oder Dehnungsänderung) auftritt, die gemessen werden kann. Bei bekanntem E-Modul und Querschnitt wird daraus die Kraft berechnet.

10.3.1 Elektrische Öldruckgeber

Beim elektrischen Öldruckgeber wird die infolge Flüssigkeitsdruck entstehende elastische Dehnung eines kleinen geschlossenen Gefäßes mit Dehnmessstreifen gemessen. Damit lassen sich die Kräfte sehr genau messen.

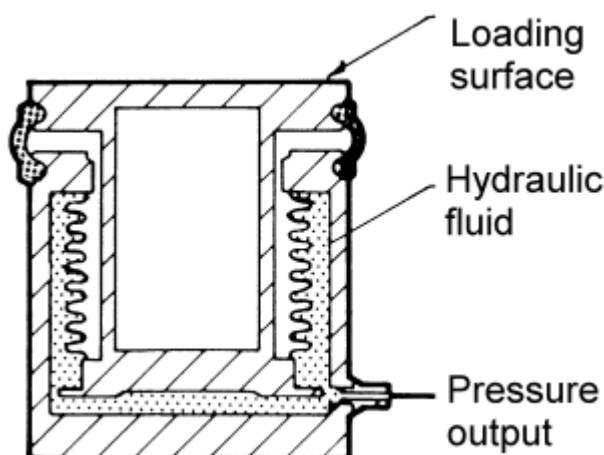


Bild 82: Kraftmessdose mithilfe von Öldruck

10.3.2 Kraftmessdosen

Bei **Kraftmessdosen** werden elastische Dehnungen oder Längenänderungen gemessen, die infolge der auf die Dose einwirkenden Kraft entstehen. Die Längenänderungen bzw. Dehnungen werden mit mechanischen Messuhren, induktiven Wegaufnehmern, Dehnmessstreifen u. a. gemessen.

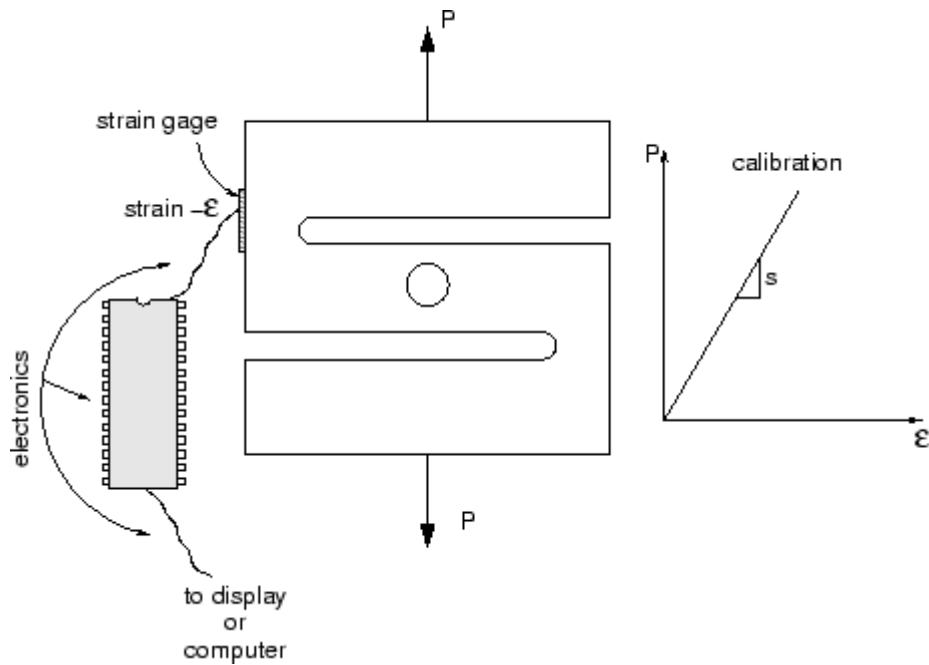


Bild 83: Kraftmessung mithilfe eines Dehnmessstreifens

11 Materialprüfung

11.1 Erfordernis

Prüfungen sind vor allem durchzuführen, wo

- Mängel an Baustoffen oder Bauteilen für möglich gehalten werden und
- diese Mängel schwerwiegende Folgen haben können (Gefahr für die Nutzer, hoher Aufwand für Instandsetzung bei späterem Entdecken).

11.2 Arten der Prüfungen

Nach dem "**Performance**" **Konzept** werden die Gebrauchseigenschaften geprüft, auf die es bei der Nutzung ankommt (z. B. Frostprüfungen, Zugprüfungen von Betonstahl). Da es für viele Eigenschaften kein entsprechend praktikables Prüfverfahren gibt (Zeitaufwand, Kosten) spricht man vom "**Description**" **Konzept**, wenn eine Bauwerkeigenschaft gefordert wird, die nur indirekt eine Gebrauchseigenschaft beschreibt (z. B. niedriger Gipsgehalt von Zement, damit diese nicht "treiben").

Zu unterscheiden sind in der Materialprüfung:

prüfungsabhängige Verfahren:

z. B. Druckfestigkeit von Beton,

Zugfestigkeit von Stahl

prüfungsunabhängige Verfahren:

z. B. Bestimmung des Schmelzpunktes

Bestimmung der Rohdichte

11.3 Anforderungen an Prüfverfahren

- (1) Bei der Prüfung muss eine **wirklichkeitsnahe Beanspruchung** (Performance) zum Versagen des Probekörpers führen bzw. eine, wenn möglich die maßgebende Kenngröße (Description) geprüft werden. Schwierigkeiten treten bei gleichzeitig verschiedenen wirkenden Beanspruchungen auf (z. B. Frost bei gleichzeitiger mechanischer Belastung).
- (2) Die erhaltenen Ergebnisse müssen **reproduzierbar** sein. Wird eine Prüfung wiederholt und wird diese vom selben Laboranten am selben Prüfgerät in derselben Art durchgeführt, dann dürfen sich nur geringfügig abweichende Ergebnisse zeigen (Wiederholstreuung). Sollen Ergebnisse von Prüfungen, die in anderen Laboratorien (andere Prüfmaschinen, andere Laboranten) durchgeführt wurden, verglichen werden, ist eine genaue Beschreibung des Prüfablaufes erforderlich. Dabei auftretende Abweichungen der Ergebnisse nennt man Vergleichsstreuung.
- (3) Der **Aufwand** an Zeit und Kosten bei der Durchführung und Auswertung einer Materialprüfung muss vertretbar sein.

11.4 Beurteilung von Prüfergebnissen

Um die bei den Prüfungen erhaltenen Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, müssen die Prüfverfahren nach den entsprechenden Normen durchgeführt werden, in denen die einzelnen Prüfeinflüsse "genormt" sind (z. B. Belastungsgeschwindigkeit, Prüfkorngröße).

11.5 Bewertung von Produkten nach Prüfzeugnissen

Jedermann kann Proben in Prüfläbern untersuchen lassen. Das Vorliegen eines Zeugnisses besagt nur, dass Prüfungen durchgeführt wurden. Um ein Prüfungszeugnis richtig zu bewerten, muss es sorgfältig studiert werden. Die für Prüfungen erforderlichen Proben sollen einer laufenden Produktion unvermutet entnommen werden, sodass diese als statistisch repräsentative Proben angesehen werden können.

Bei der Beurteilung von z. B. neuen Baustoffen oder neuen Zusätzen muss das Prüfergebnis mit einem Nullversuch verglichen werden. Beim Nullversuch werden bekannte Stoffe bzw. Zusammensetzungen geprüft. Z. B. kann die Wirkung eines Betonzusatzes nur beurteilt werden, wenn auch ein "Nullbeton" - ohne diesen Zusatz - geprüft wird.

12 Auswertung von Messergebnissen

Wird eine größere Anzahl von Probekörpern derselben Soll-Zusammensetzung geprüft, so treten Streuungen der Prüfergebnisse auf. Prüfergebnisse werden daher statistisch ausgewertet.

Trägt man die Häufigkeit H der in Klassen unterteilten Kennwerte x , z. B. die Ergebnisse von vielen Schüttdichteprüfungen, in Abhängigkeit von x auf, so ergibt sich eine Häufigkeitsverteilung (Histogramm oder Säulen-Darstellung der Verteilung). Anstelle der absoluten können auch relative Häufigkeiten aufgetragen werden (Bild 84).

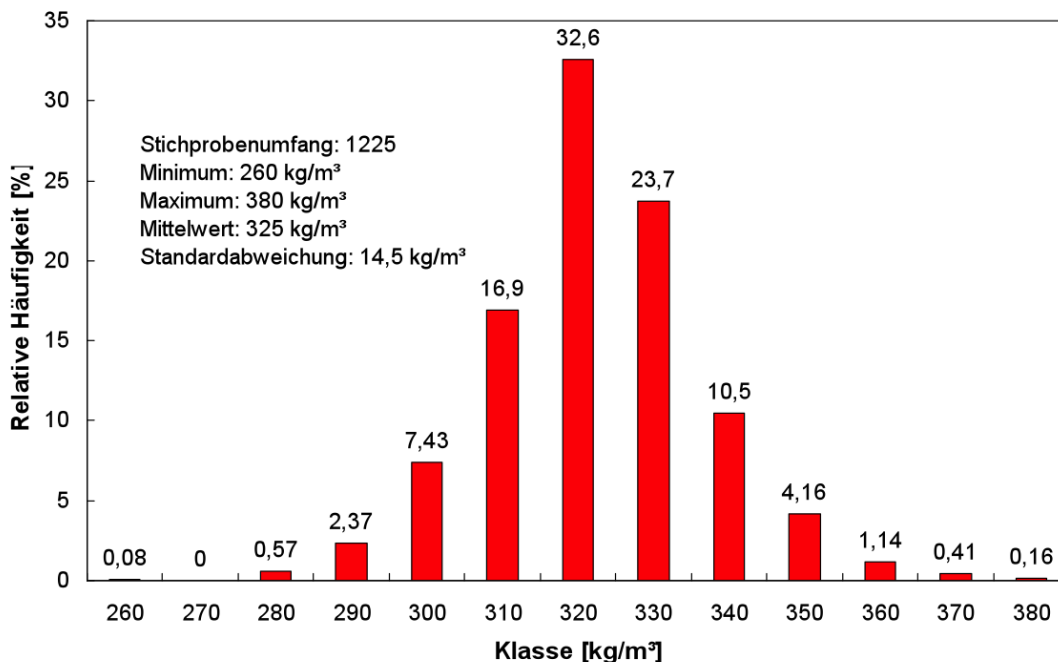


Bild 84: Histogramm

Man geht in der Regel davon aus, dass die Häufigkeitsverteilung der Kennwerte einer "Normalverteilung" entspricht (Bild 84). Der Mittelwert $\bar{x}$ errechnet sich zu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

wobei n die Anzahl der Werte x bedeutet.

Die Streubreite kann angegeben werden als

- die Standardabweichung s der Zufallsstichproben

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2}{n-1}}$$

- oder als die Standardabweichung σ der Grundgesamtheit, die aus langfristigen Bestimmungen bekannt sein muss.

Eine dimensionslose Maßzahl ist der Variationskoeffizient. Er berücksichtigt, dass eine kleine Streuung bei kleinem Mittelwert von gleichem Gewicht ist, wie eine große Streuung bei großem Mittelwert:

- Variationskoeffizient v_x $v_x = \frac{s}{\bar{x}}$

In vielen Baustoffnormen werden Güteanforderungen (z. B. Mindestfestigkeiten) mit p-Fraktilenwerten (Ausfallwahrscheinlichkeit) angegeben (z. B. $x_{5\%}$ - Fraktile oder neuerdings 5 % Quantil). Dies bedeutet, dass bei einer großen Anzahl von Güteprüfungen 5 % aller geprüften Probekörper den Fraktilenwert unterschreiten dürfen.

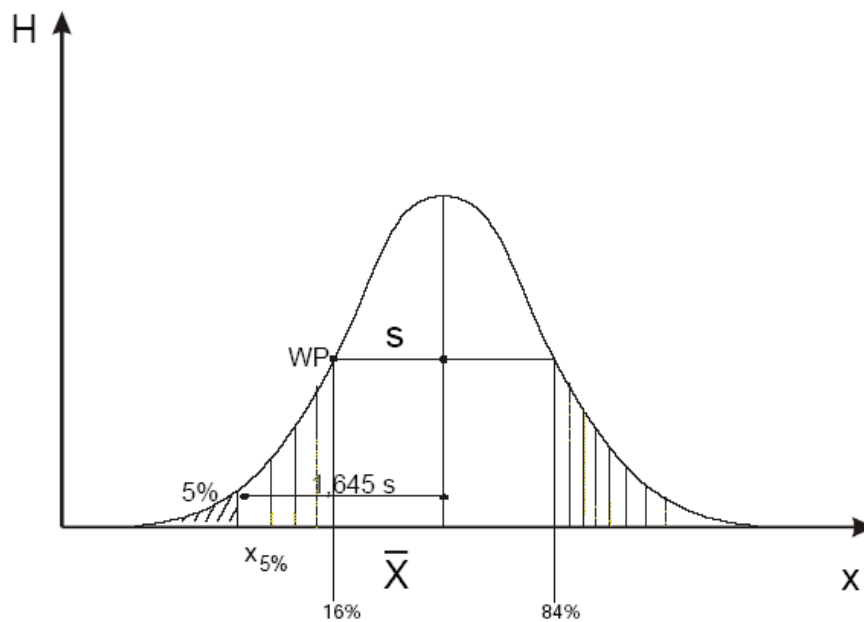


Bild 85: Normalverteilung

Die Standardabweichung s gibt einen Anhalt dafür, wie wahrscheinlich ein bestimmter Kennwert erreicht wird.

Bei gleichem Mittelwert $\bar{x}$ können verschiedene Standardabweichungen auftreten.

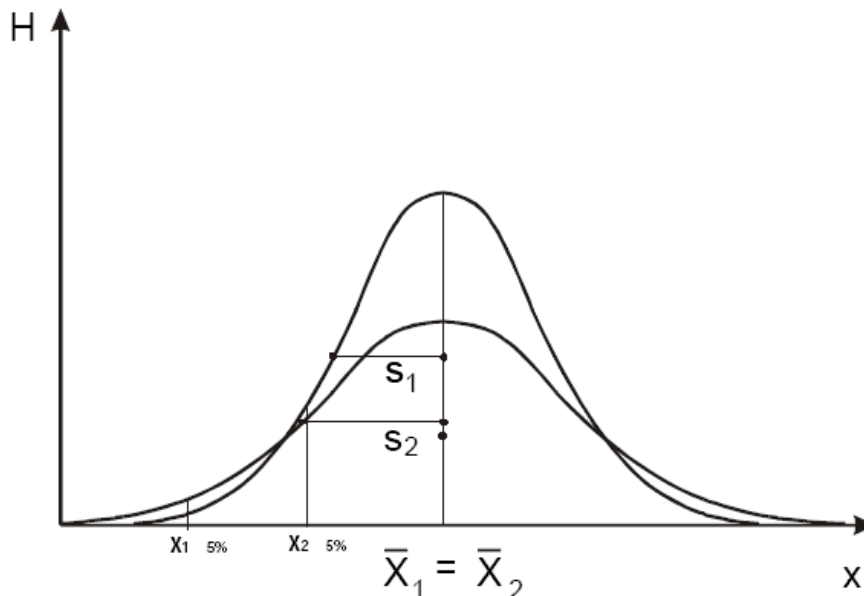


Bild 86: Normalverteilungen mit verschiedenen Standardabweichungen bei gleichem Mittelwert

So werden z. B. bei Festigkeitsprüfungen von Baustellenbetonen größere Streubreiten erreicht als bei Prüfungen von Laborbetonen. Stoffe mit geringerer Streubreite der geprüften Eigenschaft sind bei gleichem Mittelwert qualitativ besser.

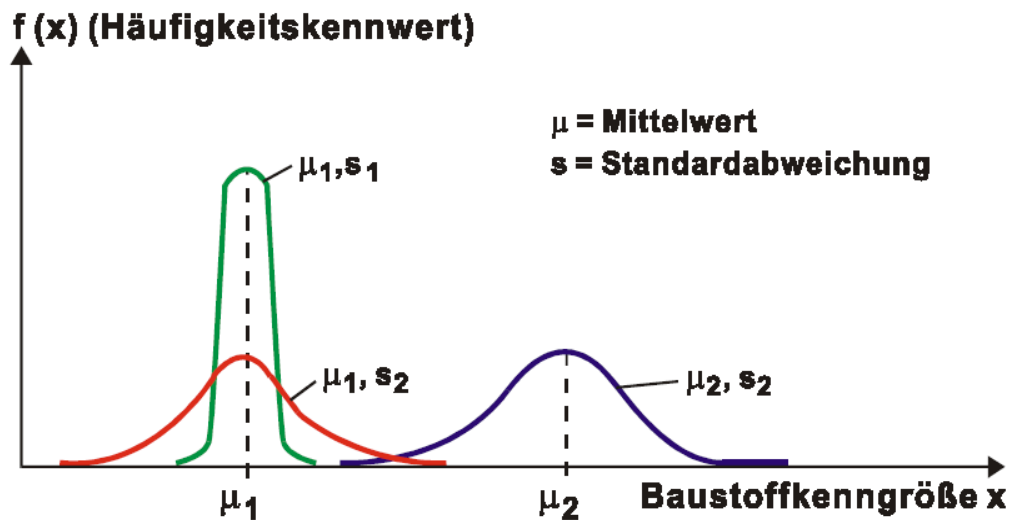


Bild 87: Verteilung mit gleichem Lage- oder Streumaß

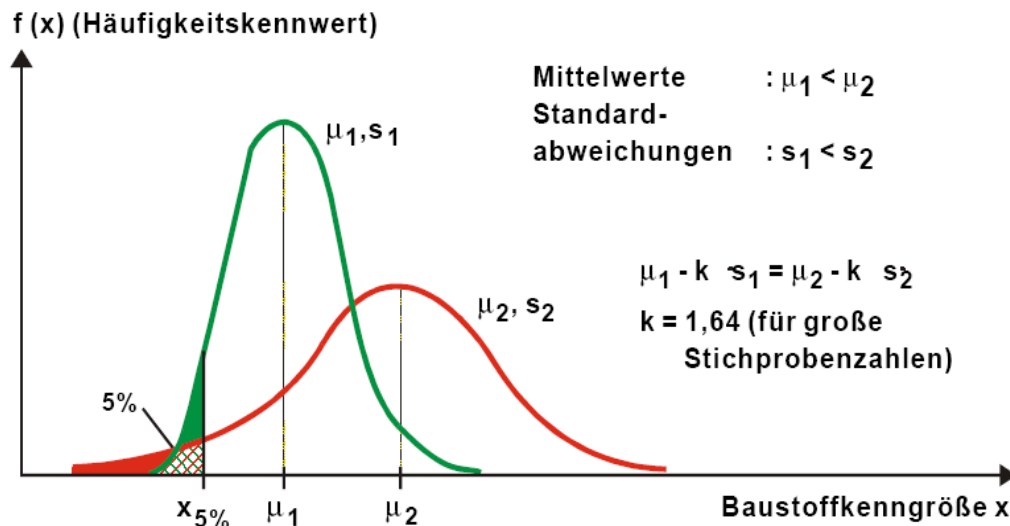


Bild 88: Zwei Grundgesamtheiten

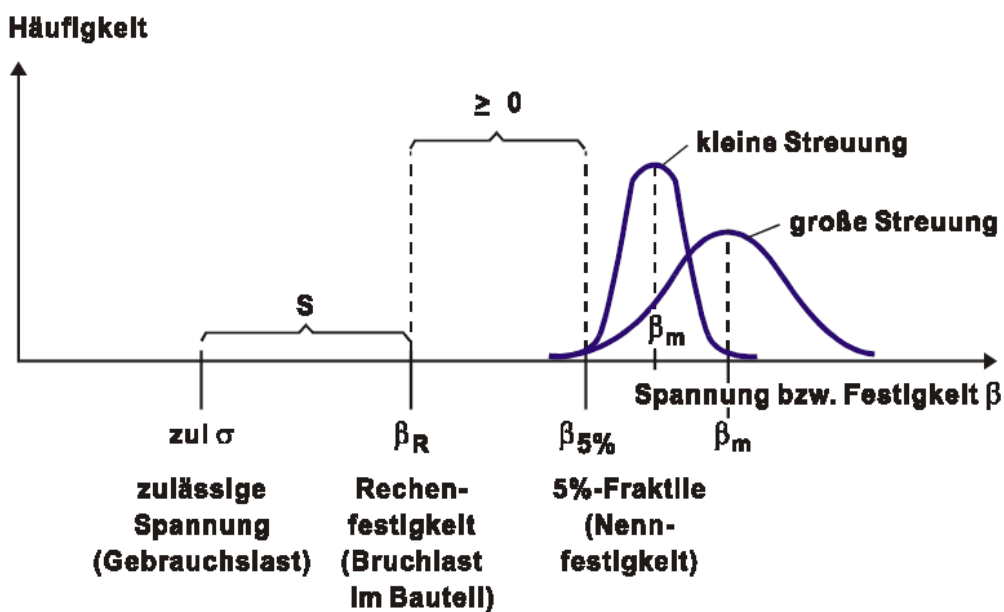


Bild 89: Schema einer Sicherheitsbetrachtung

13 Literatur

- Lit 1: Budelmann, H.: Werkstoffverhalten Vorlesungsskript Technische Universität Braunschweig, 2003
- Lit 2: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): ZTV-ING (Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten). Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056, Verkehrsblatt-Verlag, Vers. 01/03, 2003
- Lit 3: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): www.dibt.de. Homepage, 2010
- Lit 4: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Erarbeitung harmonisierter Normen nach der Richtlinie des Rates vom 21.12.1988 über Bauprodukte 89/106/EWG (Bauproduktenrichtlinie) und ihre Umsetzung in das nationale Regelwerk, Januar 2004
- Lit 5: DIN 1080, Teil 1: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauwesen - Grundlagen, Juni 1976
- Lit 6: DIN 1080, Teil 3: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauwesen – Beton- und Stahlbetonbau, Spannbetonbau, Mauerwerksbau, März 1980
- Lit 7: DIN 1080, Teil 4: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauwesen – Stahlbau, Stahlverbundbau und Stahlträger im Beton, März 1980
- Lit 8: DIN 4102-1: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen. Teil 1: Baustoffe - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen, Mai 1998
- Lit 9: DIN 4108-2: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, April 2003
- Lit 10: DIN EN 12524: Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte, Juli 2000
- Lit 11: DIN EN 13501-1: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten, Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, Januar 2010
- Lit 12: DIN EN 13501-2: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten, Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen, Dezember 2003
- Lit 13: DIN EN ISO 6946: Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient. Berechnungsverfahren, Oktober 2003
- Lit 14: DIN EN ISO 7345: Wärmeschutz. Physikalische Größen und Definitionen, Januar 1996
- Lit 15: DIN V 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte, Februar 2002
- Lit 16: Kordina, K.; Meyer-Ottens, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. 2. Auflage, Verlag Bau + Technik VBT, 1999
- Lit 17: Müller, H. S.: Baustofftechnologie Teil 1. Vorlesungsskript Universität Karlsruhe, 2000
- Lit 18: Musterbauordnung – MBO – Fassung November 2002
- Lit 19: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren: Zustimmungen im Einzelfall. <http://www.stmi.bayern.de/bauen/baurecht/bautechnik>, 2005

- Lit 20: Rostásy, F. S.: Baustoffe. Verlag W. Kohlhammer, 1983
- Lit 21: Schießl, P.: Baustoffe - Allgemeine Grundlagen. Vorlesungsskript Technische Universität München, 2002
- Lit 22: Schneider, K.-J.: Bautabellen für Ingenieure. Werner-Verlag, 16. Auflage, 2004
- Lit 23: Wikipedia: Freie Online-Enzyklopädie. www.Wikipedia.org