

Universität der Bundeswehr München

Institut für **Werkstoffe**
des Bauwesens

Bauchemie und Werkstoffe des
Bauwesens

Allgemeine Grundlagen -
Stoffkennwerte

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

Herbsttrimester 2020

Inhaltsverzeichnis

	1
1 Einleitung	6
1.1 Einteilung der Baustoffe	6
1.2 Anforderungen und Eigenschaften von Baustoffen	6
1.3 Geschichtliche Entwicklung [2]	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 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen [6]	14
2.3.5 Notifizierten Stellen [6]	17
2.3.6 Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit	17
3 Masseinheiten und Formelzeichen	20
4 Masse, Dichte und Porosität	26
4.1 Masse	26
4.2 Dichten	26
4.2.1 Dichte	26
4.2.2 Rohdichte	26
4.2.3 Die Schüttdichte	26
4.3 Porosität	27
5 Verhalten poröser Feststoffe gegenüber Feuchtigkeit	30
5.1 Allgemeines	30
5.2 Wassergehalt, Feuchtegehalt	31

5.3	Mechanismen des Feuchtetransports in porösen Stoffen	32
5.3.1	Permeation (Durchlässigkeit)	32
5.3.2	Kapillare Wasseraufnahme	34
5.4	Sättigungswert	37
5.5	Luftfeuchte	37
5.6	Hygroskopie, Wasserdampfsorption	40
5.6.1	Hygroskopie	40
5.6.2	Wasserdampfsorption	40
5.7	Wasserdampfdiffusion	42
5.8	Tauwasserbildung	46
5.9	Wasserabgabe	46
6	Bauphysikalische Eigenschaften	47
6.1	Verhalten gegenüber Wärme und Kälte	47
6.1.1	Einleitung	47
6.1.2	Wärmetechnische Größen	47
6.1.3	Thermische Eigenschaften	48
6.1.4	Arten der Wärmeübertragung	49
6.2	Schall	57
6.3	Brandverhalten	58
6.3.1	Brandtechnische Bedeutung	58
6.3.2	Brandentstehung und Brandverlauf	59
6.3.3	Brandverhalten von Baustoffen	60
6.3.4	Brandverhalten von Bauteilen	61
7	Formänderung	64
7.1	Einteilung der Formänderungen	64
7.2	Lastunabhängige Formänderungen	64
7.2.1	Temperaturdehnung (Wärmedehnung)	64

7.2.2	Schwinden und Quellen	65
7.2.3	Schrumpfen und Treiben	65
7.3	Formänderung durch Belastung	66
7.3.1	Allgemeines	66
7.3.2	Elastisches Verhalten	68
7.3.3	Plastisches Verhalten	70
7.3.4	Viskoses Verhalten	73
8	Festigkeit	80
8.1	Allgemeines	80
8.2	Prüfung der Kurzzeitfestigkeiten	82
8.2.1	Druckfestigkeit	83
8.2.2	Zugfestigkeit	84
8.2.3	Spaltzugfestigkeit	84
8.2.4	Biegefestigkeit	85
8.2.5	Haftfestigkeit	85
8.2.6	Scherfestigkeit	86
8.2.7	Torsionsfestigkeit	86
8.2.8	Schlagfestigkeit	86
8.3	Festigkeit unter statischer Langzeitbeanspruchung (Dauerstandfestigkeit)	87
8.4	Festigkeit bei dynamischer Beanspruchung (Ermüdungsfestigkeit)	87
8.5	Verschleißfestigkeit	89
8.6	Härte	90
9	Beständigkeit	92
9.1	Witterungsbeständigkeit	92
9.2	Frostwiderstand	92
9.3	Zerstörung durch Kristallisationsdruck	92
9.4	Alterung	92

9.5	Chemische Beständigkeit (Korrosionsverhalten)	93
10	Kraft- und Wegmessung	94
10.1	Allgemeines	94
10.2	Messung einer Längenänderung	95
10.2.1	Mechanische Messuhr	95
10.2.2	Induktive Wegaufnehmer	96
10.2.3	Dehnmessstreifen	96
10.3	Kraftmessung	97
10.3.1	Elektrische Öldruckgeber	97
10.3.2	Kraftmessdosen	98
11	Materialprüfung	99
11.1	Erfordernis	99
11.2	Arten der Prüfungen	99
11.3	Anforderungen an Prüfverfahren	99
11.4	Beurteilung von Prüfergebnissen	99
11.5	Bewertung von Produkten nach Prüfzeugnissen	99
12	Auswertung von Messergebnissen	101
13	Literatur	104

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.

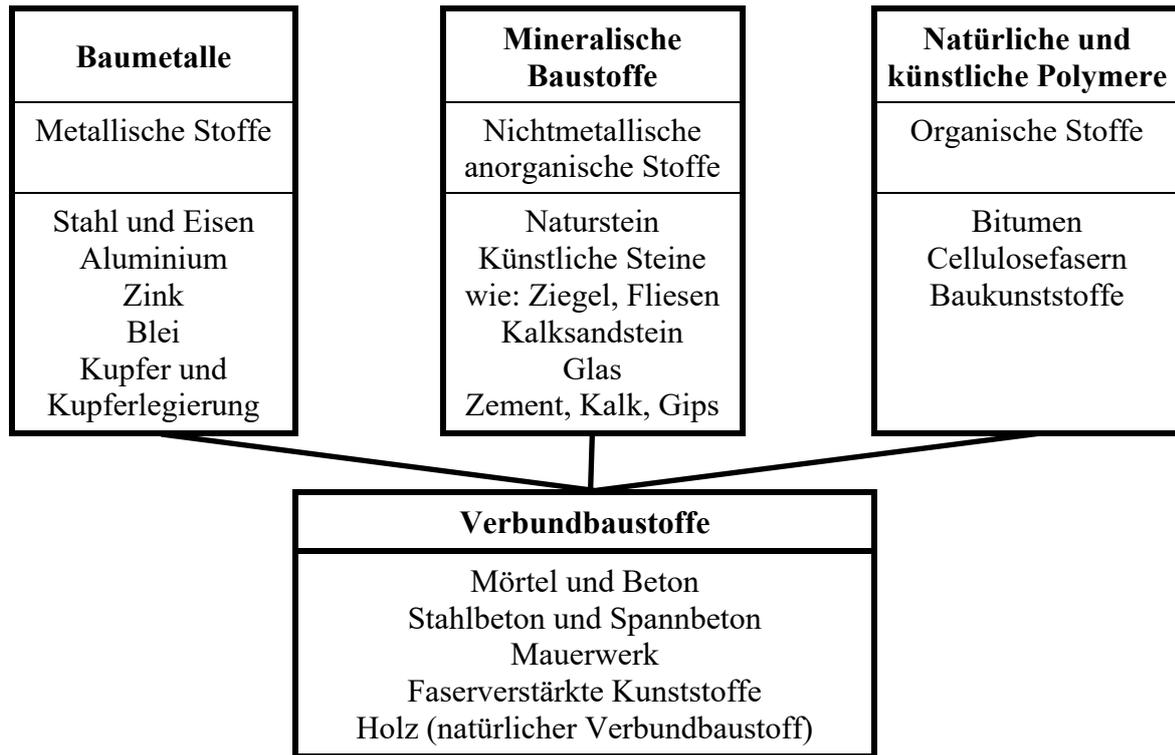


Bild 1: Baustoffgruppen

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 [1]

Anforderungen	Eigenschaften					
Technische Einsetzbarkeit	Mechanisches Verhalten Festigkeit, Härte Elastizität Zähigkeit Temperaturbeständigkeit Verschleißwiderstand					
	Feuerwiderstand Entflammbarkeit Brennbarkeit Toxizität Hochtemperaturverhalten					
	Physikalisch-chemisches Verhalten Dichte <table style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">wärmetechnisches</td> <td rowspan="4" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">}</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle;">Verhalten</td> </tr> <tr> <td>feuchtetechnisches</td> </tr> <tr> <td>schalltechnisches</td> </tr> <tr> <td>lichttechnisches</td> </tr> </table> Korrosionsbeständigkeit elektrisches und magnetisches Verhalten	wärmetechnisches	}	Verhalten	feuchtetechnisches	schalltechnisches
wärmetechnisches	}	Verhalten				
feuchtetechnisches						
schalltechnisches						
lichttechnisches						
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 [2]

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 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 (Tone, 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 hauptsächlichsten 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 [3].
- Der [Stand der Technik](#) beschreibt technische Möglichkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt, die auf entsprechenden gesicherten Erkenntnissen von Wissenschaft, Technik und Erfahrung basieren [4].
- Der [Stand von Wissenschaft und Technik](#) ist die dritte und höchste Stufe der Leistungsskala. Damit werden technische Spitzenleistungen umschrieben, die wissenschaftlich gesichert sind [5].

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)** [6]. 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 gefährdet werden [6]. 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 Baubestimmungen werden vom **Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt)** veröffentlicht. Dazu gehören Landesbauordnungen, Musterbauordnung und die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB). 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.

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)** [7] 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: Bemessung und Konstruktion, Juli 2001 [8]. 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 aktuell (2020) für 34000 Normen zuständig sind. Zur besseren Übersicht werden die Normen einzelner Sachgebiete in DIN-Taschenbüchern zusammengefasst. Das DIN-Taschenbuch 56

„Materialprüfnormen 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 [9], 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 **Europäische Bauproduktenverordnung (BauPVO)**. Sie stellt sieben **wesentliche Anforderungen** an die Brauchbarkeit eines Bauproduktes:

- mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
- Brandschutz,
- Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
- Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung,
- 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 Bauproduktenverordnung 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.

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 [9]. 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 [9]. 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 **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) Abschnitt D** (Kapitel 2.3.4) bekannt gemacht wurden [10]. 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 Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen [6]

Die Musterbauordnung (MBO) fordert, die allgemeinen Anforderungen an bauliche Anlagen, Bauprodukte und andere Anlagen und Einrichtungen durch Technische Baubestimmungen in einer Verwaltungsvorschrift zu konkretisieren. Dazu werden detaillierte Vorgaben gemacht, zu welchen bauaufsichtlichen Anforderungen Konkretisierungen vorgenommen werden können. Diese können durch Bezugnahme auf technische Regeln und deren Fundstellen oder auf andere Weise erfolgen:

- die Planung, Bemessung und Ausführung baulicher Anlagen und ihrer Teile,
- Merkmale und Leistungen von Bauprodukten in bestimmten baulichen Anlagen oder ihren Teilen,
- Verfahren für die Feststellung der Leistung eines Bauproduktes, das nicht das CE-Zeichen nach Bauproduktenverordnung trägt,
- zulässige und unzulässige besondere Verwendungszwecke für Bauprodukte,
- Festlegungen von Klassen und Stufen, die Bauprodukte für bestimmte Verwendungszwecke aufweisen sollen,
- Voraussetzungen für die Abgabe der Übereinstimmungserklärung für nicht harmonisierte Produkte,
- Angaben zu nicht harmonisierten Bauprodukten sowie zu Bauarten, die eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses bedürfen sowie

- Art, Inhalt und Form der technischen Dokumentation.

In die **Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)** werden grundsätzlich nur solche Inhalte als Technische Baubestimmungen aufgenommen, die zur Erfüllung der Anforderungen der Bauordnungen an bauliche Anlagen, Bauprodukte und andere Anlagen und Einrichtungen unerlässlich sind. Die Bauaufsichtsbehörden können jedoch im Rahmen ihrer Entscheidungen zur Ausfüllung unbestimmter Rechtsbegriffe auch auf allgemein anerkannte Regeln der Technik zurückgreifen, die keine Technischen Baubestimmungen sind.

Das Deutsche Institut für Bautechnik veröffentlicht nach Anhörung der beteiligten Kreise im Einvernehmen mit den obersten Bauaufsichtsbehörden die Technischen Baubestimmungen als Muster-Verwaltungsvorschrift. Für eine unmittelbare Geltung ist die öffentliche Bekanntmachung der Verwaltungsvorschrift erforderlich.

2.3.4.1 Struktur und Gliederung der MVV TB

Die Technischen Baubestimmungen bestehen aus vier Teilen:

- A (Technische Baubestimmungen, die bei der Erfüllung der Grundanforderungen an Bauwerke zu beachten sind). Der Teil A gliedert sich nach den Grundanforderungen für Bauwerke gem. Anhang I der EU-BauPVO wie folgt:
 - A 1 - Mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
 - A 2 - Brandschutz,
 - A 3 - Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
 - A 4 - Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung,
 - A 5 - Schallschutz und
 - A 6 - Wärmeschutz.
- B Technische Baubestimmungen für Bauteile und Sonderkonstruktionen, die zusätzlich zu den in Teil A aufgeführten Technischen Baubestimmungen zu beachten sind
- C Technische Baubestimmungen für Bauprodukte, die nicht die CE-Kennzeichnung tragen, und für Bauarten
- D Bauprodukte, die keines Verwendbarkeitsnachweises bedürfen

2.3.4.1.1 Wesentliche Inhalte der Kapitel in Teil A

Kapitel A 1 – Mechanische Festigkeit und Standsicherheit - die Eurocodes zu den Grundlagen für die Tragwerksplanung, zu den Einwirkungen auf Bauwerke sowie zur Bemessung. Aus deren Anwendung ergibt sich, welche Merkmale und konkreten Leistungen die verwendeten Produkte am Bauwerk zur Erfüllung der bauwerksbezogenen Anforderungen ausweisen müssen.

Kapitel A 2 – Brandschutz – konkretisiert die in der Musterbauordnung und in den Muster-Sonderbauverordnungen und -vorschriften enthaltenen brandschutztechnischen Anforderungen an bauliche Anlagen oder Teile baulicher Anlagen insbesondere im Hinblick auf das Brandverhalten und den Feuerwiderstand.

Kapitel A 3 – Hygiene, Gesundheit- und Umweltschutz –konkretisiert die Anforderungen an bauliche Anlagen in Form der technischen Regeln "Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich des Gesundheitsschutzes" (ABG) sowie "Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer" (ABuG).

2.3.4.1.2 Wesentliche Inhalte der Kapitel in Teil B

Teil B betrifft Sonderkonstruktionen und besondere Bauteile, die einerseits den Anforderungen von Teil A nicht eindeutig zugeordnet werden können und andererseits teilweise einen anderen Rechtshintergrund haben und daher zusätzlich zu den in Abschnitt A aufgeführten Technischen Baubestimmungen beachtet werden müssen. Die hier für bestimmte Sonderkonstruktionen und Bauteile aufgeführten technischen Regeln dienen der Konkretisierung mehrerer Grundanforderungen und sind materialübergreifend.

Kapitel B 2 beinhaltet technische Regeln für Sonderkonstruktionen und Bauteile im Hinblick auf deren Planung, Bemessung und Ausführung.

Kapitel B 3 bezieht sich auf technische Gebäudeausrüstungen und Teile von Anlagen zum Lagern, Abfüllen und Umschlagen von wassergefährdenden Stoffen, die anderen Harmonisierungsrechtsvorschriften (z.B. Maschinenrichtlinie, Niederspannungsrichtlinie, Druckgeräterichtlinie) unterliegen, aber hinsichtlich eines bestimmten Verwendungszwecks Grundanforderungen nach Artikel 3 Absatz 1 der BauPVO an bauliche Anlagen und ihre Teile nicht erfüllen. Für diese Produkte ist zum Nachweis der fehlenden Wesentlichen Merkmale ein Verwendbarkeitsnachweis erforderlich, sofern nicht festgelegt wurde, dass eine Übereinstimmungserklärung zu den fehlenden Wesentlichen Merkmalen nach § 22 MBO₁ aufgrund vorheriger Prüfung der Bauprodukte durch eine hierfür bauaufsichtlich anerkannte Prüfstelle ausreichend ist.

Kapitel B 4 beinhaltet Technische Anforderungen für Bauprodukte und Bauarten, die Anforderungen nach anderen Rechtsvorschriften unterliegen, für die nach § 85 Abs. 4a MBO₁ eine Rechtsverordnung erlassen wurde. Dabei handelt es sich um Technische Anforderungen an ortsfest verwendete Anlagen und Anlagenteile in Lager-, Abfüll- und Umschlaganlagen (LAU-Anlagen) zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sowie an den Einbau, Betrieb und die Wartung von Anlagen mit Bauprodukten zur Abwasserbehandlung.

2.3.4.1.3 Teil C - Technische Baubestimmungen für Bauprodukte, die nicht die CE-Kennzeichnung tragen, und für Bauarten

Teil C bestimmt die Angaben zu nicht harmonisierten Bauprodukten sowie zu Bauarten, die nur eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses bedürfen sowie die Anforderungen zur Abgabe der Übereinstimmungserklärung für ein Bauprodukt nach § 22 MBO₁. Er gilt daher nicht für Bauprodukte, für die eine harmonisierte Norm oder eine Europäische Technische Bewertung (ETA) im Geltungsbereich der EU-BauPVO vorliegt.

In Kapitel C 2 sind die technischen Regeln sowie die Anforderungen an die Übereinstimmungsbestätigung für nicht harmonisierte Bauprodukte bestimmt.

Kapitel C 3 führt Bauprodukte auf, die lediglich eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses bedürfen. An dieser Stelle sind auch die jeweils anerkannten Prüfverfahren und die Art der erforderlichen Übereinstimmungsbestätigung aufgeführt.

In Kapitel C 4 sind die Bauarten ausgewiesen, die lediglich eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses bedürfen. Auch hier sind die anerkannten Prüfverfahren jeweils aufgelistet.

Sofern von der maßgebenden technischen Regel abgewichen wird, ist für Bauprodukte eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall und für Bauarten eine allgemeine oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erforderlich.

Bei Bauprodukten und Bauarten, die (nur) eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses bedürfen, wird das Vorliegen einer maßgebenden Prüfnorm zwingend vorausgesetzt. Dabei können auch weitere technische Bestimmungen, die für die Erteilung des abP erforderlich sind, angegeben werden. Dazu gehören z.B. ergänzende Angaben zu Prüfumfang, Prüfaufbau, Prüfhäufigkeit.

2.3.4.1.4 Wesentliche Inhalte der Kapitel in Teil D

Teil D enthält die nach § 17 Absatz 3 MBO₁ vorgesehene Liste von Bauprodukten, welche keines Verwendbarkeitsnachweises bedürfen. Hierunter fallen Bauprodukte, für die es allgemein anerkannte Regeln der Technik gibt, jedoch auf Verwendbarkeitsnachweise verzichtet wird sowie Bauprodukte, für die es weder Technische Baubestimmungen noch allgemein anerkannte Regeln der Technik gibt und die bauordnungsrechtlich von untergeordneter Bedeutung sind. Die Liste hat klarstellenden Charakter und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Im Kapitel D 3 wird ein Weg aufgezeigt, wie mit lückenhaften und unvollständigen harmonisierten Spezifikationen umgegangen werden kann. Für den Vollzug sind die Länder zuständig.

2.3.5 Notifizierten Stellen [6]

Die EU-Bauprodukteverordnung verlangt häufig, dass für Zertifizierungen und Prüfungen **notifizierten Stellen** (notified Bodies) eingesetzt werden. Gegebenenfalls ist dann in der "Leistungserklärung" der Name und die Kennnummer und hinter der CE-Kennzeichnung die Kennnummer der notifizierten Stelle anzugeben. Im Rahmen der BauPVO können die Funktionen Produktzertifizierungsstelle, Zertifizierungsstelle für die werkseigene Produktkontrolle und Prüflabor notifiziert werden.

Als unparteiische Drittstellen führen notifizierten Stellen 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 notifizierten 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 dem Bauproduktengesetz sind zirka 150 Stellen anerkannt und notifiziert, d.h. sie wurden der EU-Kommission und den anderen Mitgliedstaaten der EU mitgeteilt.

2.3.6 Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit

Die Europäische Bauproduktenverordnung sieht als alleinige Grundlage für die CE-Kennzeichnung (Bild 2, links) 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 Verwendbarkeit der geregelten und der nicht geregelten Bauprodukte wird in einem für sie geforderten **Konformitätsnachweis** (= Übereinstimmungsnachweis) bestätigt. Das fürher

übliche **Übereinstimmungszeichen Ü** (Bild 2, rechts) tragen nur noch nicht harmonisierte Produkte.

ÜZ schließlich erfordert ein Übereinstimmungszertifikat durch eine anerkannte 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: CE-Zeichen (links) und Ü-Zeichen (rechts)

Zertifizierungsstelle. Voraussetzung ist wie bei den anderen Übereinstimmungsnachweisen, eine werkseigene Produktionskontrolle und in diesem Fall zusätzlich eine regelmäßige Fremdüberwachung.

Die Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit (**Assessment and Verification of Constancy of Performance, AVCP**) ist die Voraussetzung für die Erstellung einer Leistungserklärung. Dies muss jeder Hersteller für jedes Produkt erstellen. Für europäische Normen wird das geforderte Niveau der Leistungsbeständigkeit 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 2).

Tabelle 2: Zuordnung der Zahlenschlüssel der Bauproduktenverordnung (BauPVO) zum System der Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit von Bauprodukten [11]

Elemente der Bewertung und Überprüfung der Leistungsbeständigkeit	Systeme nach BauPVO Anhang V				
	1+	1	2+	3	4
Werkseigene Produktionskontrolle ggf. Prüfung von im Werk entnommenen Proben nach festgelegtem Prüfplan					
Erstinspektion des Werkes und der werkseigenen Produktionskontrolle	Z	Z	Z WPK		

Laufende Überwachung, Beurteilung und Anerkennung der werkseigenen Produktionskontrolle	Z	Z	Z WPK		
Bewertung der Leistungen des Bauproduktes anhand einer Prüfung, einer Berechnung, von Werttabellen oder Unterlagen zur Produktbeschreibung	Z	Z		P	
Stichprobenprüfung ('audit-testing') von im Werk, auf dem offenen Markt oder auf der Baustelle entnommenen Proben	Z				

3 Masseinheiten und Formelzeichen

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

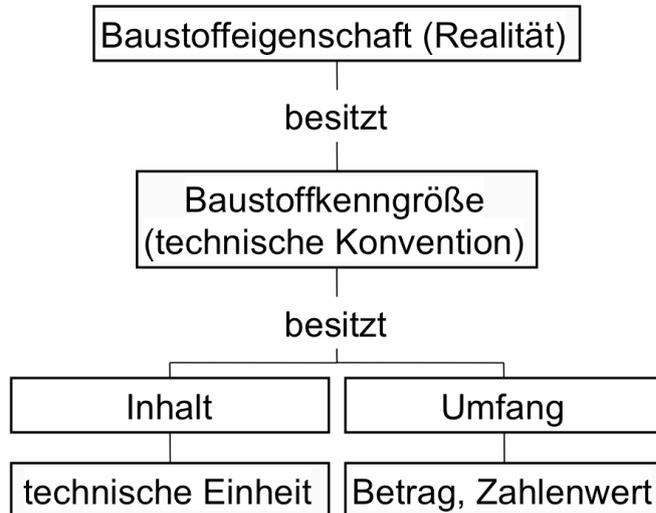


Bild 3: Technische Abbildung von Baustoffeigenschaften

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 3). Aus den 7 Basisgrößen lassen sich weitere Einheiten ableiten (siehe Tabelle 4). Die SI-Basiseinheiten werden durch Vorsätze (Präfixe) in 10er Potenzschritten vergrößert bzw. verkleinert angegeben (siehe Tabelle 5). Im Bauingenieurwesen gebräuchliche Einheiten sind in Tabelle 6 als Ausschnitt wiedergegeben.

Tabelle 3: 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 Leistung 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 Bautabellen zu finden. Im Internet stehen zahlreiche Einheitenumrechner kostenlos zur Verfügung (z. B.: <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units.html>).

Tabelle 4: 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 5: 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 6: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen (Auszug)

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 1 min = 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 Celsius-temperaturen 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 Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen festgelegt. In Tabelle 7 bis Tabelle 9 sind Formelzeichen angegeben, die im Rahmen der Europäischen Harmonisierung europaweit die bisherigen Formelzeichen ersetzen.

Tabelle 7: Bedeutung lateinischer Buchstaben als Hauptzeichen

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 8: Bedeutung griechischer Kleinbuchstaben als Hauptzeichen

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 9: Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen (Auszug), Beton- und Stahlbetonbau, Spannbetonbau, Mauerwerksbau, Stahlbau, Stahlverbundbau und Stahlträger in Beton

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	kg/m ³	F	
g	Gesteinskörnungsgehalt	kg/m ³	g	
h	Feuchtegehalt	kg/m ³		z. B. Wassergehalt der Gesteinskörnung
k	Mehlkorn	kg/m ³		
n	Verhältnis von Elastizitätsmoduln	-	n	z. B. n = E _s /E _b
p	Luftgehalt	Vol. - %	p	
w	Wassergehalt	kg/m ³	W	Gesamtwassergehalt des Frischbetons
z	Zementgehalt	kg/m ³	Z	
w/z	Wasser-Zement-Wert	-	ω	$\omega = w/z$

4 Masse, Dichte und Porosität

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 10 enthält Angaben zu den verschiedenen Dichten für ausgewählte Konstruktionsbaustoffe.

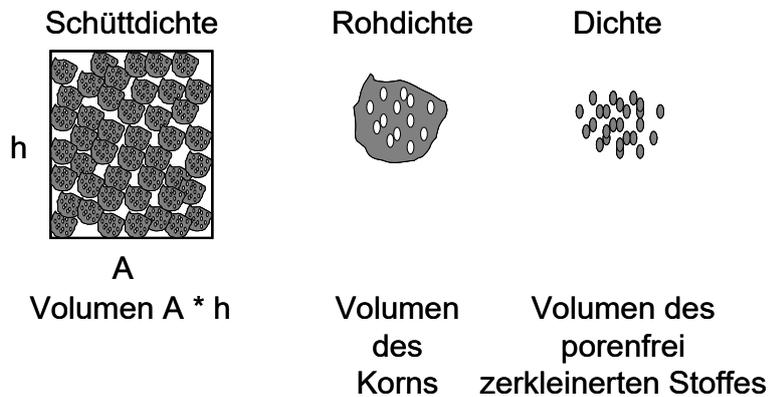


Bild 4: Volumen für die Bestimmung der verschiedenen Dichten

Tabelle 10: 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.

Druck lässt sich die Porenverteilung errechnen. In Bild 7 ist exemplarisch das Ergebnis für Porenbeton, Blähtonkorn und Keramik dargestellt.

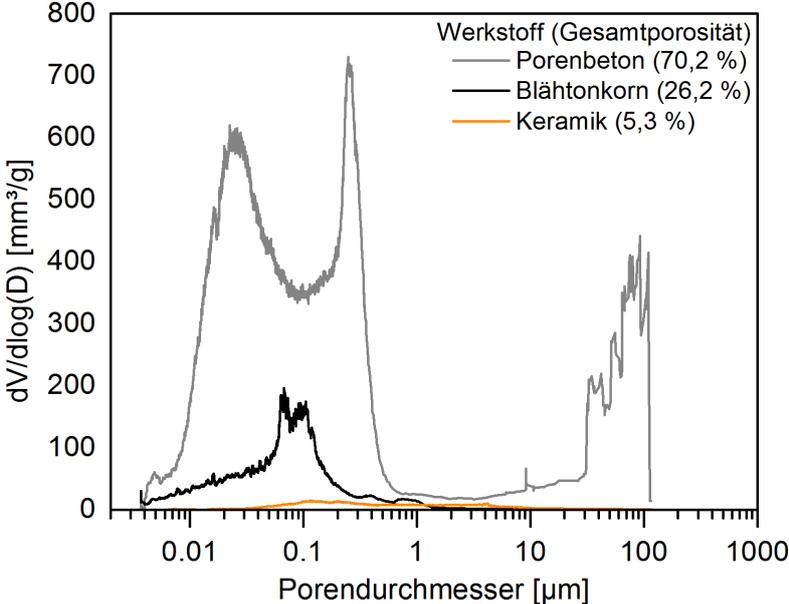


Bild 7: Porendurchmesserverteilung

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.

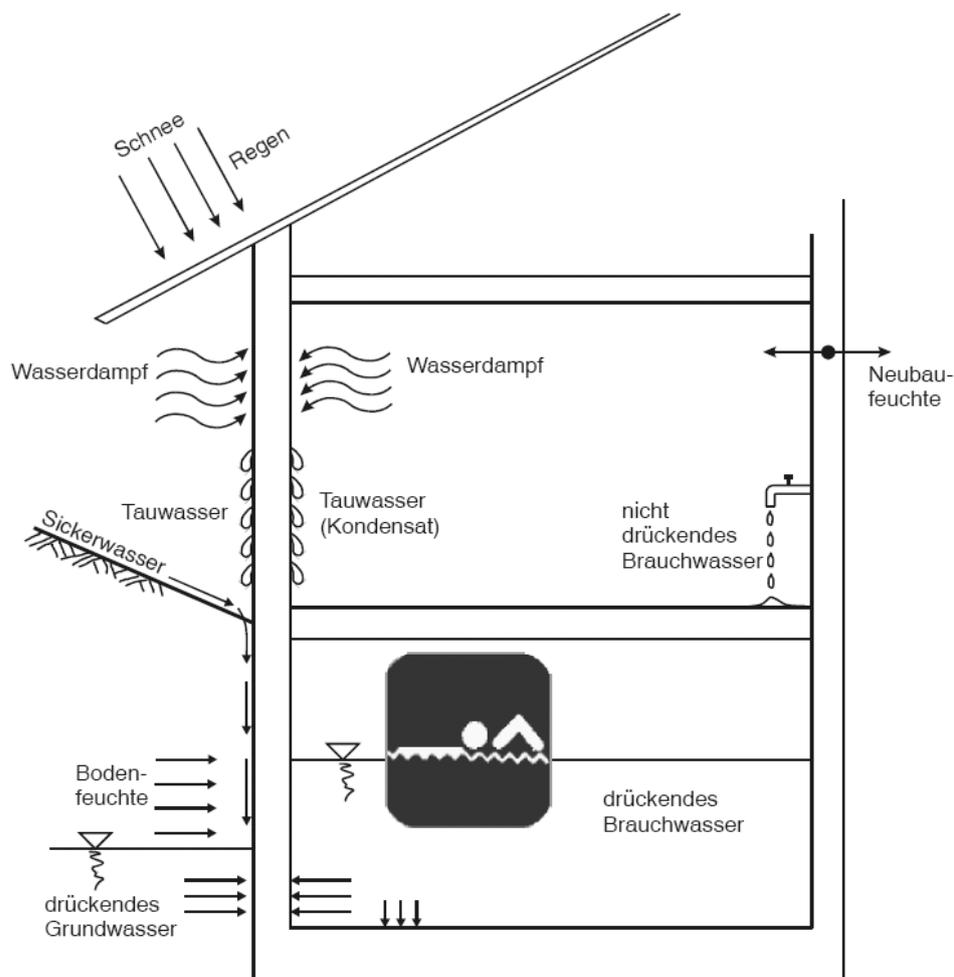


Bild 8: Mögliche Arten des auf Bauwerke einwirkenden Wassers

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:

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

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 $\rho = \frac{m_{tr}}{V}$, 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 Feuchteausgleich 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).

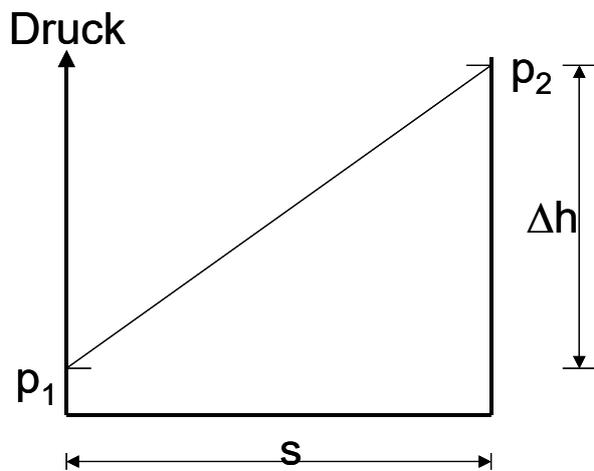
Die Wasserdurchlässigkeit ist um so geringer, je kleiner die Porenradien sind. Deshalb ist guter Beton praktisch wasserundurchlässig, obwohl der erhärtete Zement einen hohen Porenanteil hat, denn die Poren sind außerordentlich klein (bei niedrigen Wasserzementwerten überwiegend Gelporen mit einem Durchmesser 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 Querschnittsfläche, bezogen auf die Zeit [m³/(s · m²)], 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.



$$I = \frac{Q}{t \cdot A} = k_w \cdot \frac{\Delta h}{s}$$

mit I = Durchflussmenge in der Zeit t durch den Querschnitt A

$[m/s]$
 Q = Volumen des durchströmenden Stoffes $[m^3]$

t = Zeit $[t]$

A = durchströmter Querschnitt

$[m^2]$

Δh = $p_2 - p_1$ = Druck $[m \text{ Ws}]$

s = Dicke des durchströmten Bauteils $[m]$

Bau

k_w = Permeabilitätskoeffizient für Flüssigkeiten $[m/s]$

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 $[N/mm^2]$

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

η = Viskosität des Gases $[Ns/m^2]$

k_g = spezifischer Permeabilitätskoeffizient $[m^2]$

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

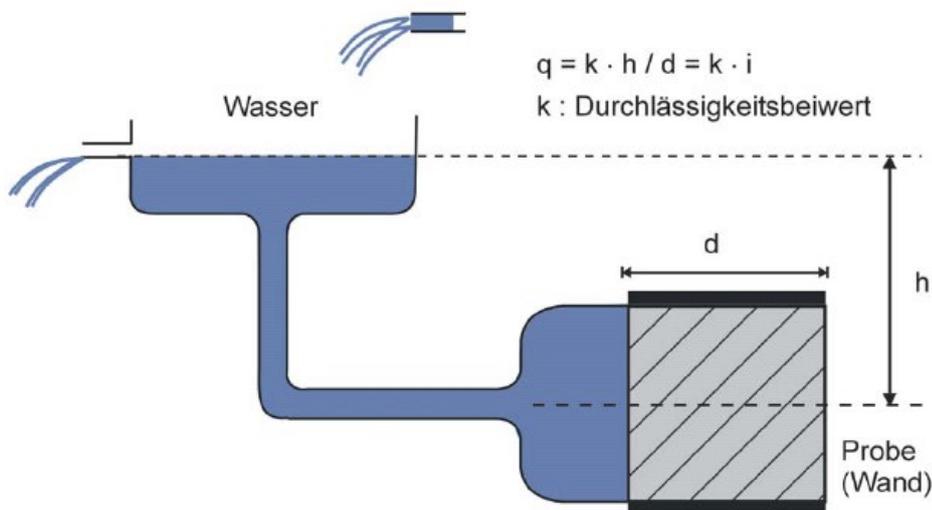


Bild 10: Prüfung der Wasserundurchlässigkeit, schematisch

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

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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 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**.

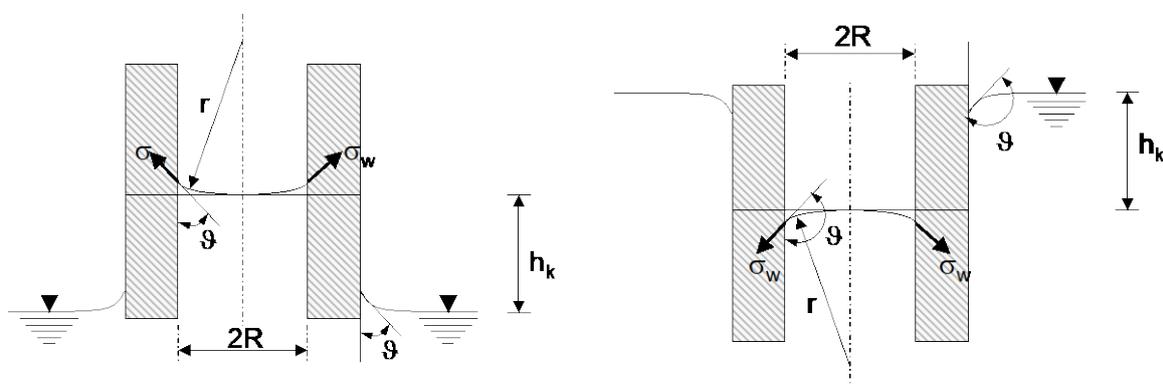


Bild 11: Ausbildung des Meniskus in einem hydrophilen Baustoff (links) und in einem hydrophoben Baustoff (rechts)

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.

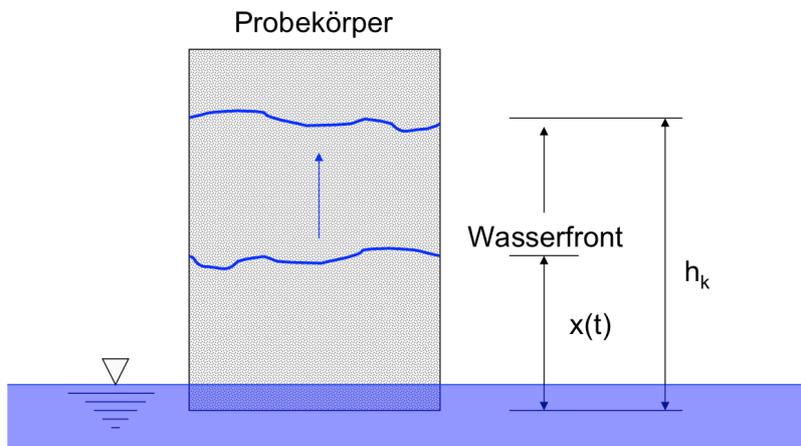


Bild 12: Prüfung der kapillaren Steighöhe poröser Stoffe

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.

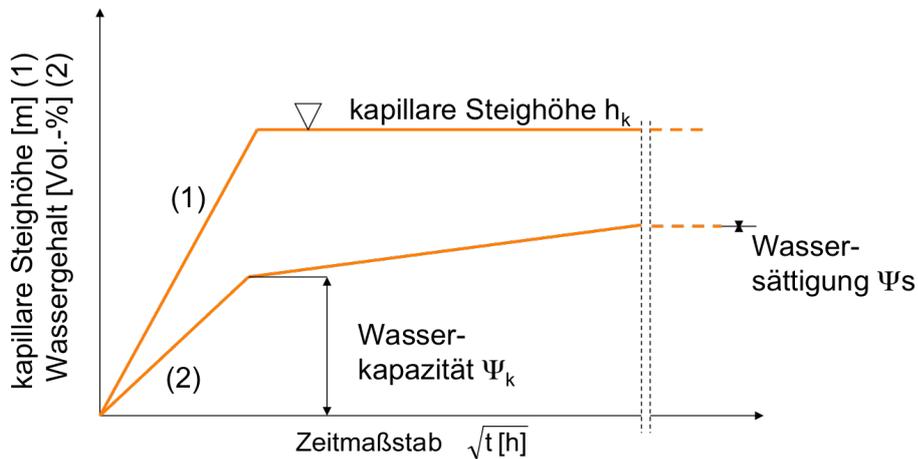


Bild 13: Zeitliche Entwicklung der Wasseraufnahme und der kapillaren Steighöhe

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

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

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.

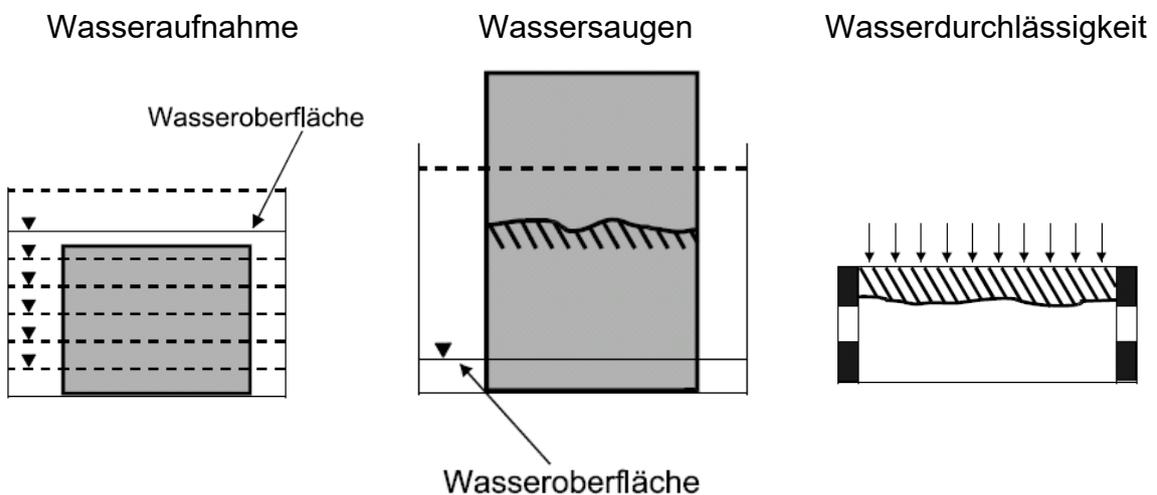


Bild 14: Prinzip der Prüfung des Verhaltens gegenüber Wasser

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).

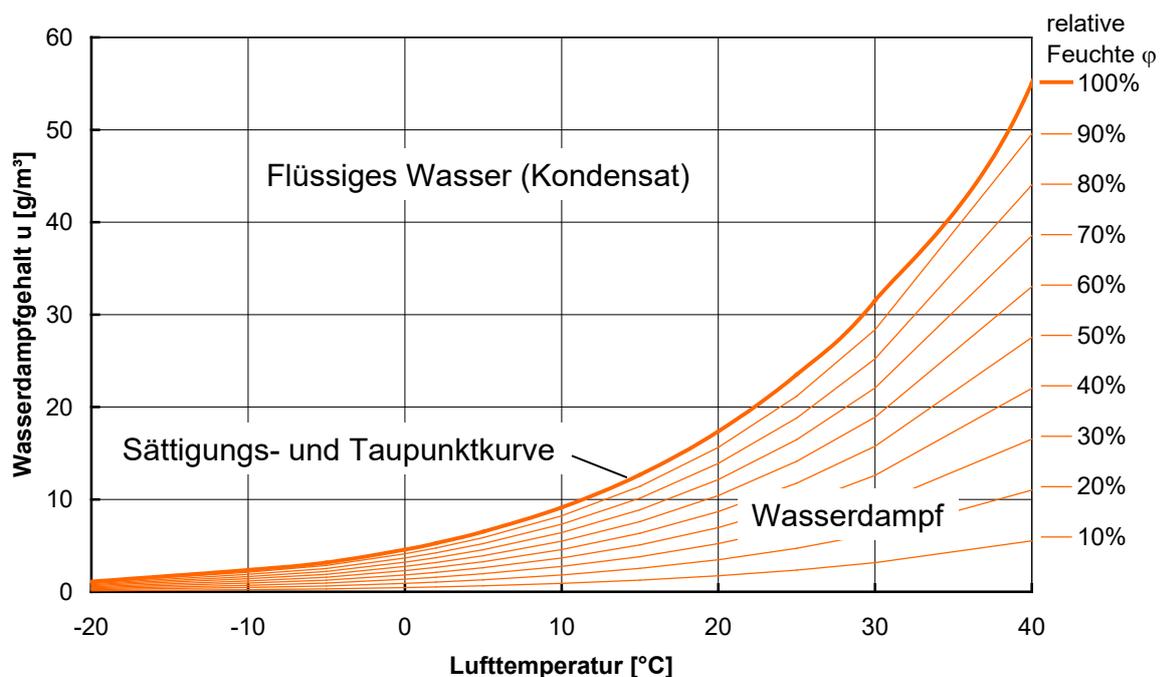


Bild 15: Wasserdampfgehalt von Luft in Abhängigkeit von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte φ

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 **Sättigungpartialdruck p_s** ergibt sich aus der entsprechenden absoluten Luftfeuchte u_s [kg/m^3] nach:

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

mit R Gaskonstante für Wasserdampf ≈ 462 [$\text{Nm}/(\text{kg} \cdot \text{K})$],
 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/m^3 Wasserdampf enthalten. Diese Temperatur wird in diesem Fall als **Taupunkt**(temperatur) bezeichnet. Wenn 20 °C warme Luft 8,65 g/m^3 Wasserdampf enthält, so beträgt die relative Luftfeuchte $8,65/17,30 = 50$ % r.F..

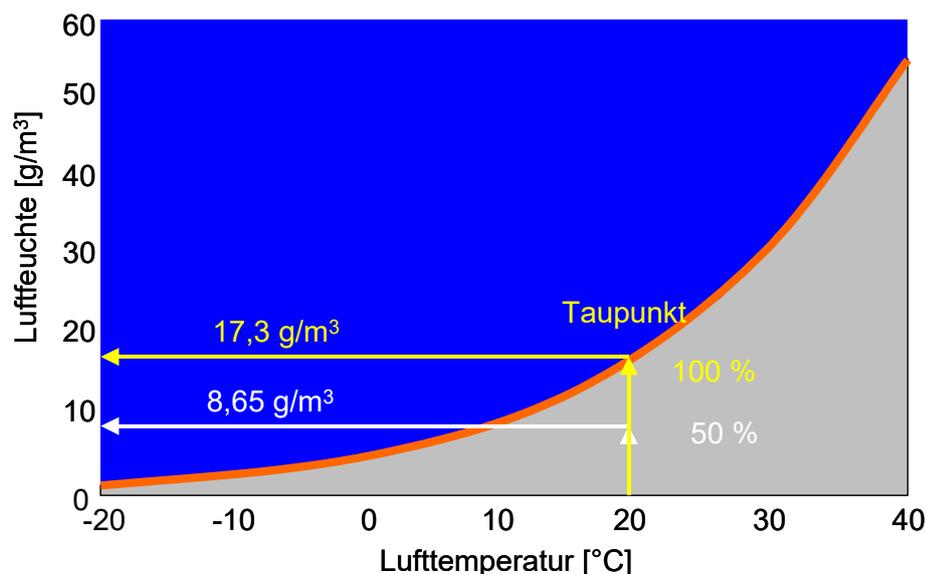


Bild 16: Luftfeuchte und Kondensation (1)

In Bild 17 ist der Zusammenhang beim Abkühlen von warmer Luft dargestellt. 30 °C warme Luft kann maximal 30 g/m^3 Wasserdampf enthalten. In Bild 17 ist angenommen, dass die 30 °C warme Luft einen Feuchtegehalt von 15 g/m^3 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/m^3 , d. h., die relative Luftfeuchte beträgt 100 % r. F..

Bei weiterem Abkühlen auf ca. 5 °C beträgt die Sättigungsfeuchte nur noch 7 g/m^3 . Dies bedeutet, dass 8 g/m^3 Feuchte ($15 - 7 = 8$) nicht mehr als Wasserdampf in der Luft enthalten sein können und als Tau oder Nebel ausfallen.

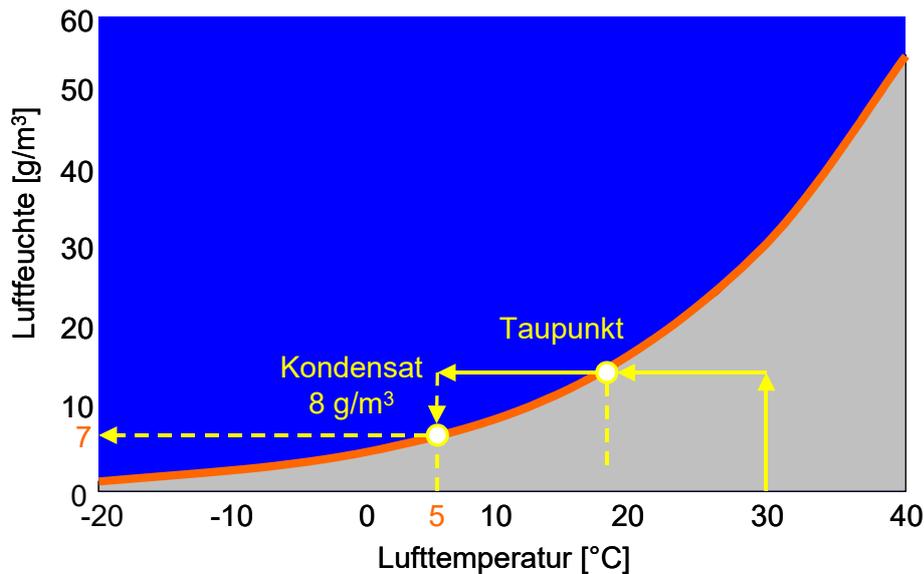


Bild 17: Luftfeuchte und Kondensation (2)

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.

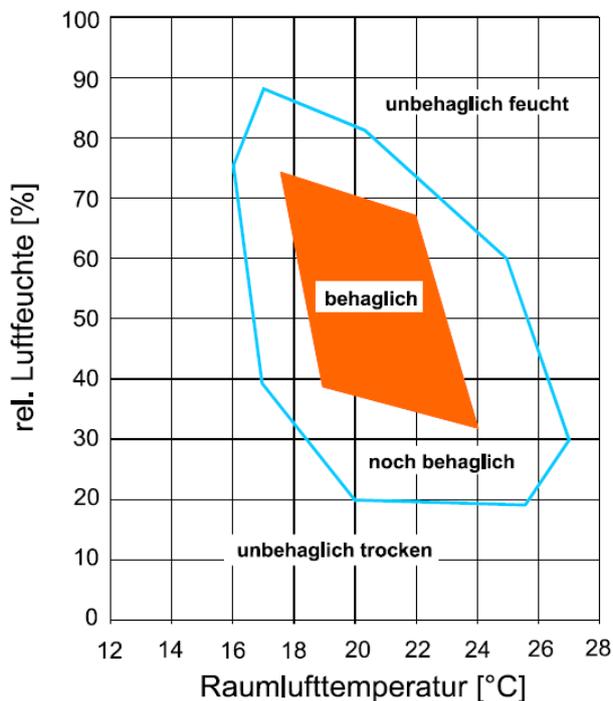


Bild 18: Behaglichkeitsfeld des Menschen in geschlossenen Räumen in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Luftfeuchte

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 11).

Tabelle 11: 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 11. 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** (Sorptions = 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 12). Für Holz ist der Einfluss der Temperatur dargestellt. Weitere Angaben zu den massebezogenen Feuchtegehalten finden sich in DIN 4108-4 [12].

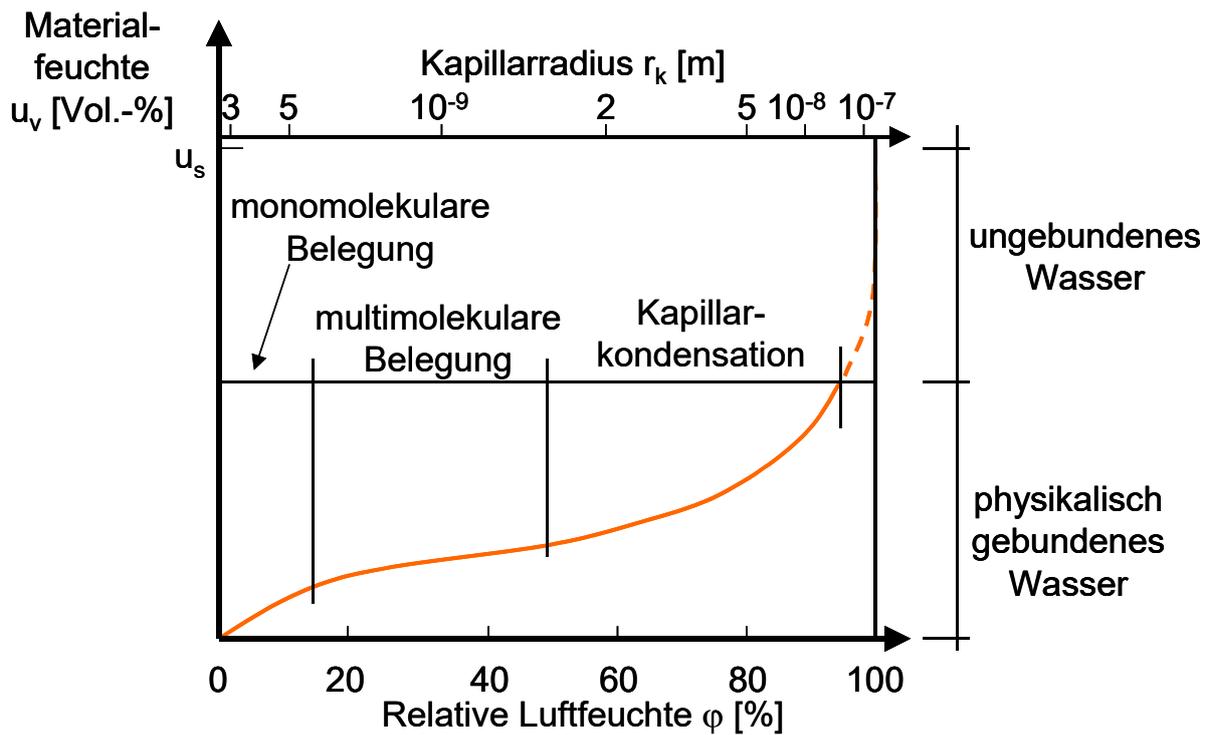


Bild 19: Typische Sorptionsisotherme für hygroskopische poröse Baustoffe

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).

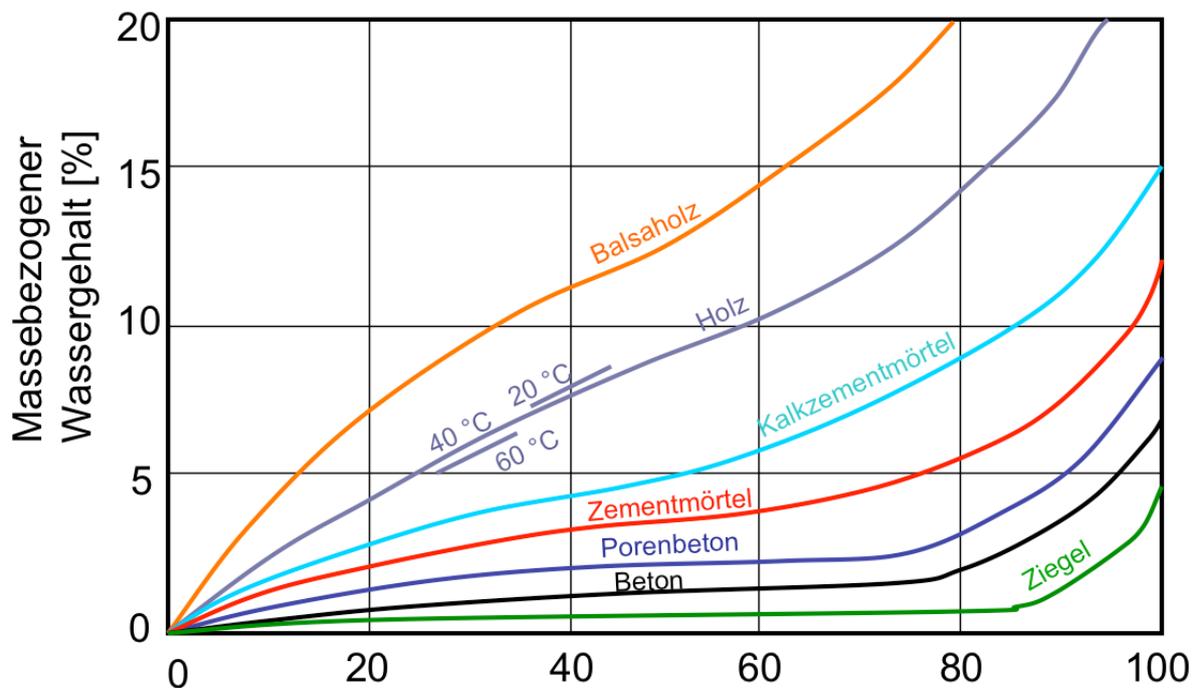


Bild 20: Schematische Sorptionsisothermen einiger poröser Baustoffe

Tabelle 12: Praktische Feuchtigkeitsgehalte für einige wichtige Baustoffe bei 20 °C und Rechenwerte der Ausgleichsfeuchtegehalte nach DIN 4108-4 [12]

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.

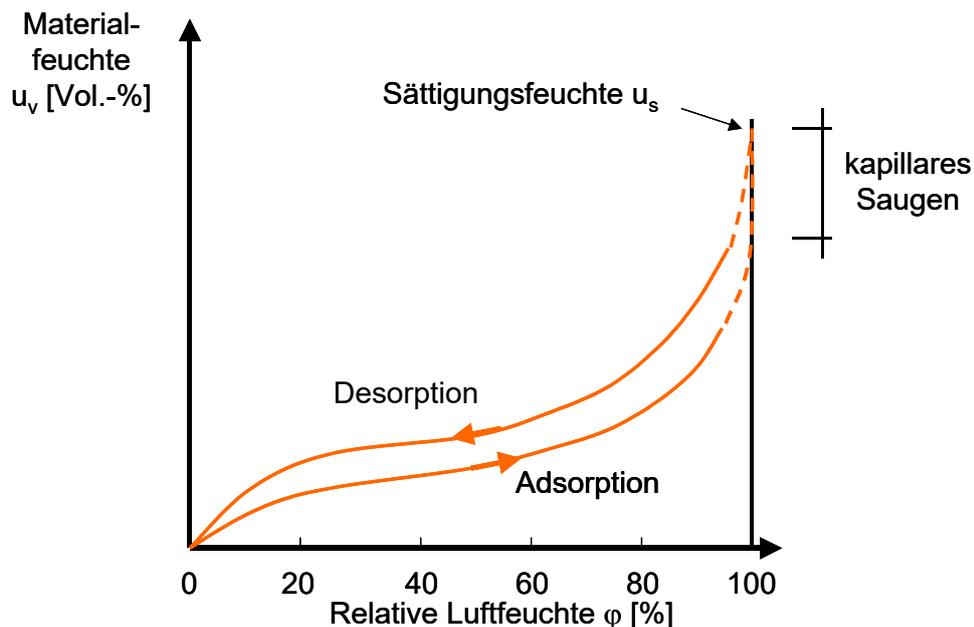


Bild 21: Schematische Darstellung der Adsorption und der Desorption eines porösen Baustoffs

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:

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

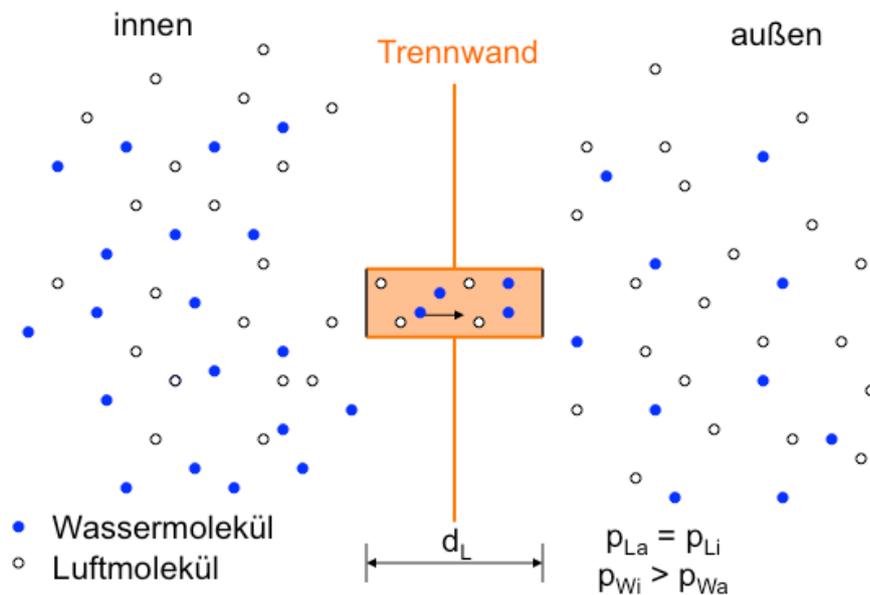


Bild 22: Vorgang der Wasserdampfdiffusion in Luft

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. Die Probe wird hierfür dicht auf eine Schale, z. B. aus Metall, aufgeklebt, die eine Lösung oder ein Trocknungsmittel zur Herstellung einer bestimmten relative Luftfeuchte (φ_1) enthält (vgl. Tabelle 11) (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 Probendicke s und der Partialdruckdifferenz Δp zunächst der Diffusionsleitkoeffizient δ des Baustoffs und dann dessen Wasserdampfdiffusions-Widerstandszahl μ bestimmt werden kann.

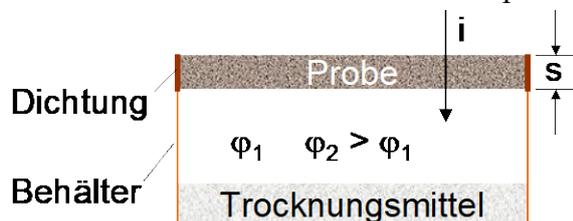


Bild 23: Versuchseinrichtung zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit

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 (Sorptions) 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).

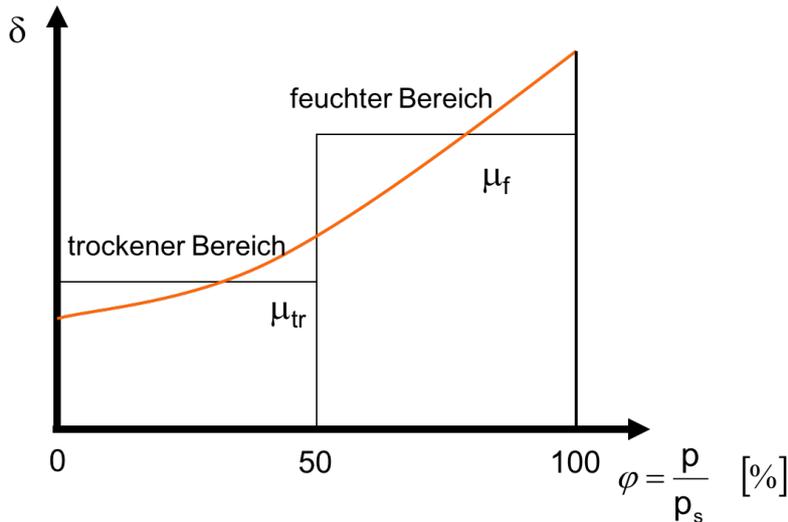


Bild 24: Einfluss der Feuchtigkeit auf die WDD-Leitzahl δ poröser Baustoffe

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 4108-4 [12] Richtwerte für verschiedene Stoffe genannt. Sie sind als Auszug in Tabelle 13. 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 13: Richtwerte der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl nach DIN 4108-4 [12]

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 Flachpressplatte	40 50/400
Dämmstoffe Mineralisch pflanzlich Schaumkunststoffe Schaumglas	1 2/5 bis 5/10 20/50 bis 80/250 praktisch dampfdicht
Abdichtungen Bitumendachbahn PVC-Folie (d ≥ 0,1 mm) Aluminiumfolie (d ≥ 0,05 mm)	2000/20000 bis 10000/80000 20000/50000 praktisch dampfdicht

5.8 Tauwasserbildung

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

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 Bauphysikalische Eigenschaften

6.1 Verhalten gegenüber Wärme und Kälte

6.1.1 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 Feuchte Kondensation 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 wurden zuletzt zum 4.07.2013 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.

6.1.2 Wärmetechnische Größen

Im Zuge der europäischen Normung wurde vielen wärmetechnischen Größen ein anderes Symbol zugeordnet. Die neue Zuordnung enthält Tabelle 14. Gegenüberstellungen mit den früher verwendeten Symbolen finden sich unter anderem in DIN 4108-2 [13]. Definitionen und physikalische Größen finden sich unter anderem in DIN EN ISO 7345 [14].

Tabelle 14: 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)

6.1.3 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 [1].

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:

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

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 15: Wärmeschutztechnische Bemessungswerte für Baustoffe [12]

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

6.1.4 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 25):

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.

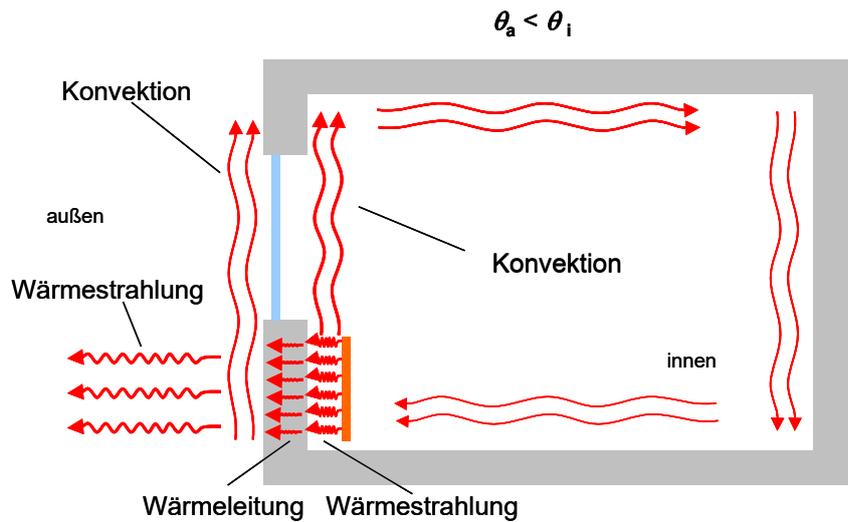


Bild 25: Arten der Wärmeübertragung

6.1.4.1 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** [$\text{W}/(\text{m K})$] (Bild 26).

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

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.

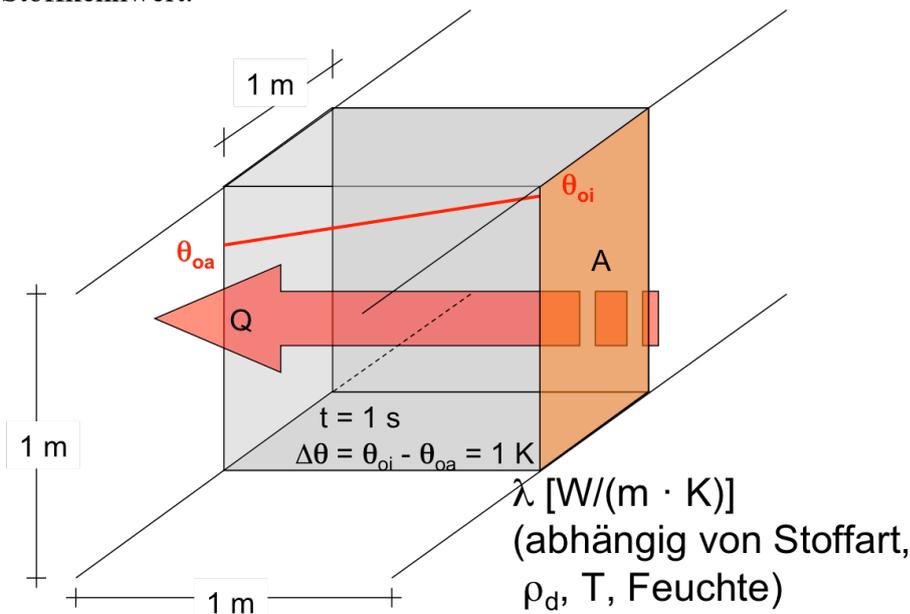


Bild 26: Wärmeleitfähigkeit

Das Baustoffgefüge hat einen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit: Bei gleicher Dichte haben amorphe Stoffe geringere λ -Werte als kristalline. Große Bedeutung hat der Feuchtigkeitsgehalt der Baustoffe (Bild 27), weil Wasser eine rund 24-mal größere Wärmeleitfähigkeit hat als ruhende Luft (vgl. Tabelle 16) und außerdem erhebliche Wärmemengen infolge Wasserdampfdiffusion übertragen werden. In DIN 4108-4 [12] sind Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit λ angegeben, die den praktischen Feuchtigkeitsgehalt der Baustoffe berücksichtigen.

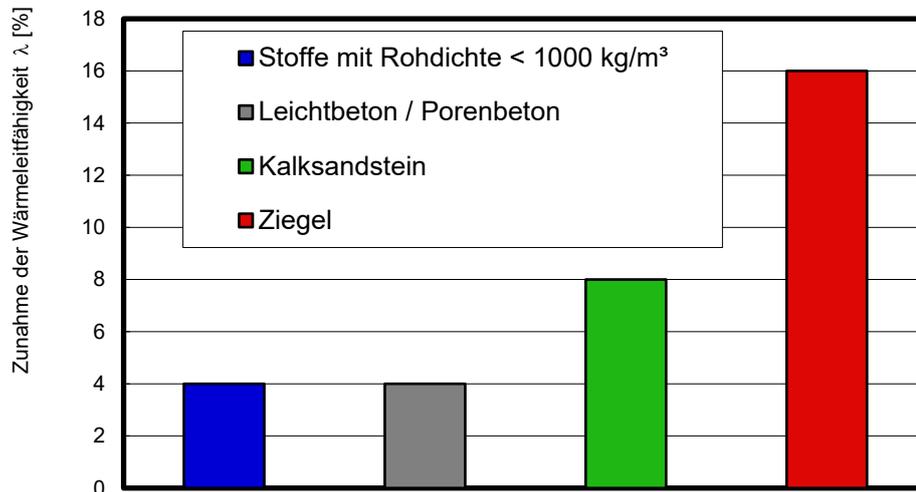


Bild 27: Zunahme der Wärmeleitfähigkeit in [%] je Masse-% Feuchtezunahme

Tabelle 16: 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
Vakuumpanel	0,004

6.1.4.2 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 28), 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 Schlitzte in wärmedämmenden Mauersteinen (Bild 29).

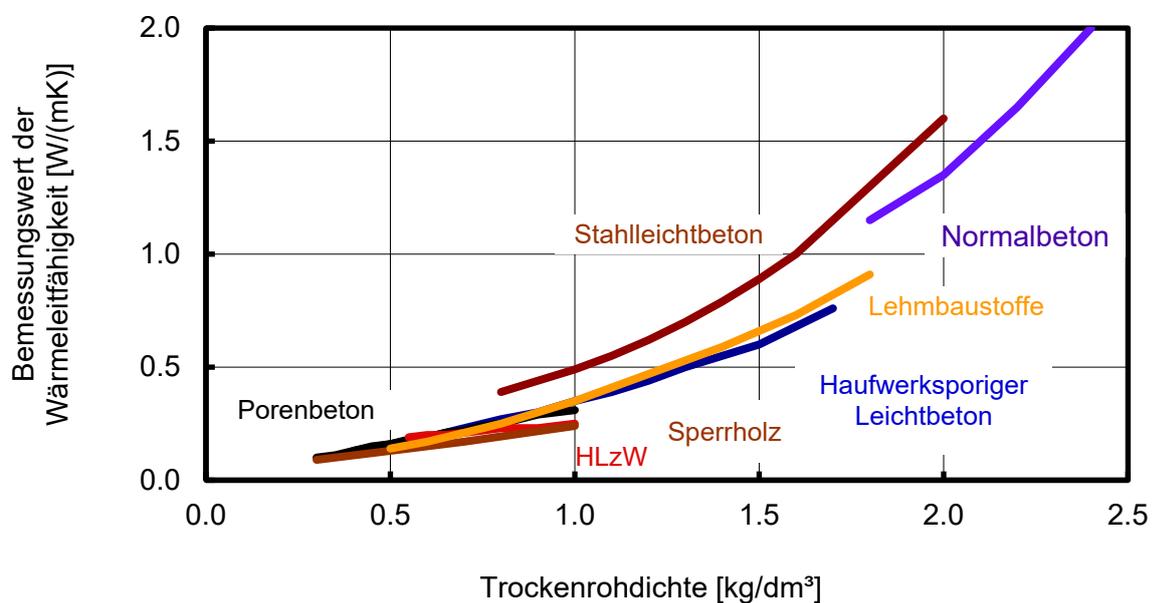


Bild 28: Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe [12]

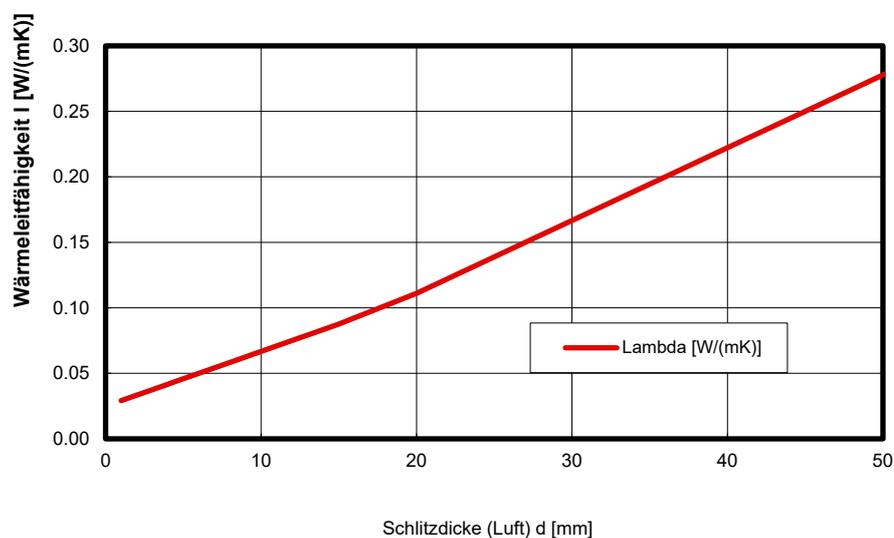


Bild 29: Wärmeleitfähigkeit stehender Luft (horizontaler Wärmestrom) [15]

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 entgegengesetzt (Bild 30).

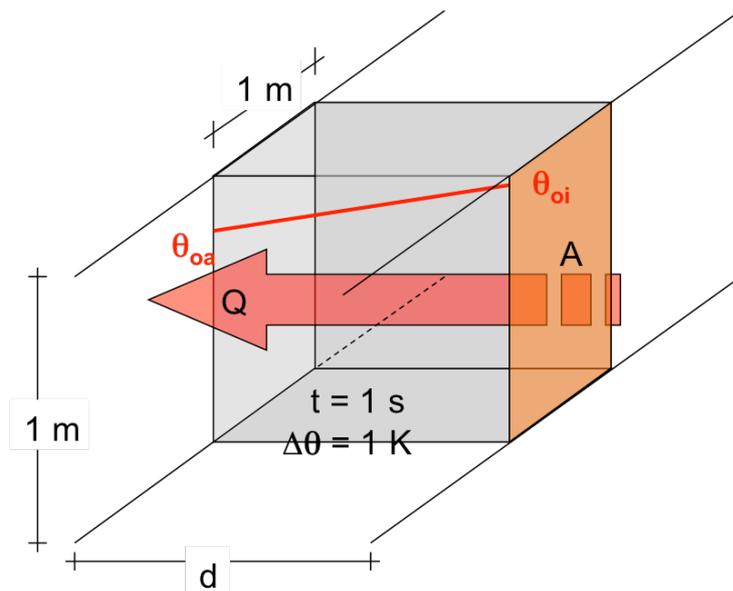


Bild 30: Wärmedurchlasswiderstand

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 verschiedenen aufgebauten, unterschiedlich dicken Bauteilen und ermöglicht die Bestimmung der Temperaturverteilung im Querschnitt (Bild 31). In DIN 4108-2 [13] 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 31 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 [15].

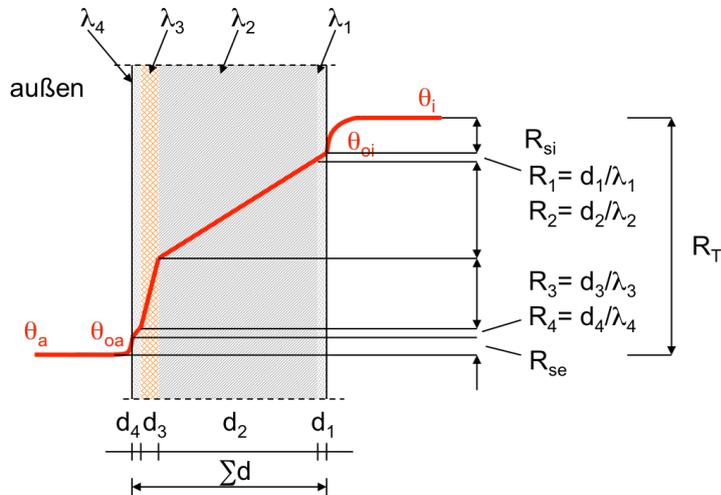


Bild 31: Wärmedurchgang durch ein mehrschichtiges Bauteil

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).

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

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

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

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 04.07.2013 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 17 gegeben. Das Bild 32 zeigt anhand beispielhafter Wärmeleitfähigkeitswerte, wie sich eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit auf den Wärmedurchgangskoeffizienten auswirkt.

Tabelle 17: 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 1,48 m) mit zweifach Verglasung	0,85 - 1,16
mit dreifach Verglasung	0,67 - 0,89
36,5 cm Außenwände mit 15 mm Innenputz und 20 mm Außenputz	
Beton ($\lambda = 2 \text{ W}/(\text{mK})$)	2,22
Mauerstein nach Norm ($\lambda = 0,16 \text{ W}/(\text{mK})$)	0,39
Mauerstein nach Zulassung ($\lambda = 0,10 \text{ W}/(\text{mK})$)	0,26
Mauerstein nach Zulassung ($\lambda = 0,065$ W/(mK))	0,17

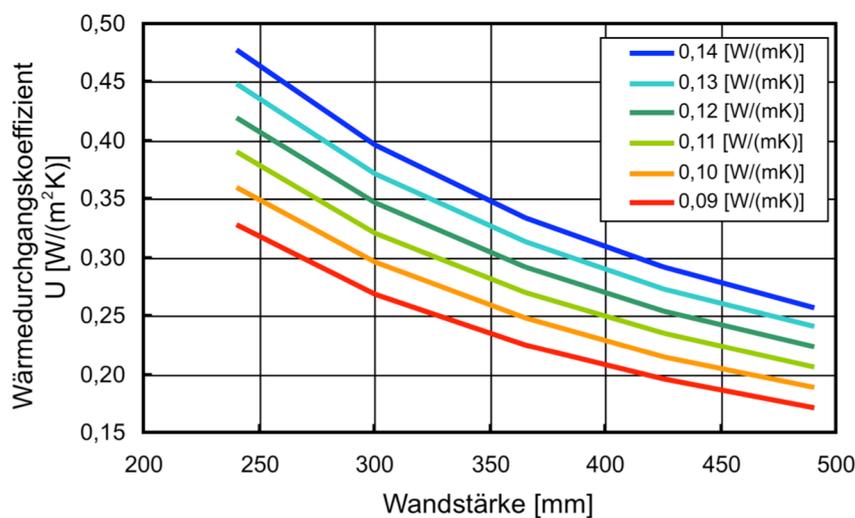


Bild 32: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit auf den Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Wandstärke

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

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

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 18 zeigt die Bandbreite der Wärmeeindringfähigkeit anhand verschiedener Baustoffe.

Tabelle 18: 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

6.1.4.3 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 33).

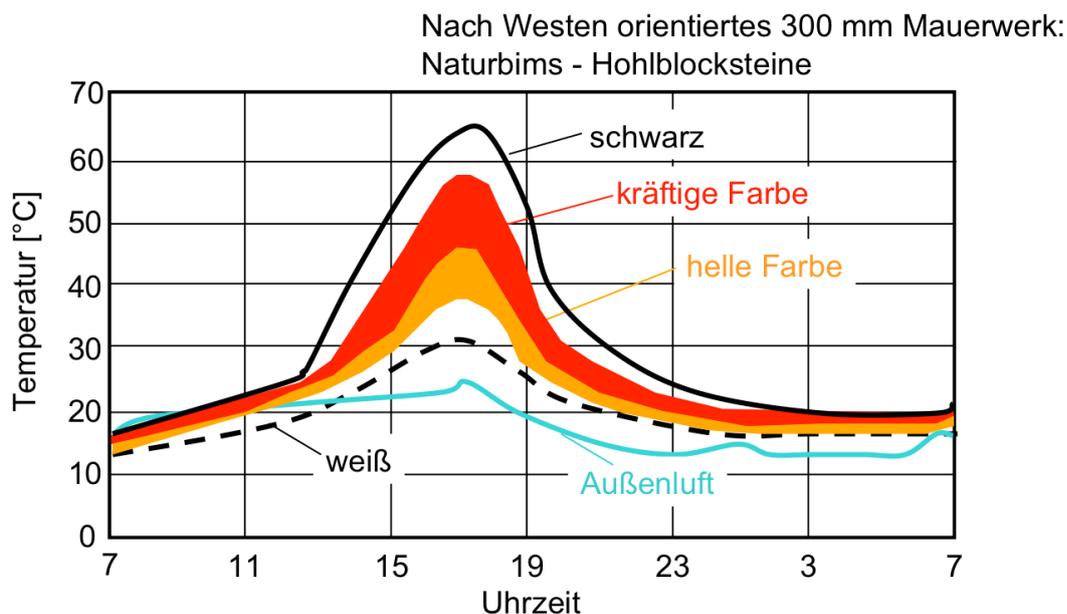


Bild 33: Oberflächentemperatur von Außenputzen verschiedener Färbung

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 Südwände (Bild 34), 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.).

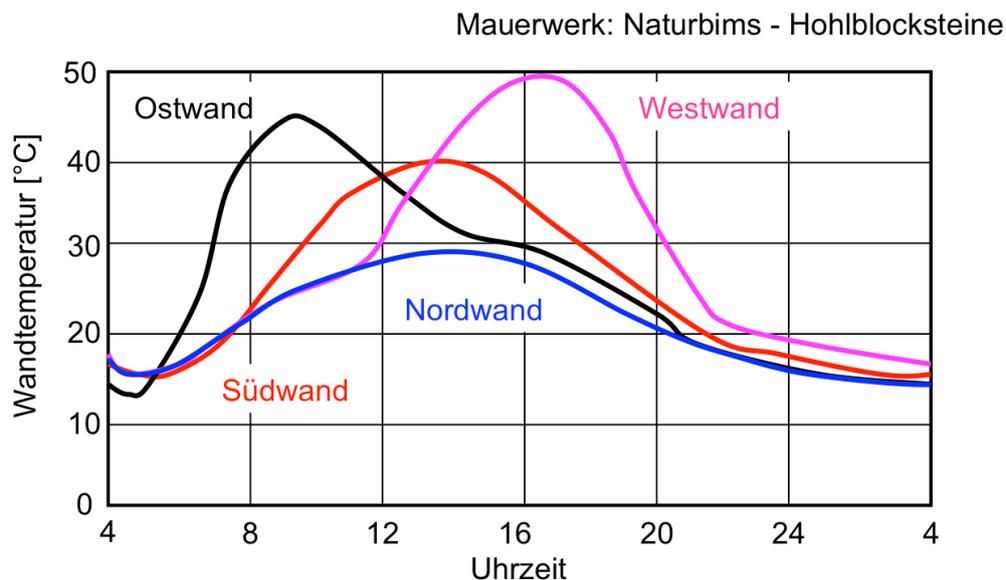


Bild 34: Oberflächentemperatur verputzter Außenwände an einem Sommertag

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

6.2 Schall

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 35 dargestellt.

Eine hohe **Luftschalldämmung** wird erreicht durch

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

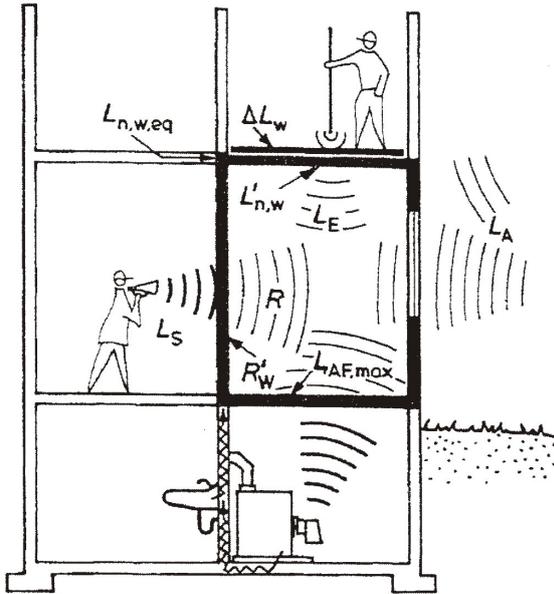


Bild 35: Arten der Schallanregung und der Schallausbreitung

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.

6.3 Brandverhalten

6.3.1 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.

6.3.2 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 36 dargestellt. Die Bedingungen realer Brände variieren. Für die Beurteilung von Baustoffen und Bauteilen werden standardisierte Szenarien herangezogen. Als Beispiel zeigt Bild 37 die **Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)**, die für die Beurteilung von Bauteilen genutzt wird. Daneben existieren noch andere Brandkurven, z. B. die Hydrocarbonkurve.

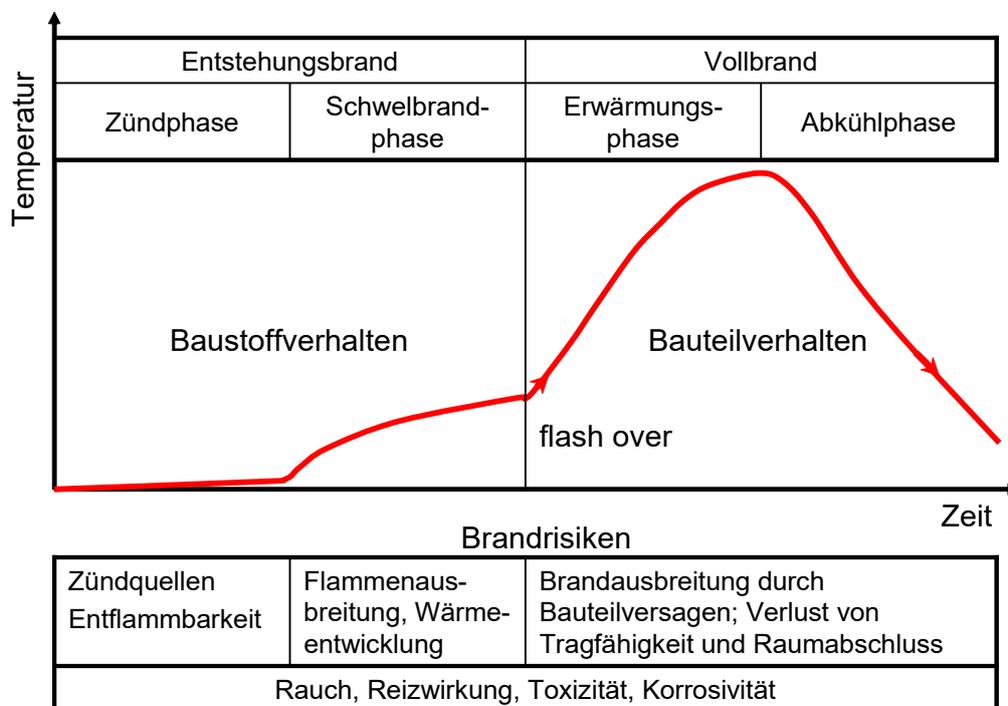


Bild 36: Schematischer Brandverlauf und Brandrisiken [16]

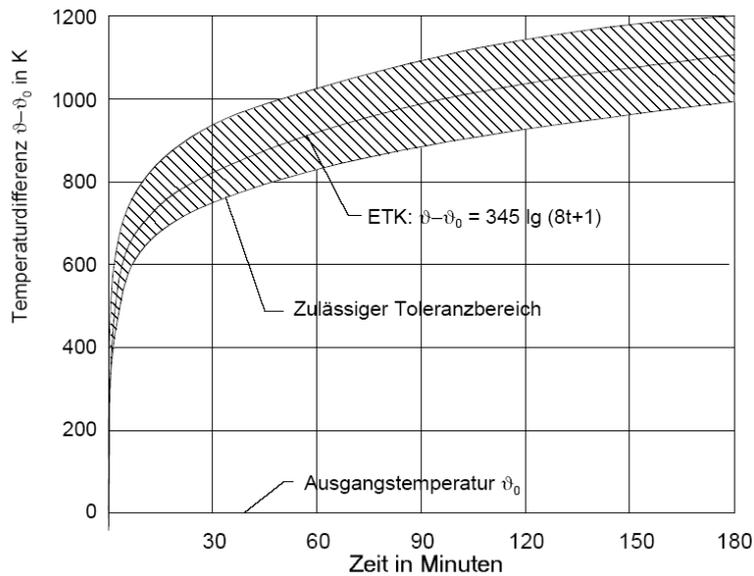


Bild 37: Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)

6.3.3 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 [17] bzw. DIN 4102-1 [18]. Baustoffe werden aufgrund von Prüfungen in nichtbrennbar und brennbar (schwerentflammbar, normalentflammbar und leichtentflammbar) eingeteilt (Tabelle 19). 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 [17] erläutert.

Tabelle 19: Bauaufsichtliche Zuordnung der Klassifizierung von Baustoffen nach DIN EN 13501-1 [17] und DIN 4102-1 [18]

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 20: 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

6.3.4 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.

Bauteile (z. B. Wände, Decken, Stützen) werden nach [19] 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 21 und Tabelle 22 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 37) 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) [19]. Eine Zuordnung der bauaufsichtlichen Benennung mit der Klassifizierung von Bauteilen nach DIN EN 13501-2 und DIN 4102 enthalten die nachfolgenden Tabellen.

Tabelle 21: 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)	Rauchschtüren (als Zusatzanforderung auch bei Feuerschutzabschlüssen), Lüftungsanlagen einschließlich Klappen
C... (Closing)	Selbstschließende Eigenschaft (ggf. mit Anzahl der Lastspiele) einschließlich Dauerfunktion	Rauchschtüren, Feuerschutzabschlüsse (einschließlich Abschlüsse für Förderanlagen)
P	Aufrechterhaltung der Energieversorgung und/oder Signalübermittlung	Elektrische Kabelanlagen allgemein

Tabelle 22: 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	Rauchschtüre
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 23: 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	

7 Formänderung

7.1 Einteilung der Formänderungen

Formänderungen von Baustoffen können mit und ohne mechanische Beanspruchung erfolgen. Eine Einteilung der Formänderungen zeigt Tabelle 24.

Tabelle 24: 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:

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [-]$$

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

7.2 Lastunabhängige Formänderungen

7.2.1 Temperaturdehnung (Wärmedehnung)

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

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

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 25: 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

7.2.2 Schwinden und Quellen

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

Tabelle 26: 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

7.2.3 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.-%.

7.3 Formänderung durch Belastung

7.3.1 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.

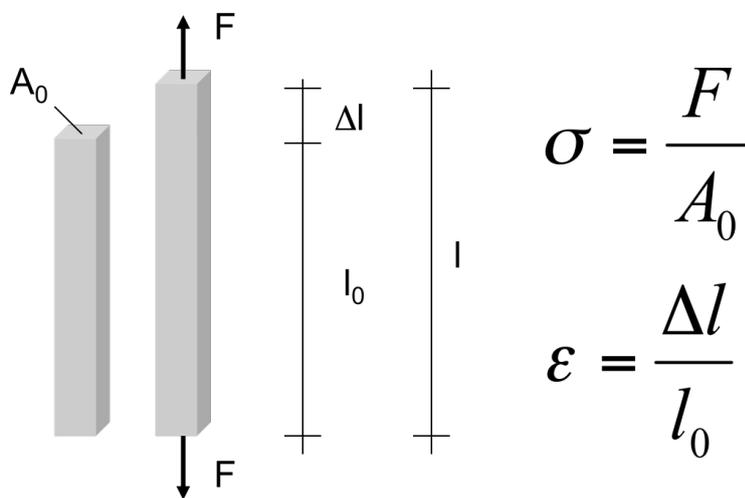


Bild 38: Schematische Darstellung eines Zugversuchs

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 :

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

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** ($\sigma - \varepsilon$ - Diagramm), siehe Bild 39.

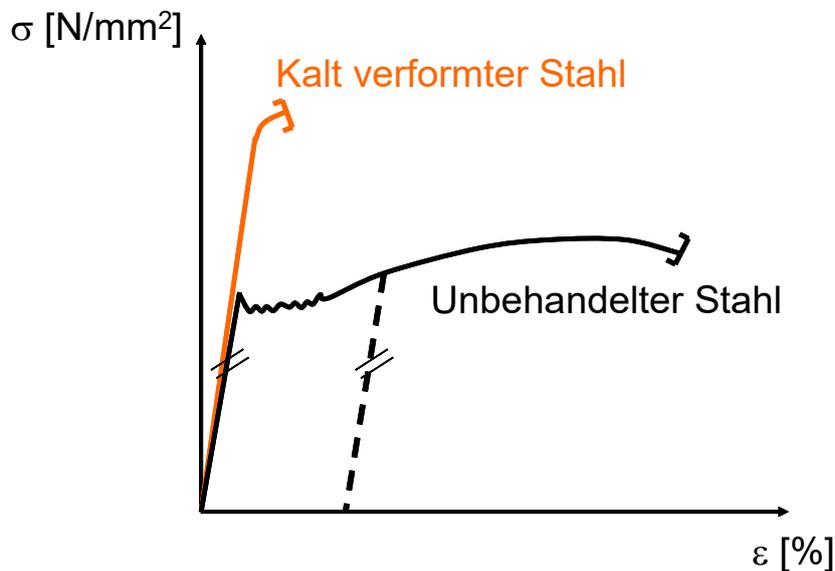


Bild 39: Beispiele für Spannungs-Dehnungs-Linien von Stahl

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 40).

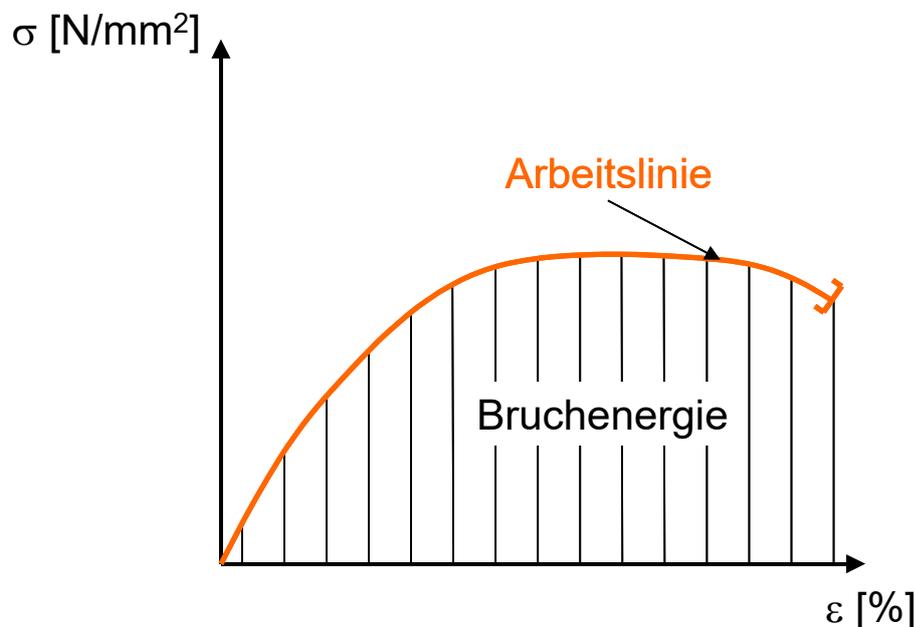


Bild 40: Arbeitslinie und Bruchenergie

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

7.3.2 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 42) ist der Elastizitätsmodul nicht konstant:

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

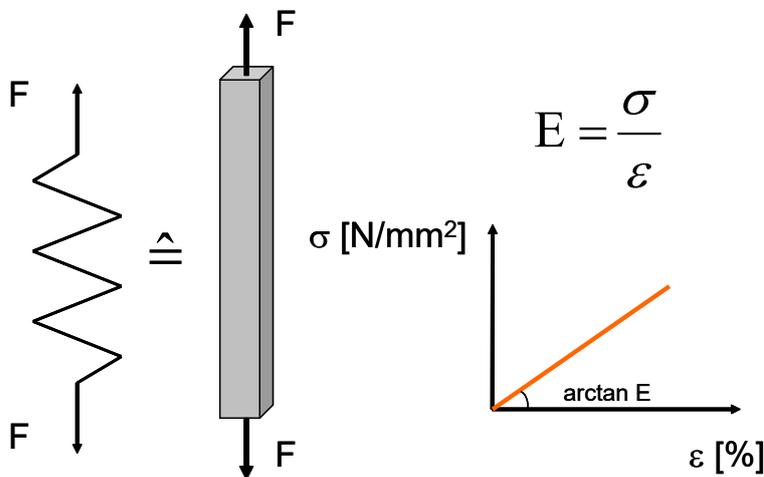


Bild 41: Elastisches Verhalten

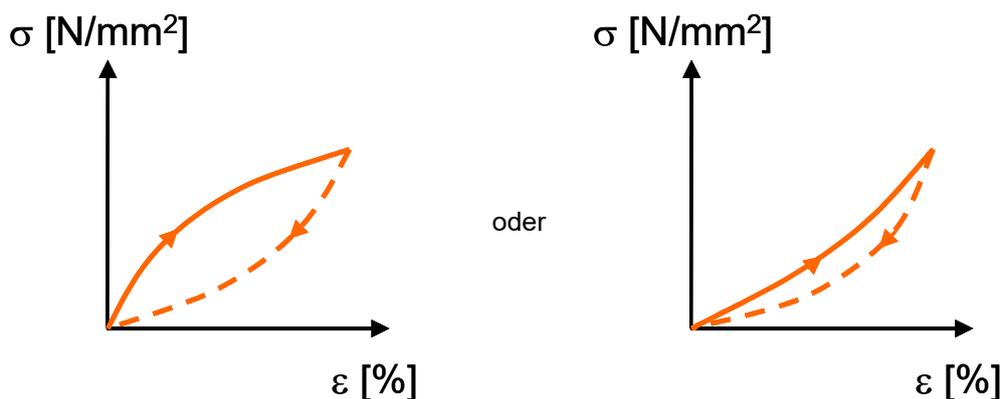


Bild 42: Nicht linear elastisches Verhalten

Da die Spannungen σ senkrecht zu der betrachteten Fläche wirken, nennt man sie **Normalspannungen** σ (Bild 43). 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 43). 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 43). Die **Querdehnzahl** μ ist damit das Verhältnis der Querdehnung zur aufgebrauchten Längsdehnung.

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

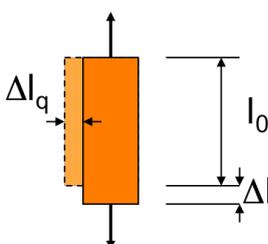
Die **Poissonzahl** ν ist der Kehrwert von μ :

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

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 27 führt exemplarisch einige Werte auf.

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

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

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


Querdehnzahl

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

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

Schubmodul

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

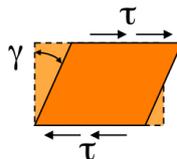


Bild 43: Verformungen infolge von Normalspannungen σ und Schubspannungen τ

Tabelle 27: 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:

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

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

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

Die auf einen Körper einwirkenden Normalspannungen σ und Schubspannungen τ zeigt Bild 44. Wirken nur gleich große negative Normalspannungen auf den Körper ein ($-\sigma_{xx} = -\sigma_{yy} = -\sigma_{zz}$), dann herrscht **hydrostatischer Druck**.

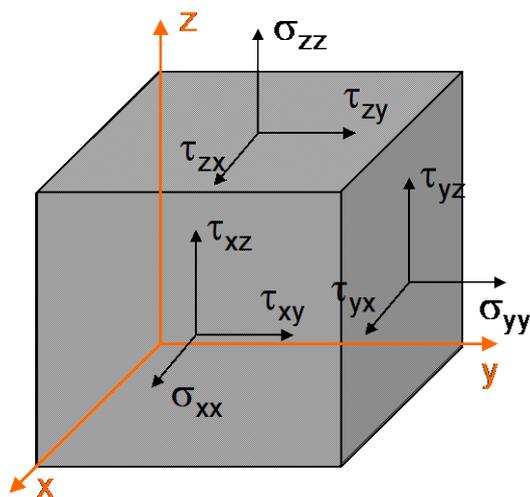


Bild 44: Normalspannungen σ und Schubspannungen τ

Das reale Baustoffverhalten entspricht nicht dem einfachen **Hooke'schen Federmodell**. In Bild 39 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.

7.3.3 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 45).

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.

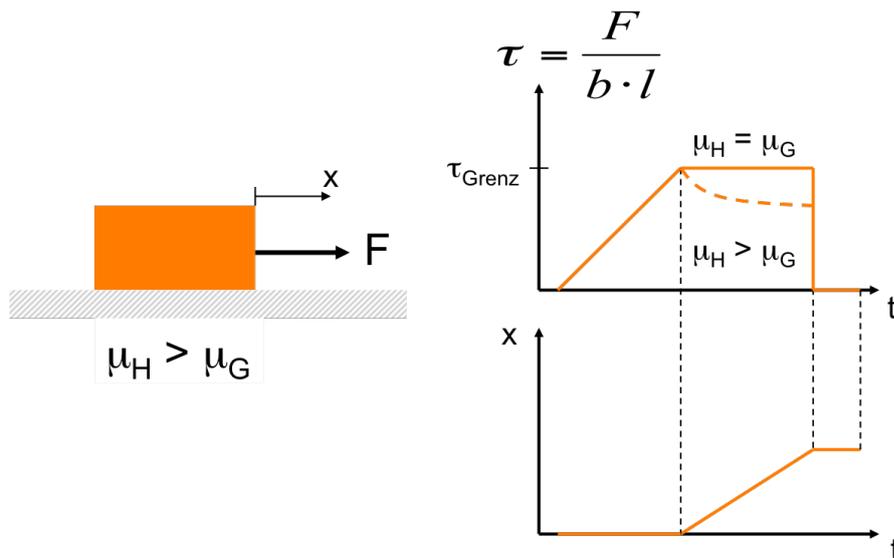


Bild 45: St. Venant'sches Reibungselement

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 45 und Bild 46).

Bei einer geringeren Gleitreibung kann die Kraft nach Erreichen der Grenzspannung verringert werden (gestrichelte Linie in Bild 45).

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 46).

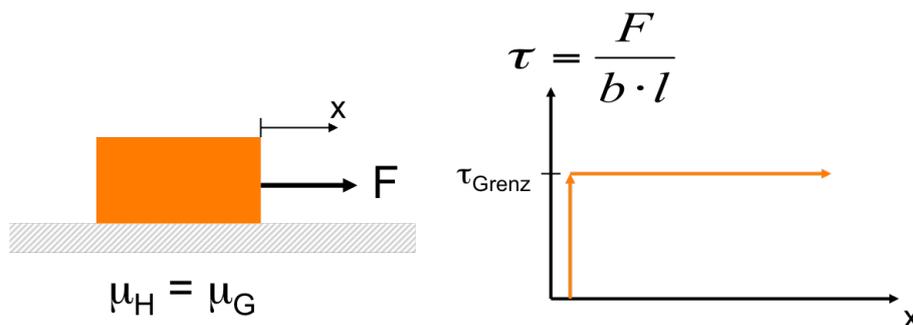


Bild 46: St. Venant'sche Reibungselement und die ideal plastische Spannungs-Dehnungs-Linie

Unbehandelter Stahl zeigt ein elastisch-plastisches Verhalten (Bild 39). 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 39).

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 39).

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 47).

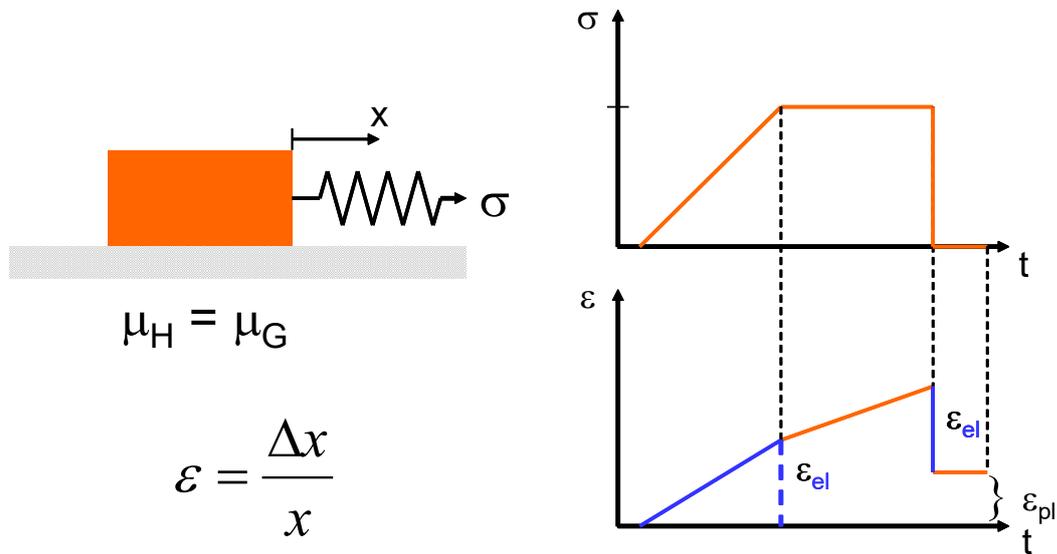


Bild 47: Prandtl-Körper

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 47 und Bild 48 dargestellt.

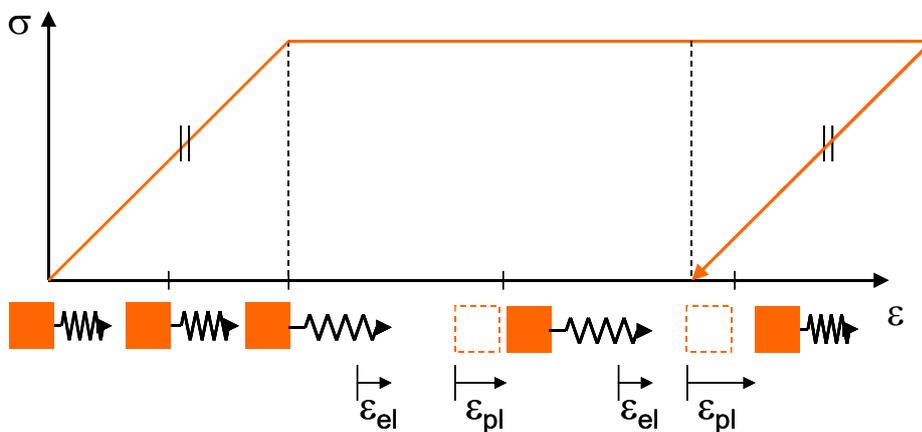


Bild 48: Schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnungs-Linie am Beispiel des Prandtl-Körpers

7.3.4 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 aufgebrachtten 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.

7.3.4.1 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** $\epsilon_{k,r}$) und nur der **irreversible Teil der Kriechverformung** $\epsilon_{k,ir}$ bleibt erhalten (Bild 49).

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

$$\varphi_t = \frac{\epsilon_k}{\epsilon_{el}}$$

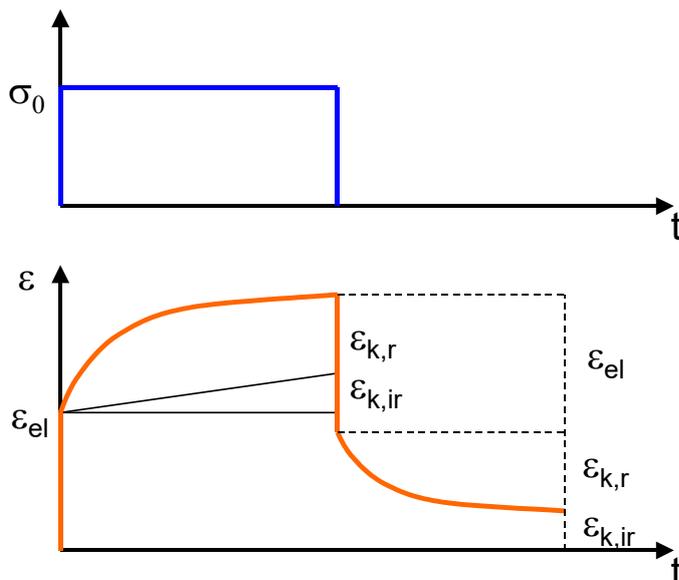


Bild 49: Kriechen eines viskoelastischen Stoffes

Die gesamte Dehnung unter Dauerlast ist dann:

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

φ_t kann für Beton bis zu 6 betragen, sodass die Kriechverformung sechsmal 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:

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

7.3.4.2 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).

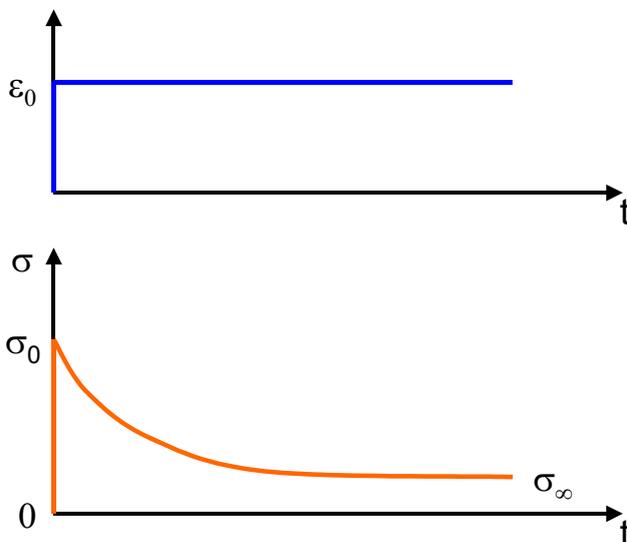


Bild 50: Relaxation eines viskoelastischen Stoffes

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

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

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

7.3.4.3 Modelle

Der viskose Verformungsanteil lässt sich durch einen **Newton'schen Dämpfer** beschreiben (Bild 51). 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.

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 aufgebrauchte Spannung (Bild 51).

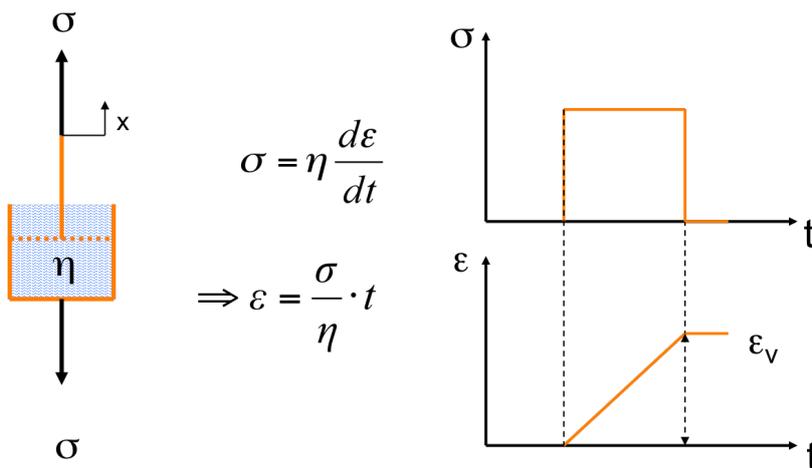


Bild 51: Newton'scher Dämpfer (1)

Wird die Spannung mit der Zeit linear verändert, so weist der Dämpfer eine mit der Zeit quadratisch veränderliche Verformung auf (Bild 52). Dieses lässt sich mathematisch über

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

ausdrücken.

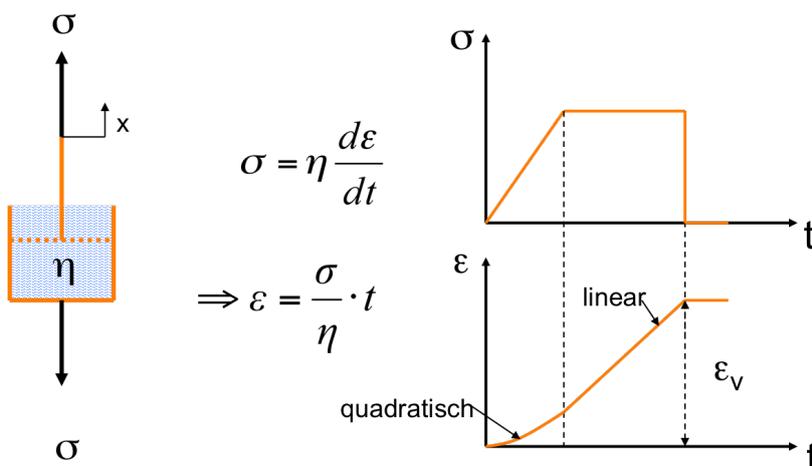


Bild 52: Newton'scher Dämpfer (2)

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 53 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 54).

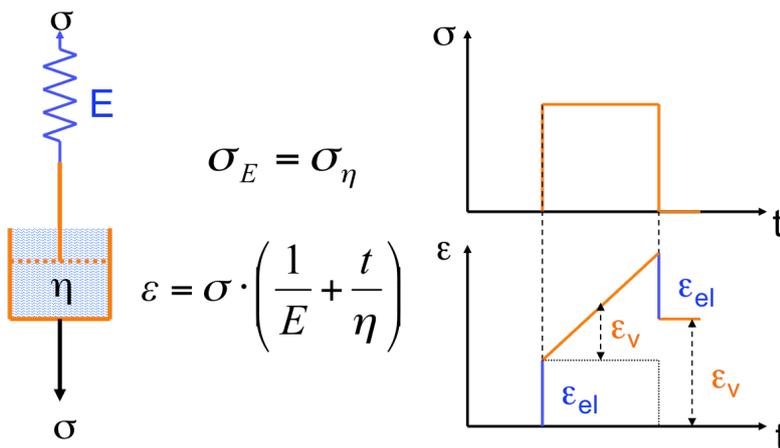


Bild 53: Maxwell-Modell (1)

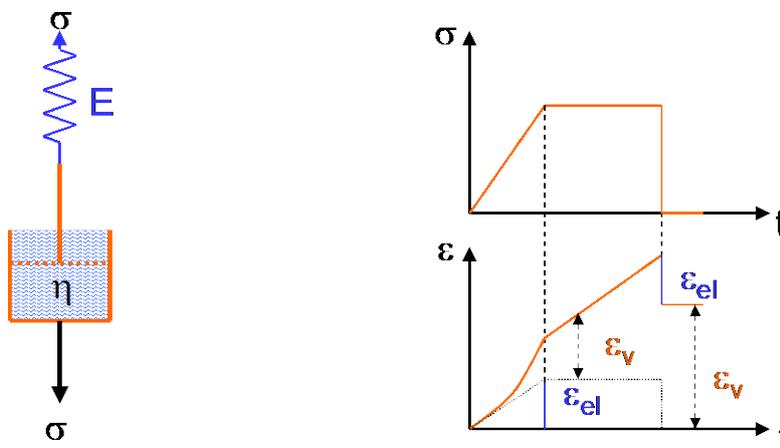


Bild 54: Maxwell-Modell (2)

Ein weiteres Modell ist das **Kelvin-Modell**, das man durch Parallelschaltung der Hooke'schen Feder und des Newton'schen Dämpfers erhält (Bild 55). 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.

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.

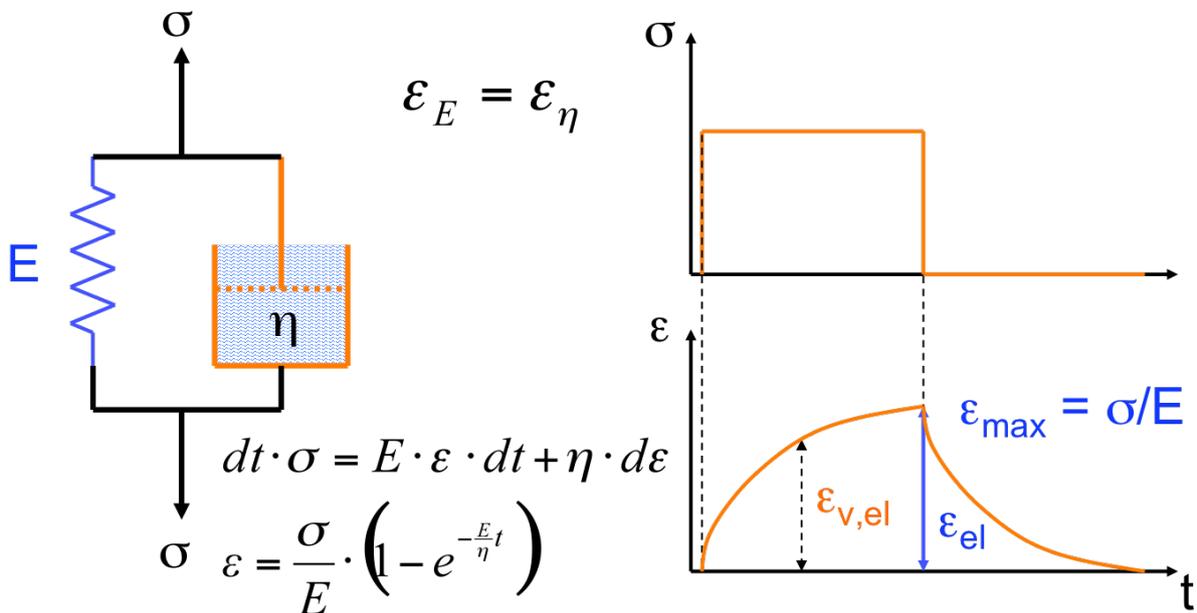


Bild 55: Kelvin-Modell (verzögert elastische Verformung)

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 56). 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.

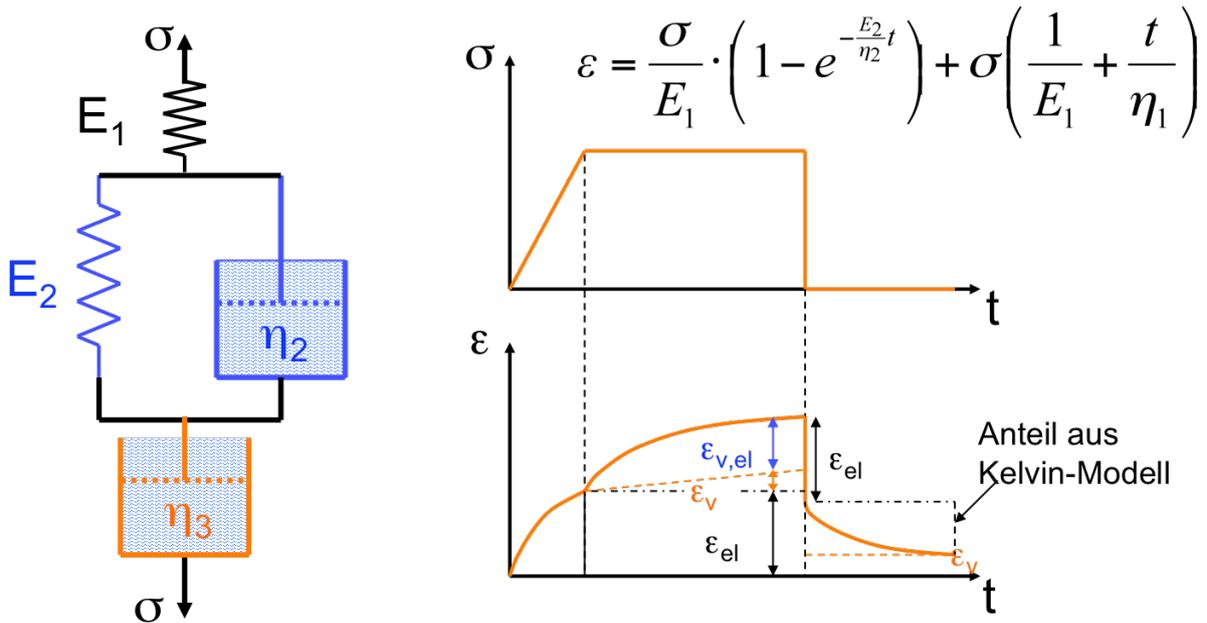


Bild 56: Burger-Modell

Bei vielen Baustoffen spielt das viskoelastische Verhalten nicht nur bei einer dauernd aufgebrachtten Spannung eine Rolle, sondern bereits im Kurzzeitversuch können sie nicht mehr als ideal elastisch angesehen werden, z. B. Kunststoffe. Bild 57 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.

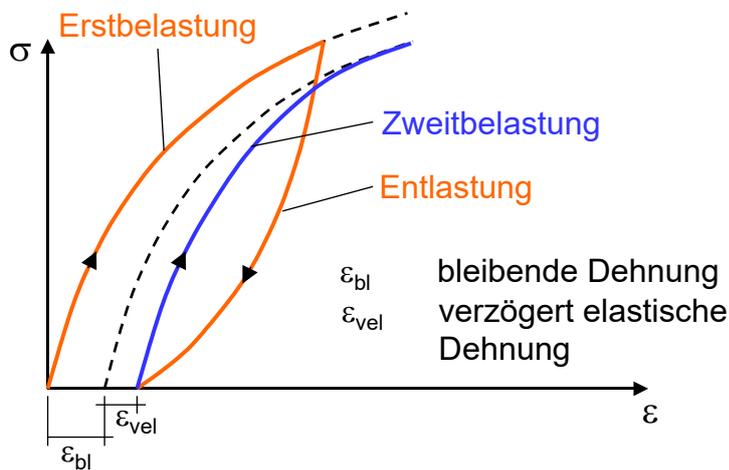


Bild 57: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für viskoelastische Werkstoffe

Bei viskoelastischen Werkstoffen spielt auch die Belastungsgeschwindigkeit eine große Rolle für das Verformungsverhalten (Bild 58). Mit niedrigerer Belastungsgeschwindigkeit werden die σ - ε -Linien flacher, da die zeitabhängigen viskosen Verformungsanteile zunehmen (siehe Bild 55, Formel Kelvin-Modell). Mit höherer Temperatur sind die viskosen Verformungsanteile größer. Das macht sich insbesondere bei Kriechen, Relaxation, Dauerstandfestigkeit und Dauerschwingfestigkeit bemerkbar.

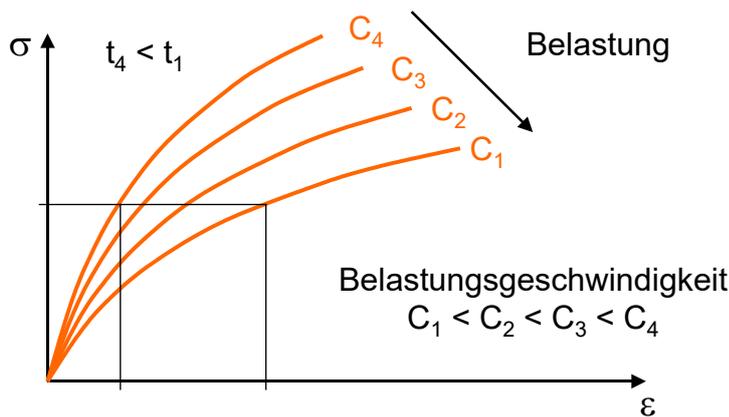


Bild 58: Spannungs-Dehnungs-Linien für viskoelastische Werkstoffe bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten $C_1 < C_2 < C_3 < C_4$

7.3.4.4 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 59). 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 60).

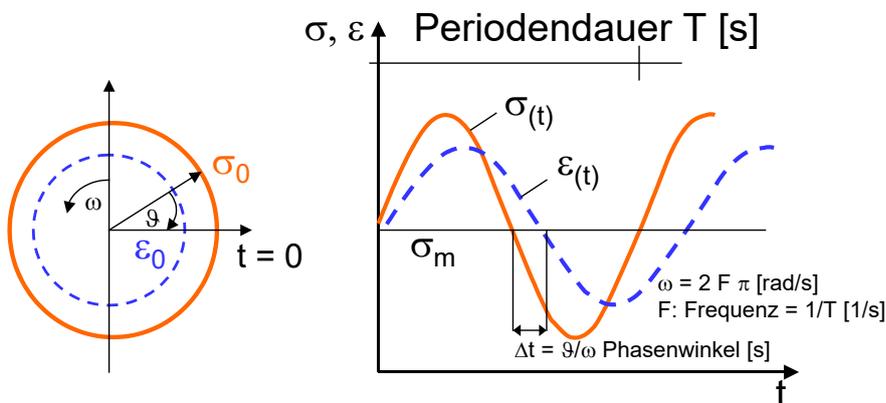


Bild 59: Spannung und Dehnung bei zyklischer Belastung

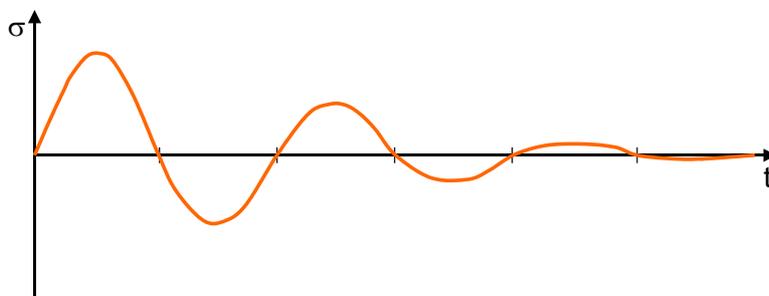


Bild 60: Spannungsverlauf bei freier Schwingung eines Werkstoffs mit starker Dämpfung, z. B. Gummi, Gusseisen

8 Festigkeit

8.1 Allgemeines

Alle Spannungs-Dehnungs-Linien erreichen einen Punkt, an dem die Spannung nicht weiter gesteigert werden kann (Bild 61). 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.

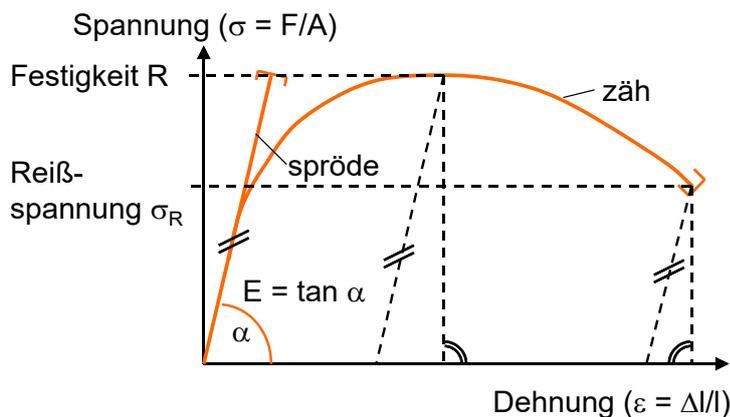


Bild 61: Schematische Spannungs-Dehnungs-Linien metallischer Stoffe

Viele Werkstoffe verformen sich vor dem Bruch stark. Zähe Stähle (wie z. B. Baustähle) schnüren sich am Bruchquerschnitt (Bild 62) 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**.

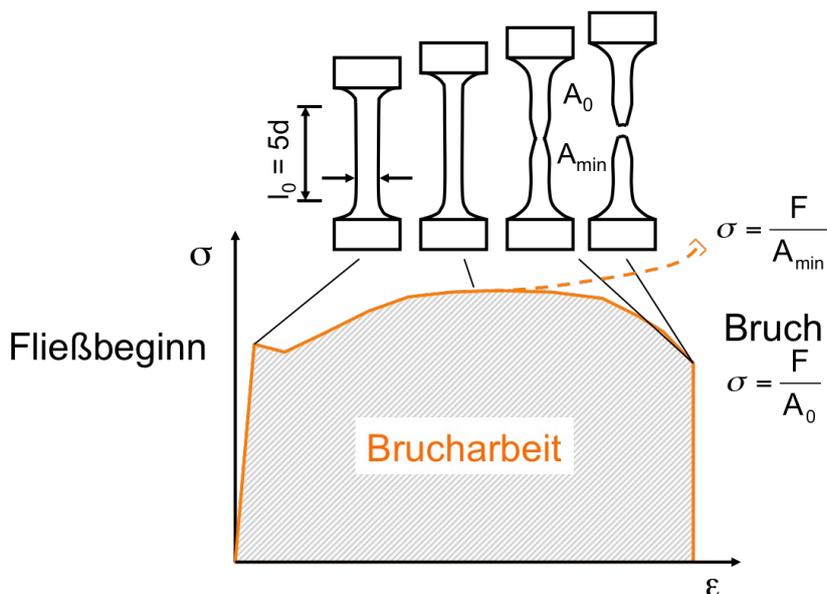


Bild 62: Spannungs-Dehnungs-Linie mit Einschnürung der Zugprobe

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 63 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).

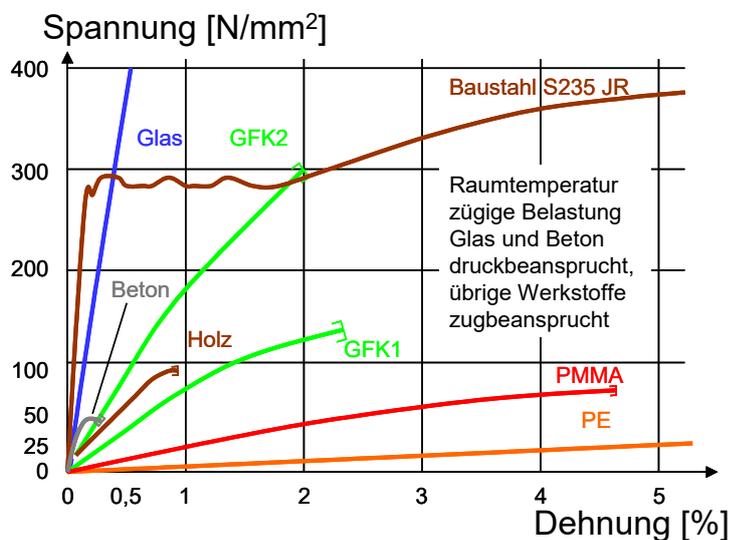


Bild 63: Spannungs-Dehnungs-Linien verschiedener Baustoffe

Die Festigkeit wird sehr stark von Poren und **Kerben** beeinflusst, da an solchen Stellen in einer Probe hohe Spannungsspitzen auftreten können (Bild 64), 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 65). Spröde Werkstoffe sind im Gegensatz zu zähen sehr **kerbempfindlich**. Glas lässt sich zum Beispiel durch sehr kleine Kerben brechen (Prinzip des Glasschneiders).

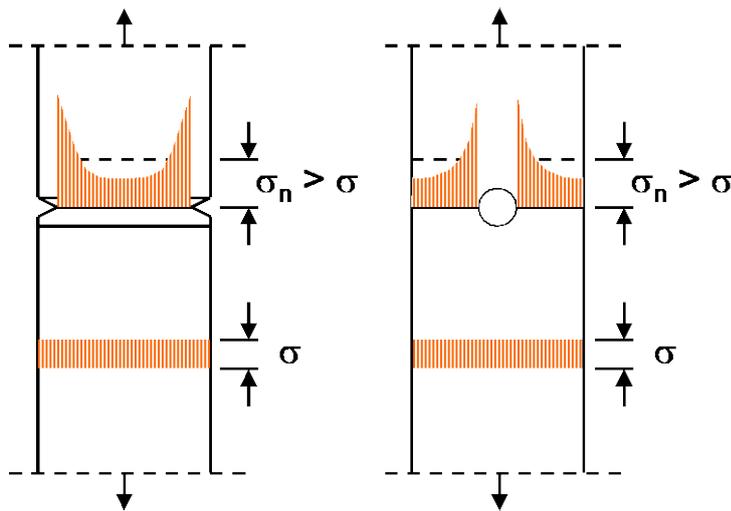


Bild 64: Spannungsspitzen durch Kerbe und Loch

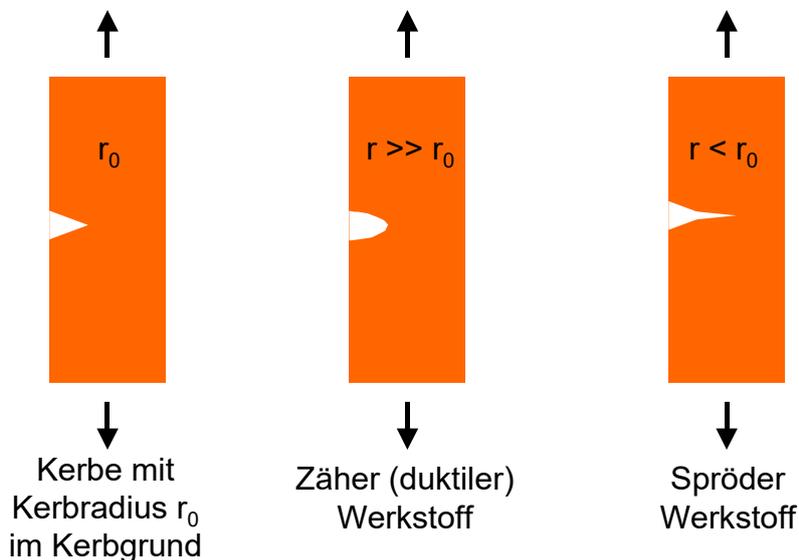


Bild 65: Auswirkung einer Kerbe auf zähen und spröden Werkstoff unter Zugbeanspruchung (schematisch)

8.2 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 66, Bild 68 und Bild 70).

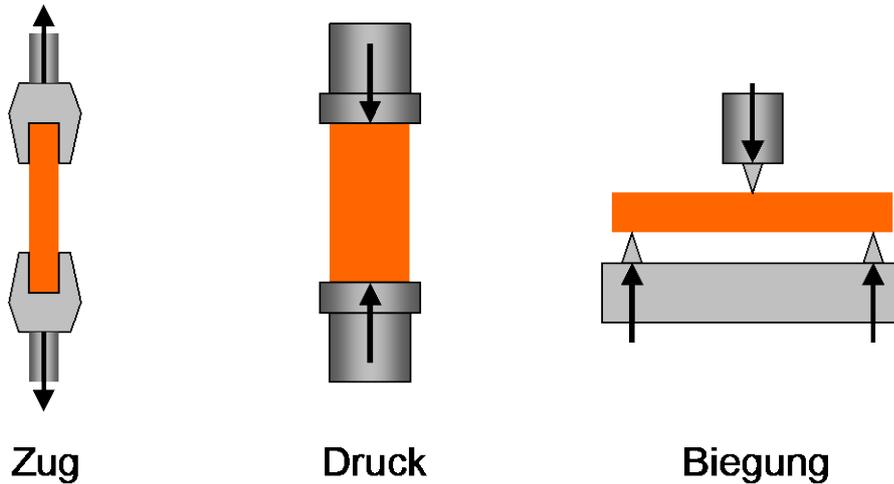


Bild 66: Wichtigste Arten der Beanspruchung von Baustoffen: Normalkräfte

8.2.1 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.

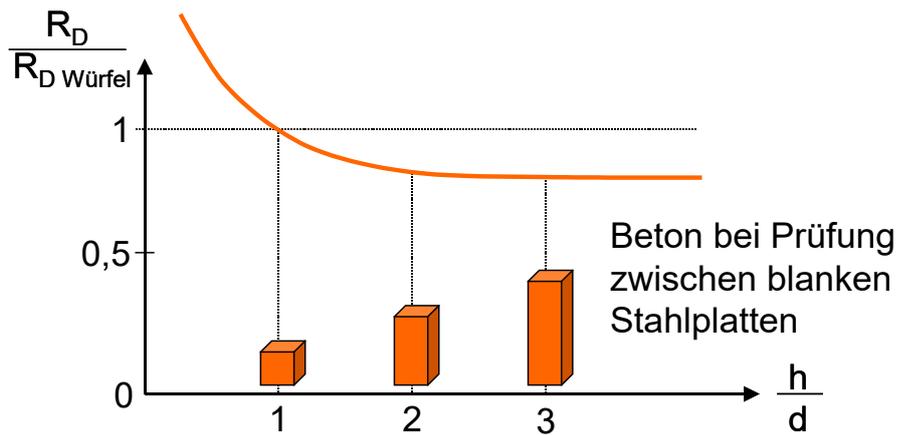
Tabelle 28 enthält den praktischen Bereich für die Druckfestigkeitswerte verschiedener Baustoffe.

Tabelle 28: 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 dreiaxigen 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 67).



Prismendruckfestigkeit $R_D \sim 0,75 - 0,85 R_{D \text{ W\u00fcrfel}}$

Bild 67: Einfluss der Schlankheit auf die Druckfestigkeit von Beton

Neben der **Gestalt** hat auch die **Gr\u00f6\u00dfe der Probe** einen Einfluss auf die im Versuch ermittelte Festigkeit. Bei gr\u00f6\u00dferen Proben ergibt die Pr\u00fcfung eine niedrigere Festigkeit, weil sich die Stahldruckplatten der Pr\u00fcfmaschine geringf\u00fcgig verformen. So haben 30 cm-Betonw\u00fcrfel eine 5 bis 10 % geringere Druckfestigkeit als 20 cm-W\u00fcrfel.

8.2.2 Zugfestigkeit

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

Die **zentrische Zugfestigkeit R_z** wird an stabf\u00f6rmigen Proben (z. B. Betonst\u00e4hlen) bestimmt (Bild 66). Es werden auch Zugproben verwendet, die zur Lasteinleitung an der Einspannstelle verst\u00e4rkt sind (vgl. Bild 62 und Bild 68 links). An Beton, Naturstein und \u00e4hnlichen Stoffen ist die axiale Zugfestigkeitspr\u00fcfung schwierig. Man pr\u00fcft deshalb ersatzweise die Spaltzug- oder Biegefestigkeit.

8.2.3 Spaltzugfestigkeit

Werden begrenzt gro\u00dfe K\u00f6rper durch linien- oder punktf\u00f6rmige Kr\u00e4fte belastet, so treten durch das "Umlenken" der Spannungen im Lasteinleitungsbereich senkrecht zur Lastrichtung Zugspannungen auf (Bild 68 Mitte). Dadurch ist es m\u00f6glich, in einer Druckpr\u00fcfmaschine mit dem relativ einfachen Spaltzugversuch die **Spaltzugfestigkeit R_{sz}** zu bestimmen, die meist eine \u00e4hnliche Gr\u00f6\u00dfe 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 gegen\u00fcberliegende Mantellinien mit Lasten F belastet wird, berechnet sich die Spaltzugfestigkeit nach den Gesetzen der Elastizit\u00e4tstheorie zu:

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

- d: Zylinderdurchmesser,
- l: Zylinderl\u00e4nge.

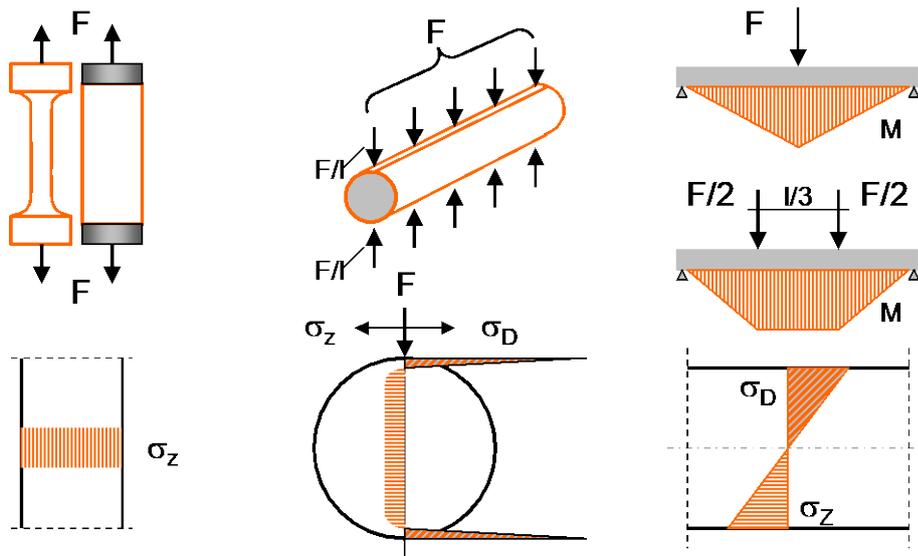


Bild 68: Prüfungsanordnung und Spannungszustände bei verschiedenen Zugbeanspruchungen

8.2.4 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 68 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).

8.2.5 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

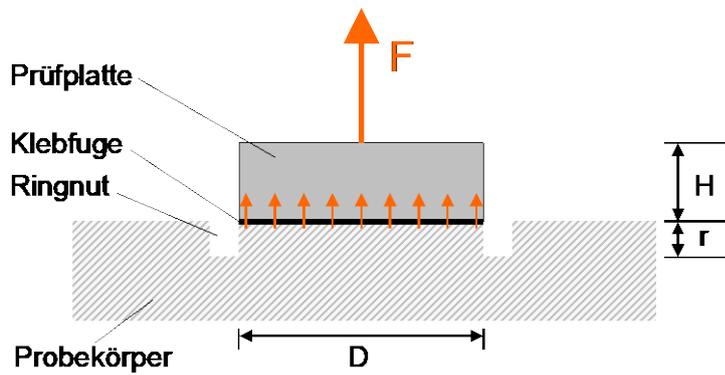


Bild 69: Schematische Darstellung einer Prüfplatte mit den Abmessungen $D:H = 2:1$

8.2.6 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 Klebefugen (Bild 70).

8.2.7 Torsionsfestigkeit

Die **Torsionsfestigkeit** R_T ist die Festigkeit bei Beanspruchungen durch Verdrehen (Bild 70).

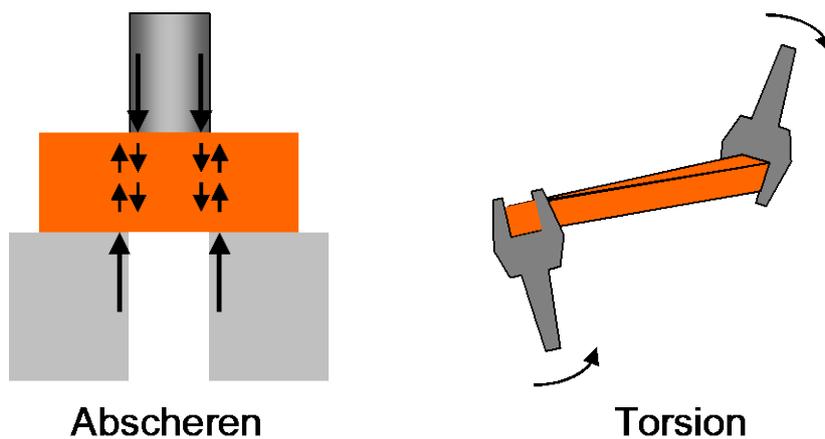


Bild 70: Wichtigste Arten der Beanspruchung von Baustoffen: Normalkräfte (Scher- und Schubbeanspruchung)

8.2.8 Schlagfestigkeit

Die **Schlagfestigkeit** ist der Widerstand gegen Schlag- bzw. Stoßbeanspruchung. Der Schlagbiegeversuch (Bild 71) 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 abgesplittert wurde. Der **Schlagzertrümmerungswert SZ** ist ein Kennzeichen für die Festigkeit von Gesteinssplitt.

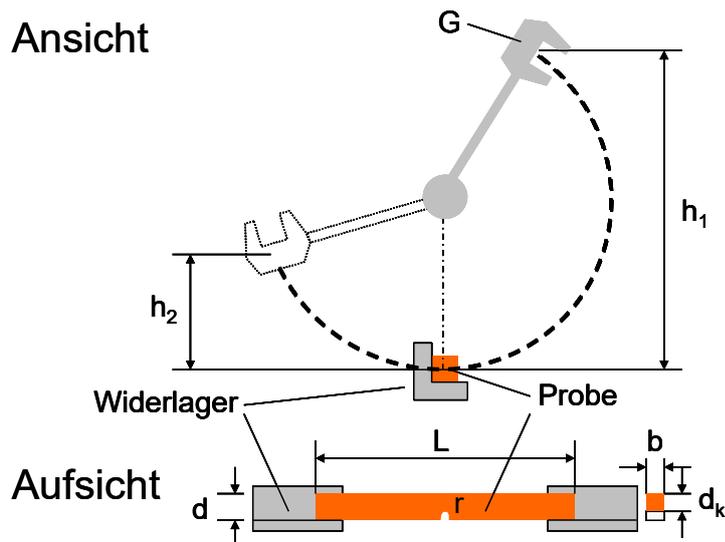


Bild 71: Kerbschlagversuch

8.3 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**.

8.4 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 72 und Bild 73). Dabei zeigt sich, dass die Festigkeit mit steigender **Lastspielzahl** kleiner wird, was in der "**Wöhlerkurve**" (Bild 74) 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.

Spannung

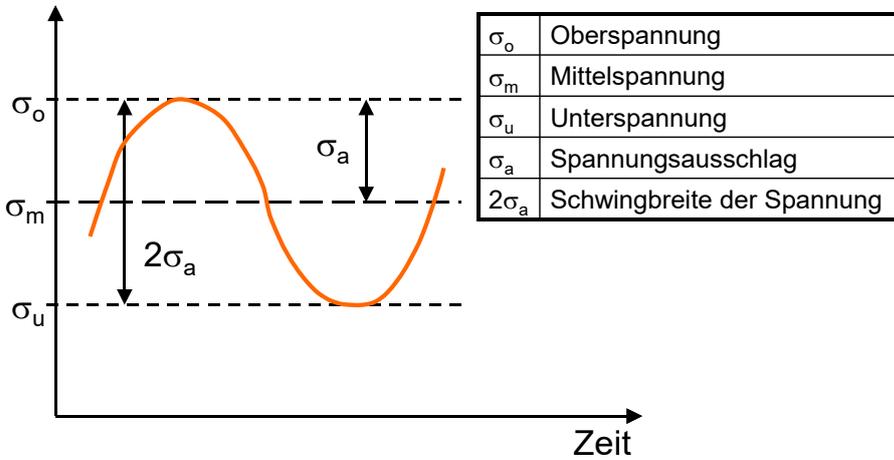


Bild 72: Begriffe der Dauerschwingbeanspruchung am Beispiel einer sinusförmigen Schwingung

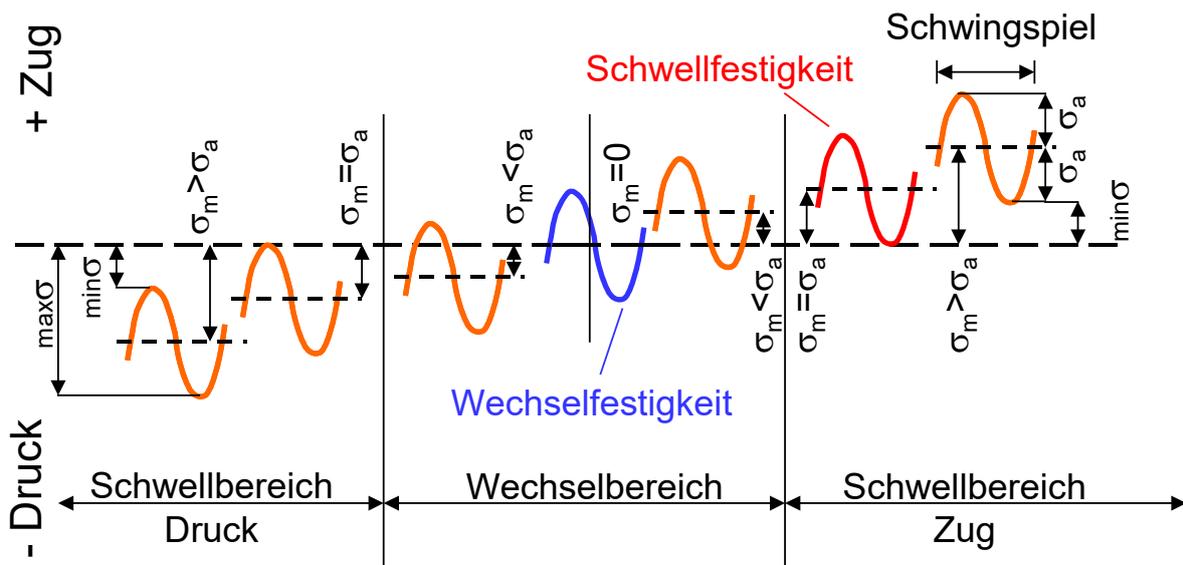


Bild 73: Beanspruchungsfälle im Dauerschwingversuch

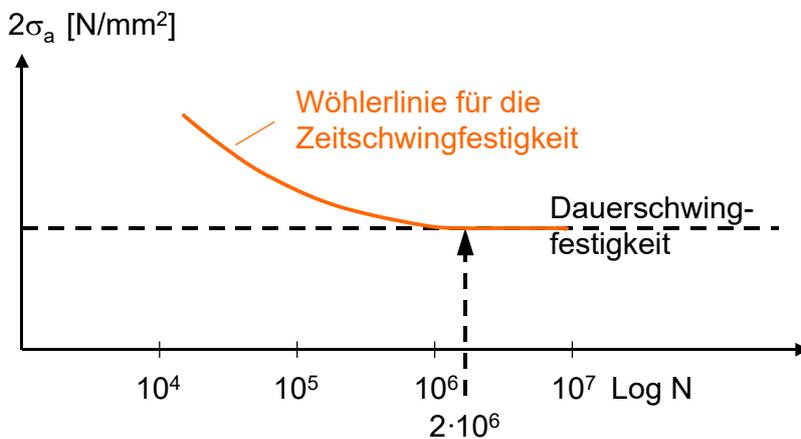


Bild 74: Wöhlerschaubild

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

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

σ_m : Mittelspannung,

σ_a : unendlich oft ertragbarer Spannungsauslag (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**.

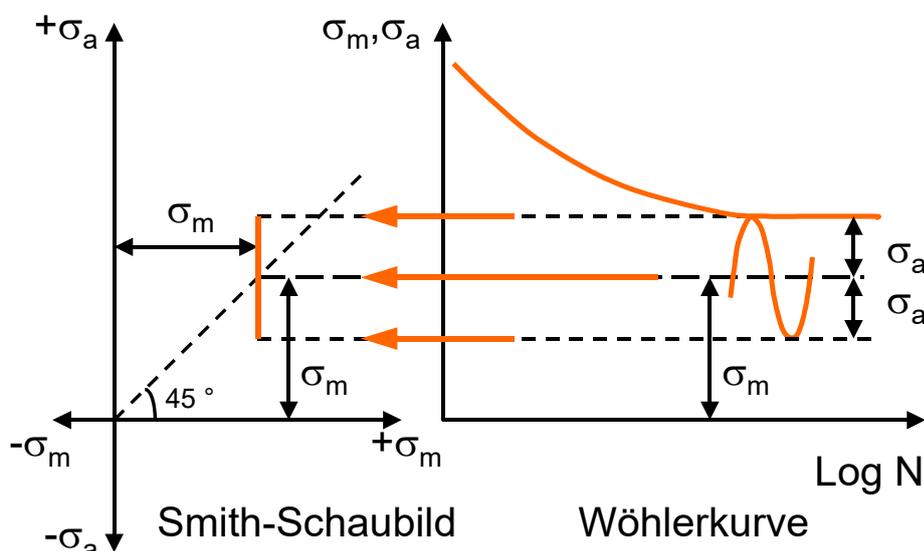


Bild 75: Entwicklung des Dauerfestigkeitsschaubilds nach Smith aus der Wöhlerlinie

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.

8.5 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 Böhmische Scheibe nach DIN 52 108 (Bild 76).

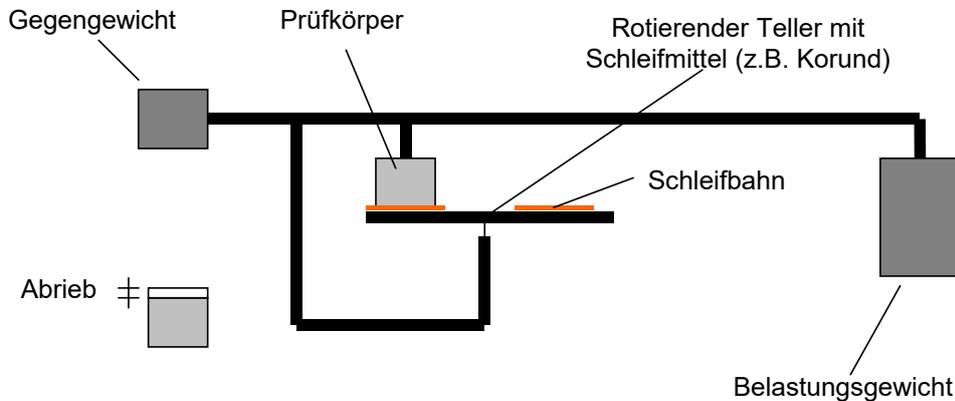


Bild 76: Verschleißprüfgerät nach Böhme

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.

8.6 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 Oberfläche eingedrückt werden (Bild 77). Die Härte wird als Quotient aus der Kraft F und der Eindruckfläche A angegeben.

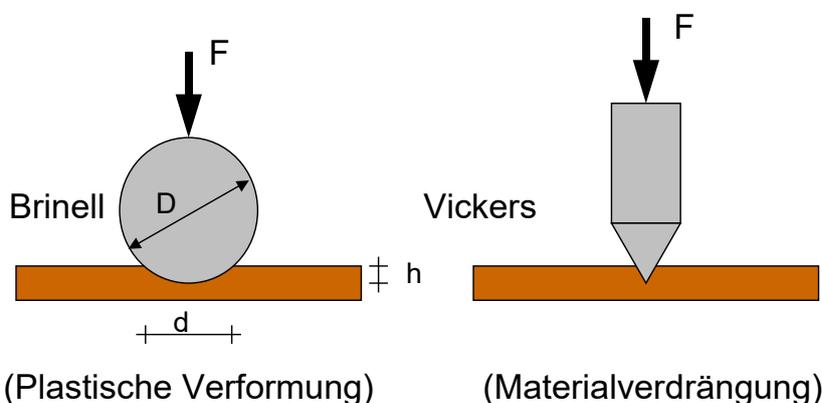


Bild 77: Prinzip der Härteprüfung nach Brinell und Vickers

Die Härte nach Mohs bezieht sich auf die gegenseitige Ritzbarkeit von Mineralien (Tabelle 29).

Tabelle 29: Härte verschiedener Minerale

Härte	Ritzhärte nach Mohs		Vickers-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)	Stahltaschenmesser	9120
7	Quarz	Stahl guter Feilen	10980
8	Topas		12260
9	Korund		20590
10	Diamant		98070

9 Beständigkeit

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.

9.1 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.

9.2 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 4.3) 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 Wechsell (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.

9.3 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.

9.4 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.

9.5 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.

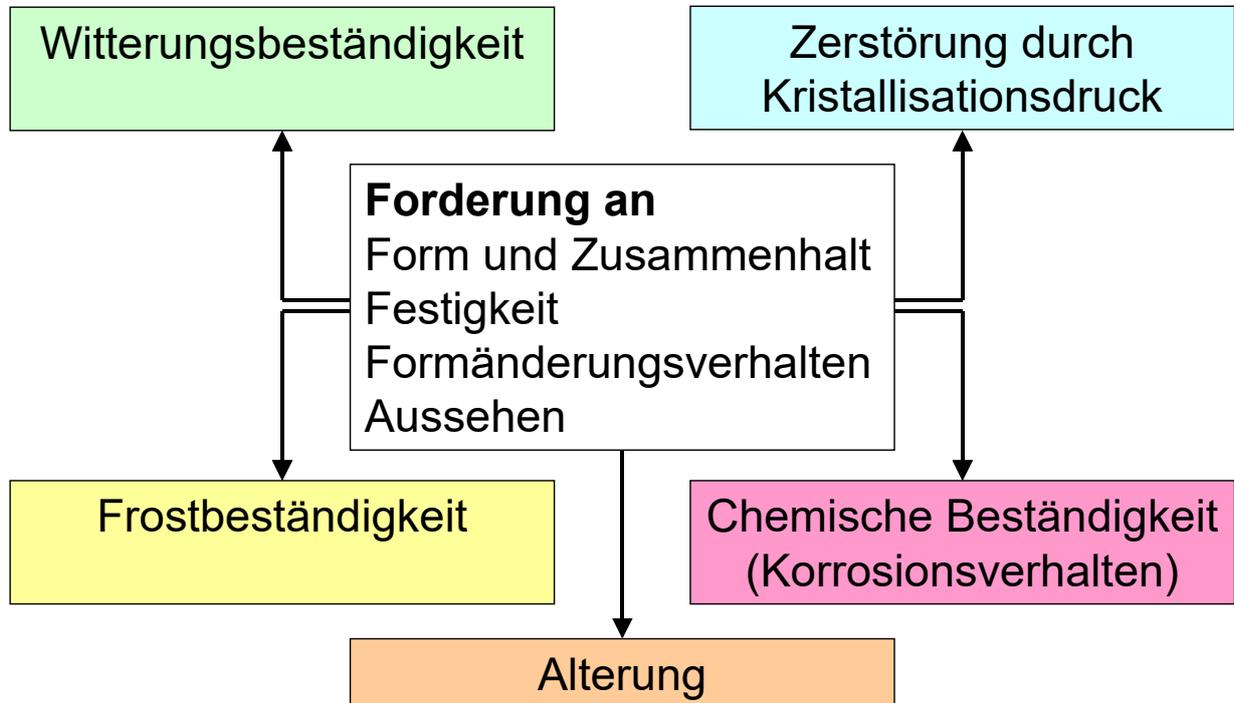


Bild 78: Beständigkeit

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 Nullpunkt Konstanz 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 30: 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 das

elektronische Signal der digitalen Uhren zur weiteren Verarbeitung mit einem Rechner abgerufen werden.

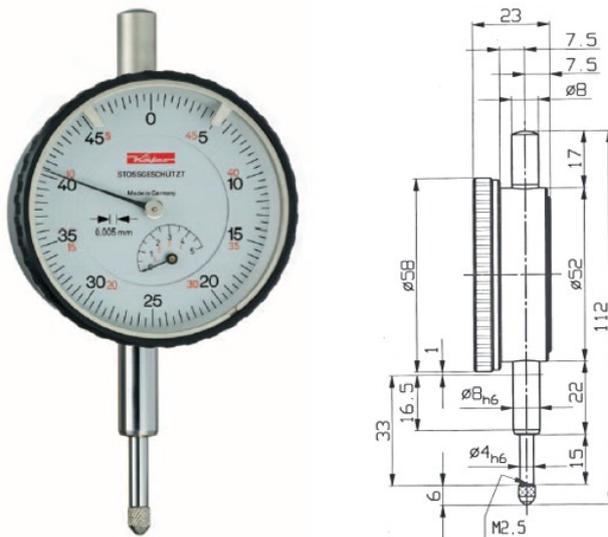


Bild 79: Messuhr nach DIN 878

10.2.2 Induktive Wegaufnehmer

Mit einem **induktiven Wegaufnehmer** (LVDT (linear variable differential transformer)) kann man Längenänderungen Δl messen. Durch die Verschiebung eines Taststiftes wird ein Eisenkern (Tauchanker) in einer Spule verschoben, wodurch der induktive Widerstand der Spule geändert wird. Die Änderung wird über eine Brückenschaltung verstärkt und elektrisch angezeigt. Die Ablesegenauigkeit erreicht 1/1000 mm bis 1/10000 mm.

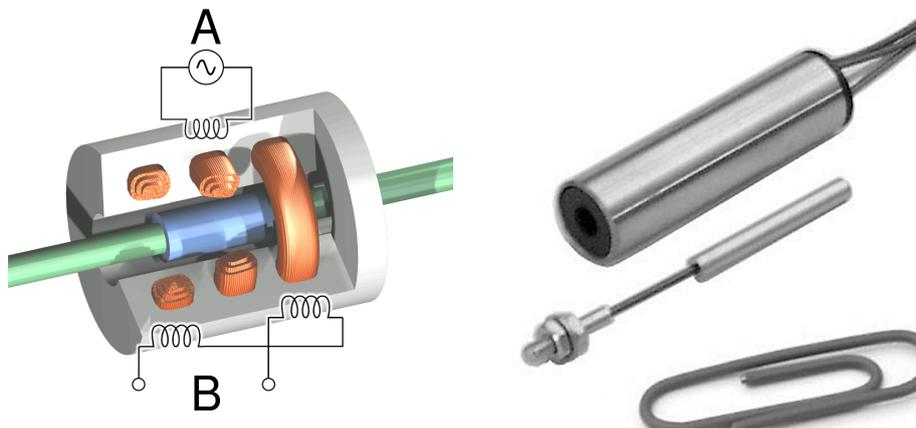


Bild 80: Induktiver Wegaufnehmer

10.2.3 Dehnmessstreifen

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.

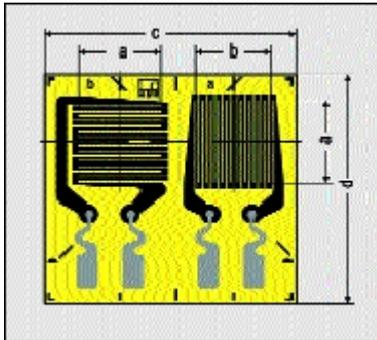


Bild 81: Aufbau eines Dehnmessstreifens

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 des Flüssigkeitsdrucks entstehende elastische Dehnung eines kleinen geschlossenen Gefäßes mit Dehnmessstreifen gemessen. Damit lassen sich die Kräfte sehr genau messen.

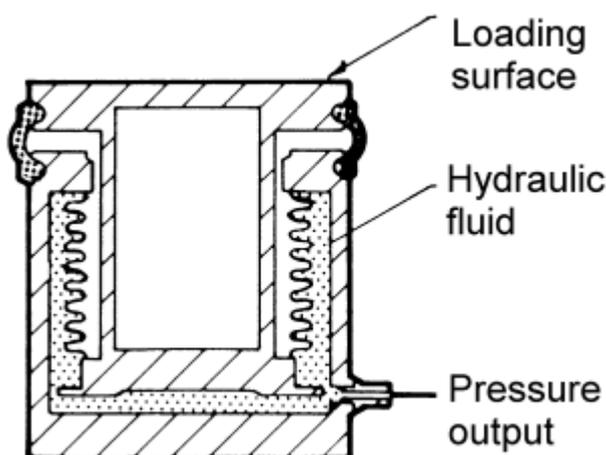


Bild 82: Kraftmessdose mithilfe von Öldruck

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.

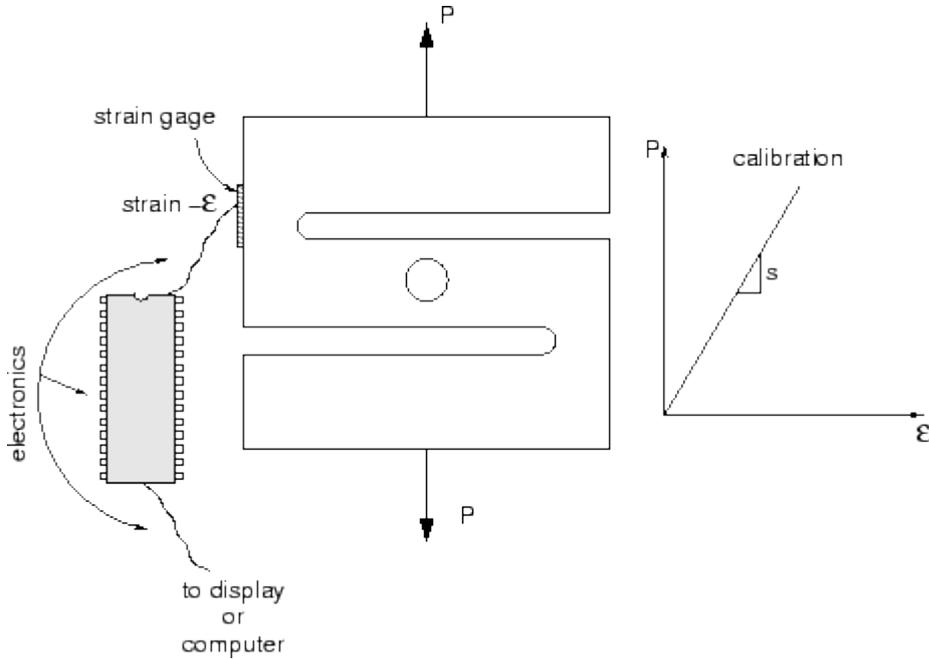


Bild 83: Kraftmessung mithilfe eines Dehnmessstreifens

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 verschieden 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 Prüfämtern 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).

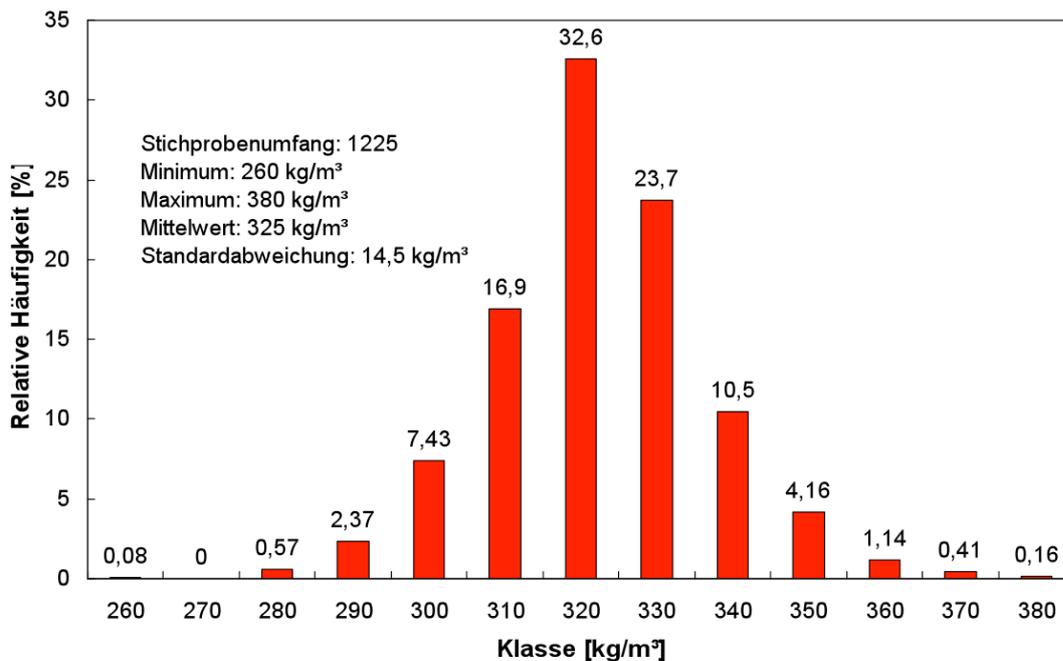


Bild 84: Histogramm

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

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

- 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-Fraktilewerten (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 Fraktilewert unterschreiten dürfen.

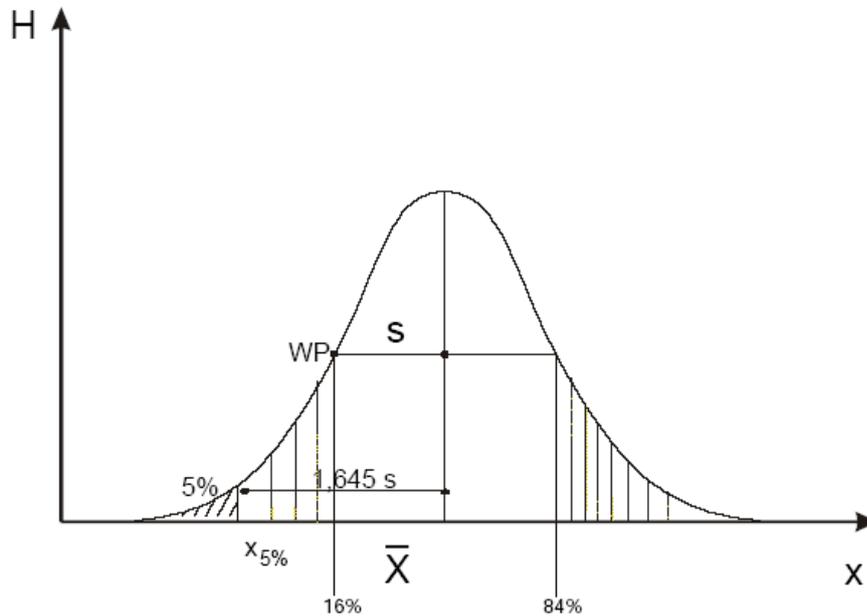


Bild 85: Normalverteilung

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

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

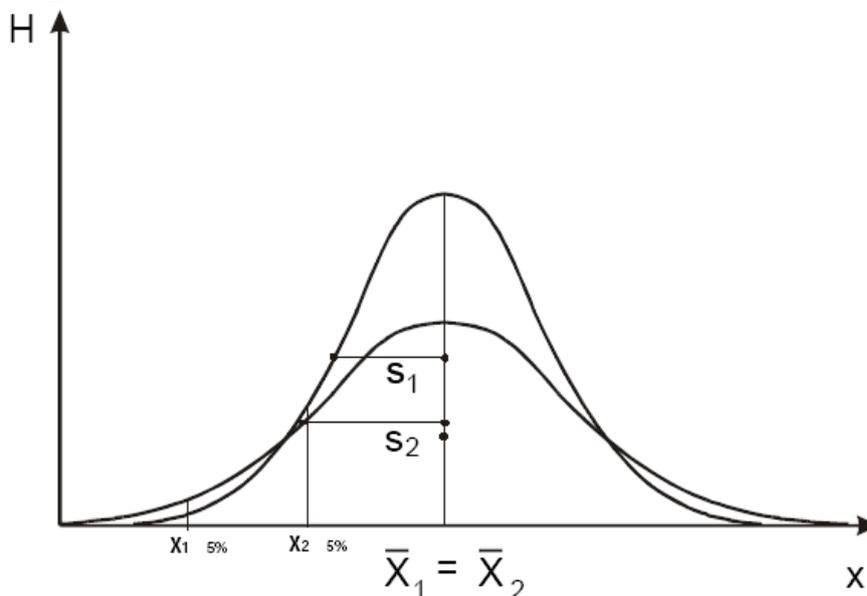


Bild 86: Normalverteilungen mit verschiedenen Standardabweichungen bei gleichem Mittelwert

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.

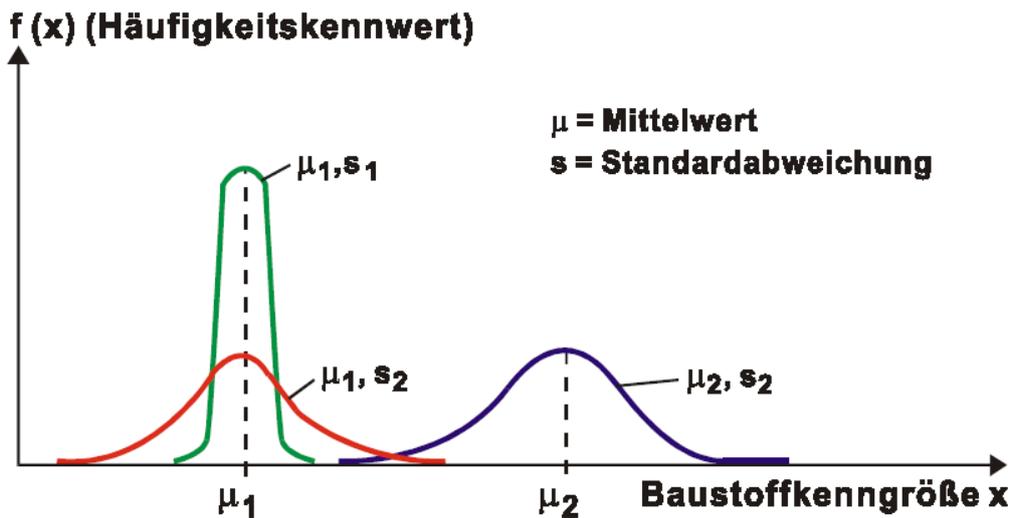


Bild 87: Verteilung mit gleichem Lage- oder Streumaß

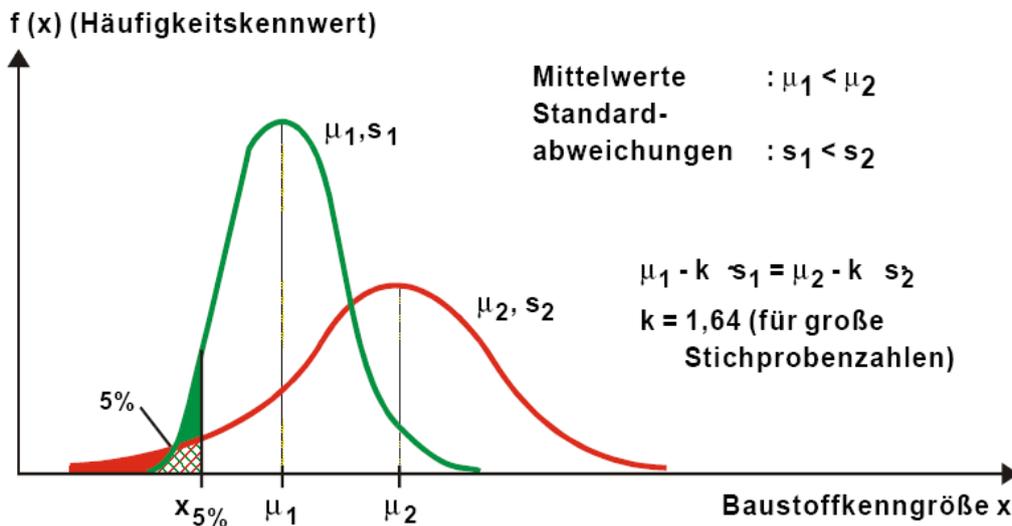


Bild 88: Zwei Grundgesamtheiten

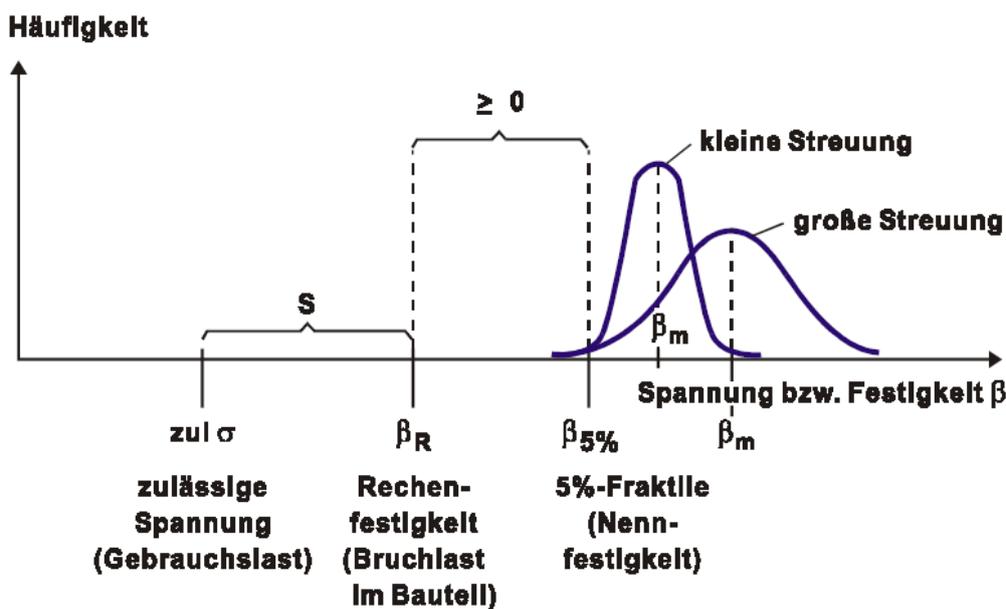


Bild 89: Schema einer Sicherheitsbetrachtung

13 Literatur

- [1] Rostásy, F.S., *Baustoffe*. 1983: Verlag W. Kohlhammer. 230 p.
- [2] Müller, H.S., *Baustofftechnologie Teil 1. Vorlesungsskript*. 2000, Universität Karlsruhe p.
- [3] *Anerkannte Regeln der Technik*. 2020 [cited 2020 24.09.2020]; Available from: https://de.wikipedia.org/wiki/Anerkannte_Regeln_der_Technik.
- [4] *Stand der Technik*. 2020 [cited 2020 24.09.2020]; Available from: https://de.wikipedia.org/wiki/Stand_der_Technik.
- [5] *Stand der Wissenschaft*. 2020 [cited 2020 24.09.2020]; Available from: https://de.wikipedia.org/wiki/Stand_der_Wissenschaft#Risikobetrachtung.
- [6] Bauministerkonferenz. *Musterbauordnung*. 2019, p. 75.
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen. *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)*. 2019, p. 599.
- [8] DIN 1045-1. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. 2001, p. 148.
- [9] Deutsches Institut für Bautechnik. *Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)*. 2017, p. 330.
- [10] Bayerisches Staatsministerium für Wohnen Bau und Verkehr. *Bauordnungsrecht*. 2020; Available from: <https://www.stmb.bayern.de/buw/baurechtundtechnik/bauordnungsrecht/index.php>.
- [11] Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union, *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 vom 9. März 2011 (Bauproduktenverordnung)*. Amtsblatt der Europäischen Union, 2011. L 88/5.
- [12] DIN 4108-4. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte (Thermal insulation and energy economy in buildings – Part 4: Hygrothermal design values)*. 2017, p. 47.
- [13] DIN 4108-2. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz (Thermal insulation and energy economy in buildings – Part 2: Minimum requirements to thermal insulation)*. 2013, p. 34.
- [14] ISO 7345, DIN E. *Wärmeverhalten von Gebäuden und Baustoffen – Physikalische Größen und Definitionen (Thermal performance of buildings and building components – Physical quantities and definitions)*. 2018, p. 22.
- [15] DIN EN ISO 6946. *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren (Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods)*. 2018, p. 62.
- [16] Kordina, K.; Meyer-Ottens, C., *Beton-Brandschutz-Handbuch*. 2 ed. 1999: Verlag Bau + Technik VBT. 282 p.
- [17] DIN EN 13055-1. *Leichte Gesteinskörnungen Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel (Lightweight aggregates — Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout)*. 2002, p. 39.
- [18] DIN 4102-1. *Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe. Begriffe, Anforderungen und Prüfungen (Behaviour of building materials and components in fire – Part 1: Building materials; definitions, requirements and tests)*. 1998, p. 28.
- [19] DIN EN 13501-2. *Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen (Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services)*. 2016, p. 84.