

2 Physikalische Grundlagen zu den Baustoffen

Die Suche nach Pflanzenrohstoffen für den Baubereich ist auch immer die Suche nach dem idealen Baustoff. Nur, es gibt keinen Baustoff, der alles kann, der alle bauphysikalischen, ökologischen, ökonomischen und ästhetischen Kriterien erfüllt. Die Suche nach dem optimalen Baustoff ist immer eine Entscheidung für den optimalen Kompromiss, bei dem eine Auswahl von Kriterien als Entscheidungshilfe dient.

Eine grundsätzliche Entscheidungshilfe sind die physikalischen Eigenschaften von Rohstoffen, die über den Einsatzbereich entscheiden. Dabei schließen sich bestimmte Kriterien, wie zum Beispiel hohe Diffusionsoffenheit und Feuchtigkeitsbeständigkeit, in der Regel aus.

Die weiteren Abschnitte beinhalten einen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von Rohstoffen für Wärmedämmstoffe im Bauwesen.

2.1 Dichte und Wärmedämmung

Die Rohdichte ist als Quotient aus der Masse eines Stoffes und dem eingenommenen Volumen definiert. Die Einheit ist kg/m^3 . Die Rohdichte beeinflusst weitere physikalische Eigenschaften der Stoffe, unter anderem die Wärmeleitfähigkeit. Baustoffe mit einer geringen Rohdichte weisen in der Regel ein hohes Hohlraumvolumen aus. Dies führt zu einer besseren wärmedämmenden Eigenschaft des Baustoffes.

Tabelle 2.1 Rohdichte von marktgängigen Baustoffen

Baustoff	Rohdichte [kg/m^3]
Baumwolle	20–60
Flachs	Ca. 30
Getreidegranulat	105–115
Hanf	Ca. 35
Holzfasern (WF)	150–190
Holzwohle-Platten (WW)	350–600
Kokosfasern	75–120
Kork, expandiert (ICB)	95–115
Schafwolle	25–30
Schilfrohr	190–225
Seegras	70–80
Stroh als Wärmedämmstoff	90–110
Wiesengras als Wärmedämmstoff	35–65
Reed (als Dach)	120–200

2.2 Wärmedämmung und Wärmespeicherung

Thermische Energie (Wärmeenergie) ist die Energie, die in der ungeordneten Bewegung der Atome gespeichert ist. Es ist die Fähigkeit eines Stoffes, zugeführte Wärme aufzunehmen, zu speichern und wieder abzugeben. Wärmeenergie zu speichern oder zu leiten ist eine spezifische Eigenschaft aller Stoffe, ob fest, flüssig oder gasförmig. Im Folgenden wird eine Reihe von stoffspezifischen Eigenschaften beschrieben.

Spezifische Wärmekapazität C

Das stoffbedingte Maß der Wärmeaufnahme wird als **spezifische Wärmekapazität** C [in kJ/kgK] bezeichnet. Die Wärmekapazität ist definiert durch die benötigte Wärmemenge Q , um die Masse m eines Stoffes um die Temperaturdifferenz von einem Kelvin zu erhöhen.

$$C = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Die Eigenschaft eines Stoffes zur Speicherung von Wärme ist stark abhängig von der Struktur und Rohdichte und wird mit einem speziellen Messverfahren, der Kalorimetrie, ermittelt. Typische Werte für die spezifische Wärmekapazität von Stoffen sind:

- Luft: 1 kJ/kgK
- Beton: 0,88 kJ/kgK
- Holz: 1,7 kJ/kgK
- Wasser: 4,2 kJ/kgK

Für das Bauwesen ist die Wärmespeicherfähigkeit von Stoffen bei zwei Anwendungen von wesentlicher Bedeutung:

- Schwere Bauweisen mit hoher Speichermasse haben ein günstigeres sommerliches Wärmeverhalten als Leichtbauweisen.
- Die Speicherung von Wärme für Heizung und Warmwasser.

Tabelle 2.2 Wärmespeicherkapazität von marktgängigen Baustoffen

Baustoff	Wärmespeicherkapazität C [J/kgK]
Baumwolle	840–1300
Flachs	1.640
Getreidegranulat	1950
Hanf	1.700
Holzfasern (WF)	Ca. 2000
Holzwolle-Platten (WW)	2100
Kokosfasern	1300–1600
Kork, expandiert (ICB)	ca. 1670
Schafwolle	960–1300
Schilfrohr	1200
Seegras	2.000
Stroh	Ca. 1000
Wiesengras	Ca. 2200

Wärmediffusion

Eine weitere für Baustoffe wichtige physikalische Eigenschaft ist die **Wärmeleitung**, auch **Wärmediffusion** genannt. Darunter versteht man den Wärmefluss in einem Feststoff oder ruhenden Feld durch einen Temperaturunterschied.

Ein Molekül wird durch Wärmezufuhr angeregt zu schwingen. Je nach Art des Stoffes reagiert das benachbarte Molekül in kürzerer oder längerer Zeit ebenfalls mit Schwingungen. Diese Weiterleitung der Schwingung ist ein Transport von Wärmeenergie. Die Wärmeleitung ist u. a. abhängig von dem Gefüge des Stoffes. Ein Baustoff mit dichtem Gefüge leitet die Wärme besser als ein Stoff mit weniger dichtem Gefüge. Metalle besitzen ein sehr dichtes Gefüge und leiten die Wärme sehr gut weiter. Holz besitzt ein weit weniger dichtes Gefüge und hat eine geringere Wärmeleitfähigkeit. Poröse Baustoffe mit Lufteinschlüssen leiten auf Grund ihrer Struktur und Dichte die Wärme nur sehr gering weiter.

Wärmeleitfähigkeit

Das Maß für die Wärmeleitung in einem bestimmten Stoff ist die **Wärmeleitfähigkeit λ** . Definiert ist die Wärmeleitfähigkeit durch die Wärmemenge, die bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin durch einen Materialwürfel von einem Meter Kantenlänge dringt. Gemessen wird die Wärmeleitfähigkeit in Watt pro Meter mal Kelvin [W/(mK)].

Typische Werte für Baustoffe sind:

• Aluminium:	160	W/mK
• Stahl:	50	W/mK
• Beton:	2,1	W/mK
• Holz:	0,13	W/mK
• Mineralwolle:	0,035–0,045	W/mK

Die Werte zeigen, dass durch Aluminium bei gleichem Querschnitt fast 5000 mal so viel Wärme fließt wie durch Mineralwolle.

Nach DIN 4108 „Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden“ dürfen Baustoffe mit einer Wärmeleitfähigkeit kleiner gleich 0,1 W/mK als Wärmedämmstoffe bezeichnet werden. Sehr gute Baustoffe weisen eine Wärmeleitfähigkeit unter 0,030 W/mK aus.

Die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst:

- Verwendete Feststoffe und deren Rohdichten
- Gefügebau der Feststoffe
- Art und Aufbau der Gaseinschlüsse
- Winddichtigkeit des Gefüges
- Feuchtigkeit und Temperatur des Baustoffes

Bei faserigen Baustoffen ist die Wärmeleitfähigkeit von der Faserstruktur und deren Orientierung abhängig. Die Leitfähigkeit bei homogenen Baustoffen ist dagegen stärker abhängig von der Porigkeit des Baustoffes. Feuchtigkeit in Baustoffen steigert im Allgemeinen die Wärmeleitfähigkeit. Das gilt besonders für Wärmedämmstoffe, deren wärmedämmende Eigenschaft durch einen hohen Feuchtegehalt deutlich reduziert werden kann.

Tabelle 2.3 Wärmeleitfähigkeit von marktgängigen natürlichen Dämmstoffen

Baustoff	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]
Baumwolle	0,040
Flachs	0,040
Getreidegranulat	0,050
Hanf	0,040
Holzfasern (WF)	0,040–0,090
Holzwolle-Platten (WW)	0,090
Kokosfasern	0,040–0,050
Kork, expandiert (ICB)	0,045–0,060
Schafwolle	0,040–0,045
Schilfrohr	0,055–0,090
Seegras	0,043–0,050
Strohballen	0,038–0,072

Wärmekonvektion

Eine weitere wichtige Eigenschaft ist die **Wärmemitführung**, auch **Wärmekonvektion** genannt. Sie bezeichnet einen Wärmetransport, der an ein gasförmiges oder flüssiges Medium gebunden ist. Durch die Bewegung des Mediums wird hierbei die Wärme übertragen. Die Bewegung kann z. B. in einer Flüssigkeit durch Rühren, bei Luft in Folge von Durchzug oder durch die Bewegung von Menschen hervorgerufen werden. Dämmstoffe auf Pflanzenfaserbasis müssen daher Winddicht eingebaut werden, um die Wärmekonvektion innerhalb der Dämmschicht möglichst gering zu halten.

Wärmestrahlung

Eine weitere wärmetechnische Eigenschaft ist die **Wärmestrahlung**. Sie ist eine elektromagnetische Strahlung, die ein Objekt abhängig von seiner Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit abgibt. Da alle Körper in einem Raum Wärmestrahlung abgeben, ergibt sich eine Strahlungsbilanz. Dabei geht in der Summe mehr Abstrahlung von einem Körper mit höherer Temperatur aus. Wärmestrahlung kann durch strahlungsundurchlässige Stoffe unterbrochen werden.

Der bei Dämmstoffen übertragene Anteil der Wärmestrahlung ist abhängig von der Rohdichte, den Lufteinschlüssen und der Strahlungsundurchlässigkeit des eingesetzten Rohstoffes. So erhöht sich im Allgemeinen der Strahlungsanteil bei geringerer Rohdichte.

Wärmeschutztechnische Kennzahlen

Weitere für das Bauwesen wichtige Werte sind der **Wärmedurchlasswiderstand**, **Wärmeübergangswiderstand**, **Wärmedurchgangswiderstand** und **Wärmedurchgangskoeffizient**. Dies sind keine materialspezifischen Werte, sondern Größen für die Ermittlung wärmeschutztechnischer Kennzahlen von Bauteilen.

Wärmedurchlasswiderstand

Der **Wärmedurchlasswiderstand** R ist die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ eines Baustoffes in Relation zur eingesetzten Stärke.

$$R = d/\lambda \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

Je größer der Wärmedurchlasswiderstand, umso größer ist die wärmedämmende Wirkung des Bauteils.

Wärmeübergangswiderstand

Der **Wärmeübergangswiderstand** innen wird als R_{si} bezeichnet, außen als R_{se} . Je nach Bauteil-lage – horizontal oder vertikal – weisen beide Wärmeübergangswiderstände unterschiedliche Werte auf.

Tabelle 2.4 Wärmeübergangswiderstände

	Richtung des Wärmestroms		
	Aufwärts	Horizontal	Abwärts
R_{si}	0,1	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Wärmedurchgangswiderstand

Der **Wärmedurchgangswiderstand** R_T errechnet sich aus der Summe aller Wärmedurchlasswiderstände und der Summe der Wärmeübergangswiderstände zwischen der Luft und der Bauteiloberfläche.

$$R_T = \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{\text{si}} + R_{\text{se}} \quad \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Wärmedurchgangskoeffizienten

Der Wärmeverlust über ein Bauteil wird über den **Wärmedurchgangskoeffizienten** U beschrieben. Die Einheit des Wärmedurchgangskoeffizienten ist $[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$. Der U -Wert wird durch den Kehrwert des Wärmeübergangswiderstandes gebildet

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Definiert ist der U -Wert über die Wärmemenge, die unter stationärer, d. h. zeitlich unveränderter Randbedingung in einer Sekunde zwischen einer 1 m^2 großen Oberfläche und der angrenzenden Luft bei einem Temperaturunterschied von 1 K ausgetauscht wird. Der U -Wert berücksichtigt die Wärmeübertragungseffekte Konvektion und Strahlung, die in dem inneren und äußeren Wärmeübergangswiderstand jeweils zusammengefasst sind.

Der Wärmetransport infolge Wärmeleitung durch ein Bauteil wird durch die Dicke und die Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Bauteilschichten beeinflusst.

Ein kleiner Wärmedurchgangskoeffizient führt zu geringerem Wärmeverlust in der Heizzeit – die Wärme bleibt im Gebäude. Im Sommer wirkt sich der kleine U -Wert ebenfalls positiv aus – die Wärme bleibt außerhalb des Gebäudes!

2.3 Feuchte und Diffusion

Feuchtigkeit in Form von Wasserdampf befindet sich in der Luft und im Allgemeinen auch in den Bauteilen. Die Wasserdampfmoleküle haben dabei das Bestreben, sich in allen Richtungen gleichmäßig zu verteilen.

Beispiel dazu ist der maximal mögliche Wassergehalt der Luft, der von der Temperatur abhängig ist. Je höher die Temperatur, umso mehr Feuchtigkeit kann in der Luft gespeichert werden. Bei 20° C kann Luft maximal 17,3 g/m³ Wasser aufnehmen, bei 0° C sind es nur noch 4,8 g/m³. Dies wird als Taupunkt bezeichnet. In kalter Winterluft ist also deutlich weniger Wasserdampf erhalten als in der warmen Innenraumluft. Kühlt die Innenraumluft auf den Weg nach draußen ab, fällt das überschüssige Wasser in flüssiger Form aus.

Transportmechanismen

Im Folgenden sind eine Reihe von stoffspezifischen Feuchtetransportmechanismen beschrieben.

Transportmechanismus durch Diffusion

Diffusion ist ein ohne äußere Einwirkung eintretender Ausgleich von unterschiedlichen Gaskonzentrationen. Eine Gaskonzentration löst sich dadurch auf, dass sich die Gasmoleküle in dem ihnen zur Verfügung gestellten Raum völlig gleichmäßig verteilen. Dieser Prozess geschieht von allein. Alle Gaskonzentrationen lösen sich auf. Das beschriebene Gesetz des Gasausgleichs bildet den Antrieb für die Trocknung feuchter Bauteile, auch wenn keine Luftströmung vorliegt. Gleichzeitig ist dieses Gesetz auch Ursache dafür, dass sich hygroskopische (wasserliebende) Stoffe wie Putze an die Raumluftfeuchte angleichen. Dadurch kann bei hoher Luftfeuchte die Basis für Schimmelbildung im Bereich von Wärmebrücken entstehen.

Wird ein Fußboden feucht aufgewischt, ist die sichtbare Feuchtigkeit nach wenigen Minuten verschwunden. Dieser Trocknungsprozess geschieht mittels Diffusion. Die höhere Konzentration an Wasserdampf über der feuchten Fläche verteilt sich, sie diffundiert in den restlichen Raum. Damit wird eine weitere Trocknung der Restfeuchte möglich. Lüftung bzw. Luftbewegung ist hierzu nicht erforderlich (sie kann eine Trocknung unterstützen bzw. beschleunigen). Dies zeigt sich z. B. bei ausgebauten Dachräumen ohne Hinterlüftung.

Wasserdampf-Diffusionswiderstand μ

Die Wasserdampfdurchlässigkeit eines Baustoffes wird durch den Wasserdampf-Diffusionswiderstand μ beschrieben. Dieser ist abhängig von der Dicke und Struktur des Materials. Dabei setzen Stoffe den Wasserdampf-Molekülen einen unterschiedlichen Widerstand entgegen. Dieser ist definiert durch den Wasserdampf-Diffusionskoeffizient δ , eine stoffbedingte physikalische Größe. Der μ -Wert ist definiert als der Quotient aus dem Wasserdampf-Diffusionskoeffizienten der Luft und dem des betreffenden Stoffes. Luft hat daher eine Wasserdampfdiffusions-Widerstandzahl von 1, Holz hat gegenüber Luft den 40-fachen Widerstand. Dies bedeutet, dass das Ausdiffundieren einer bestimmten Wassermenge aus Holz 40 mal so lange dauert wie aus Luft. Diese als μ -Wert bezeichnete Stoffeigenschaft ist für die Baustoffe in der DIN 4108 Teil 4 definiert.

Auszug DIN 4108 Teil 4:

Beton:	70/150 μ	Gipskartonplatten:	8 μ
Holz:	40 μ	Vollklinker 2200 kg/m ³ :	50/100 μ
Aluminiumlegierungen: praktisch dampfdicht ab 50 μ m Dicke			

Tabelle 2.5 Wasserdampf-Diffusionswiderstand von marktgängigen natürliche Dämmstoffe
(nach DIN 12086)

Baustoff	Wasserdampf-Diffusionswiderstand μ
Baumwolle	1–2
Flachs	1–2
Getreidegranulat	3
Hanf	1–2
Holzfasern (WF)	5–10
Holzwolle-Platten (WW)	2–5
Kokosfasern	1–2
Kork, expandiert (ICB)	5–10
Schafwolle	1–5
Schilfrohr	2–5

Transportmechanismus durch Flankendiffusion

Durch Flankendiffusion können bei innen und außen luft- und diffusionsdichten Konstruktionen Feuchteschäden auftreten. Wird die Dichtschicht auf der Bauteilinnenseite durch andere Bauteile durchbrochen, beispielsweise durch eine Innenwand, kann ein Feuchteeintrag durch Diffusion über die Innenwand erfolgen. Der Feuchteeintrag kondensiert im Bauteilinneren aus und kann nicht mehr entweichen. Die über die Heizperioden zunehmende Feuchtigkeit im Bauteilinneren zerstört systematisch die Bauelemente.

Abhilfe schafft eine Verringerung der Diffusionsvorgänge der die Dichtschicht durchbrechenden Bauteile oder eine Baukonstruktion mit einem höheren Trocknungsvermögen, bei der die eindiffundierte Feuchtigkeit wieder entweichen kann.

Transportmechanismus durch Konvektion

Eine Luftströmung (Konvektion) im Bauteil entsteht durch Undichtigkeiten in der Baukonstruktion. Über die Konvektion können wesentlich höhere Feuchtemengen in die Konstruktion transportiert werden als durch Diffusion. Dringt durch Undichtigkeiten warme Innenraumluft in das Außenbauteil ein, kühlt sich diese bei niedrigen Außentemperaturen auf dem Weg durch die Konstruktion ab. Durch das Abkühlen der Luft erhöht sich die Luftfeuchtigkeit. Wird die Taupunkttemperatur unterschritten, fällt Tauwasser innerhalb der Konstruktion aus.

Auch nach Außen hin diffusionsoffenere Baukonstruktionen können durch hohe Feuchtelasten gefährdet sein. Das kondensierte Wasser kann im kalten Winterklima gefrieren und zu einer Reif- und Eisbildung innerhalb des Bauteils führen. Da Wasser und Eis für Wasserdampf undurchlässig sind, wird der Feuchtestrom im Bauteil reduziert, so dass es zu Bauschäden kommen kann.

Ein Beispiel: Durch eine 1 mm breite und 1 m lange Fuge auf der Wandinnenseite können bis zu 0,8 Liter Wasser pro Tag in das Bauteil eindringen. Diese müssen durch das bauteilbedingte Trocknungsvermögen wieder austrocknen. Ansonsten kann es zu Bauschäden und Schimmelbildung kommen. Randbedingungen des Beispiels:

Dampfbremse s_d -Wert: 30m

Innentemperatur: +20° C

Außentemperatur: –10° C

Druckdifferenz: 20 Pa (Windstärke 2-3)

Messung: Institut für Bauphysik, Stuttgart

Transportmechanismus durch Kapillarität

Ein kapillar aktiver Stoff hat die Eigenschaft, Wasser aufzusaugen. Wasser breitet sich kugelförmig in dem kapillar aktiven Stoff aus und steigt dabei auch gegen die Erdanziehung nach oben. Bei der Kapillarität werden in der Regel wesentlich größere Wassermengen als durch die Diffusion transportiert.

Dieser Transportmechanismus ist besonders relevant bei Bauelementen, die einer Dauerfeuchte ausgesetzt sind, zum Beispiel Keller, Schwimmbäder und Zisternen.

Transportmechanismus durch Sorption

Bei der Sorption dringt Wasserdampf infolge von Diffusion in Materialien ein, wenn die Raumluftfeuchte höher ist als die Ausgleichsfeuchte im Material, und lagert sich an der inneren Oberfläche des Stoffes an. Sinkt die Raumluftfeuchte unter die Ausgleichsfeuchte im Material, so lösen sich Wassermoleküle wieder von der inneren Oberfläche des Stoffes ab und diffundieren zurück in die Raumluft.

Der Wasserdampf wird bei Sorptionsvorgängen lediglich zwischengespeichert und phasenverschoben wieder an die Raumluft abgegeben. Eine hohe Wasserdampfsorption in Räumen hat somit den Vorteil, dass eine direkte Kopplung von Wasserdampfabfuhr und Wasserdampfproduktion nicht notwendig ist. Die Wasserdampfabfuhr kann zeitlich versetzt zur Produktion erfolgen. Bauteile und Elemente der Raumausstattung wirken sich somit klimaregulierend aus. Damit Feuchteschäden nicht auftreten, muss ein Mindestluftwechsel gewährleistet sein, um zu vermeiden, dass sich an Innenoberflächen Tauwasser niederschlägt. Die Grafik zeigt das Sorptionsverhalten verschiedener Wandaufbauten nach einer sprunghaftesten Erhöhung der rel. Luftfeuchte von 40 % auf 80 % bei 20 bis 25° C. Der Beton mit Tapete hat eine sehr niedrige Sorption, Holzfaserdämmplatten haben dagegen eine hohe Sorption.

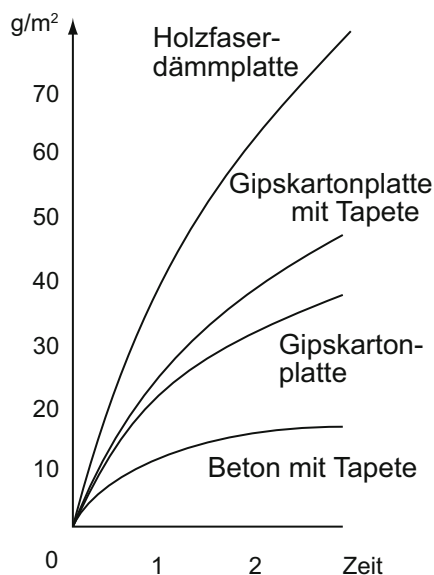


Bild 2.1: Holzweichfaserplatten haben deutlich höhere Sorptionseigenschaften als zum Beispiel Beton mit Tapete (Datengrundlage: Borsch-Laaks: Sorption, Diffusion, Kapillarleitung)

2.3.1 Feuchtebilanz

Die in einem Raum herrschende Luftfeuchte wird bestimmt von:

- der Feuchteproduktion im Raum
- dem Luftaustausch mit der Außenluft (Luftwechsel) und gegebenenfalls Nachbarräumen sowie deren Temperatur und Feuchte
- den Sorptionseigenschaften der Raumumschließungsflächen sowie des Mobiliars oder anderer Gegenstände im Raum
- dem Feuchtetransport durch Außenbauteile

Ihre Berechnung erfolgt mit Hilfe der Feuchtebilanz über den Raum. Vernachlässigt man den betragsmäßig geringen Anteil des Feuchtetransports durch Außenbauteile infolge Diffusion und die komplexen Sorptionsvorgänge, so ergibt sich die relative Luftfeuchte in einem Raum unter stationären Bedingungen aus folgender Gleichung:

$$\varphi_i = \varphi_a \cdot \frac{p_{SA}}{p_{Si}} + \frac{m_i \cdot R_D \cdot T_i}{n \cdot V_i \cdot p_{Si}}$$

mit

φ_i	Relative Feuchte der Raumluf	[-]
φ_a	Relative Feuchte der Außenluft	[-]
p_{SA}	Sättigungsdampfdruck der Außenluft	[Pa]
p_{SR}	Sättigungsdampfdruck der Raumluf	[Pa]
m_R	Feuchteproduktion im Raum	[kg/h]
R_D	Gaskonstante von Wasserdampf	462 (Pa m ³ /kg K)
T_R	Lufttemperatur im Raum	[K]
V_R	Luftvolumen des Raumes	[m ³]
n	Luftwechsel des Raumes	[h ⁻¹]

Natürliche und pflanzliche Baustoffe

Rohstoff - Bauphysik - Konstruktion

Holzmann, G.; Wangelin, M.; Bruns, R.

2012, XI, 394 S. 337 Abb. in Farbe., Hardcover

ISBN: 978-3-8348-1321-3