

Zum Feuchteverhalten in kapillaraktiven und porösen Werkstoffen

Feuchte und Feuchtetransport

1	Fragestellung	1
2	Physikalische Grundlagen	1
3	Feuchtespeicherung in Werkstoffen	2
3.1	Sorption	4
3.2	Diffusion	5
3.3	Oberflächendiffusion	5
4	Tatsächlicher, kombinierter Wassertransport	5
4.1	Wassergehalt in den Kapillaren und Luftporen	6
5	Messungen der Diffusion nach DIN EN ISO 12572 - Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß - (Cup-Messungen)	7
6	Zusammenfassung	8

1 Fragestellung

Sind in den Messungen nach DIN EN ISO 12572 eine Feuchtevariabilität des Werkstoffes

- messbar
- darstellbar
- mit gemessen.

Hintergrund ist hierbei ein verändertes diffusionstechnisches Materialverhalten im niedrigen Feuchtebereich im Vergleich zum hohen Feuchtebereich.

2 Physikalische Grundlagen

Die Transportmechanismen des Wassers in Werkstoffe hinein oder durch sie hindurch können unterschiedlicher Art sein und hängen von dem vorliegenden Aggregatzustand des Wassers ab. Der Transport des Wassers benötigt eine Antriebskraft. Diese kann als potentielle, kinetische, elektrostatische, sorptive, druckabhängige oder thermische Energie auf das Wasser einwirken. Durch Zufuhr oder Entzug von Energie verändert sich der Zustand des Wassers und dessen Reaktion mit der Umgebung. Je nach Luftdruck und Temperatur kann Wasser in den drei Aggregatzuständen fest, flüssig oder gasförmig vorliegen. Alle drei Zustände sind in Abbildung 1 mit den jeweiligen Übergangsbereichen dargestellt. Der Punkt, an dem Wasser in allen Phasen gleichzeitig vorliegen kann, nennt man Tripelpunkt.

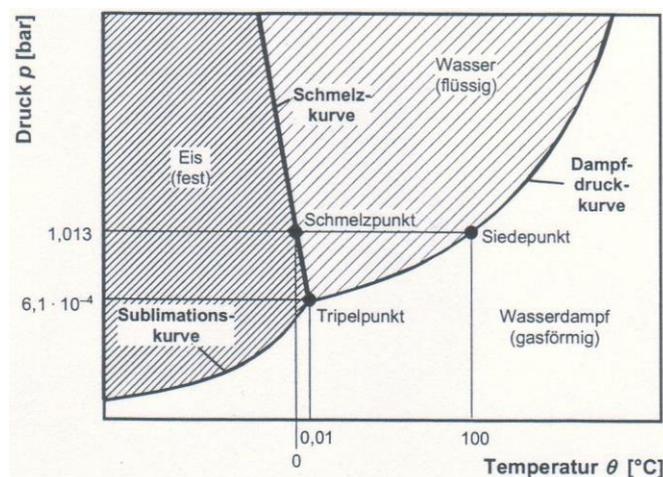


Abbildung 1 Zustandsdiagramm des Wassers

Zu den im Bauwesen wichtigsten Transportmechanismen des Wassers in den unterschiedlichen Aggregatzuständen zählen:

- Sorption oder Adsorption / Desorption
- Diffusion
- Kondensation, Verdunstung
- Konvektion
- Osmose, Elektrokinese
- Kapillare Wasserleitung
- Strömung von flüssigem Wasser

Die beiden erstgenannten Wassertransportmechanismen bilden zusammen die Permeation. Dies ist ein dreistufiger Vorgang bei dem auf molekularer Ebene zuerst durch Sorption der diffundierende Stoff an die kontaktierende Oberfläche des Diffusionsmediums, durch das die Diffusion stattfindet, angelagert oder aufgenommen wird.

Danach werden die einzelnen Moleküle mittels der verschiedenen Arten der Diffusion durch das Medium hindurch transportiert und im Anschluss daran durch Desorption von dem Diffusionsmedium wieder an die Umgebung abgegeben. Beide Mechanismen laufen im hygrokopischen Bereich ab.

Die anschließenden Wassertransporte erfolgen in porösen Medien über Kapillarität, also im überhygrokopischen Bereich. Die Neudefinition des Feuchtepentials, verbindet die Transportmechanismen mit den Feuchtegehalten und der Porengröße und grenzt somit den hygrokopischen und überhygrokopischen Feuchtebereich eindeutig voneinander ab.

3 Feuchtespeicherung in Werkstoffen

Grundsätzlich ist der Feuchtehaushalt von hygrokopischen porösen Baustoffen durch die Feuchtespeichereigenschaften und durch die Feuchtetransportvorgänge in gasförmiger und flüssiger Form gekennzeichnet. Es werden drei Bereiche der Feuchtespeicherung unterschieden, der Sorptionsfeuchtebereich (Bereich A), der Kapillarwasserbereich (Bereich B) sowie der Übersättigungsbereich (Bereich C), auf die nachfolgend näher eingegangen wird.

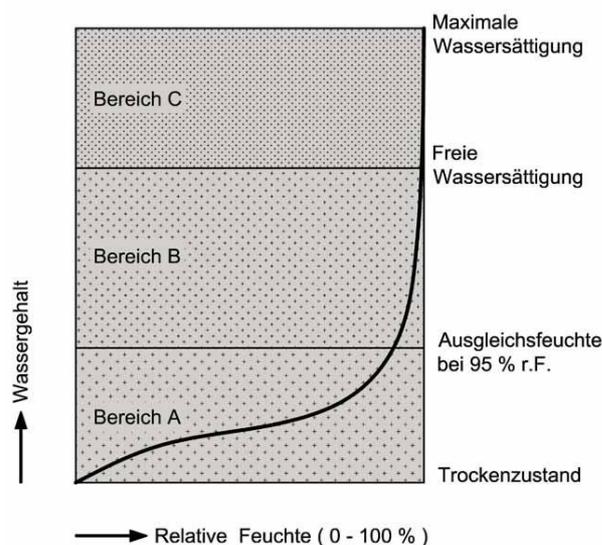


Abbildung 2: Feuchtespeicherfunktion bzw. Wassergehaltsbereich eines hygrokopisch kapillaraktiven Baustoffes

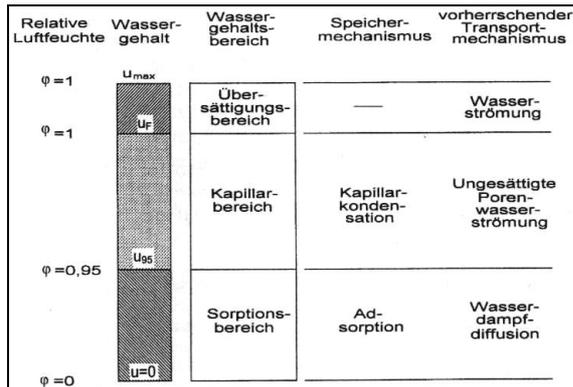


Abbildung 3: Wassergehaltsbereich eines hygroscopisch kapillaraktiven Baustoffes

- Der Sorptionsfeuchtebereich (hygroscopischer Bereich) wird durch die Anlagerung (Adsorption) von Wassermolekülen aus der umgebenden feuchten Luft bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes bestimmt. Die maximal erreichbare Gleichgewichts- bzw. Ausgleichsfeuchte liegt bei etwa 95 %, wobei sich die anfallenden Wassergehalte durch die Wasserdampfsorption ergeben.
- Kapillarwasserbereich (überhygroscopischer Bereich) beschreibt den Bereich ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 %, bei der die Sorptionsisotherme [Kap.3.1] stark ansteigt. Hier ist eine eindeutige Zuordnung des Wassergehaltes zur relativen Luftfeuchte nicht mehr möglich, da es kein Messverfahren gibt, mit dem die Luftfeuchtigkeit mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.
Der Bereich ist durch die Eigenschaft von kapillarporösen Materialien gekennzeichnet, Wasser bis zum Erreichen der freien Wassersättigung u_F (auch: freiwilliger Wassergehalt) aufnehmen zu können. Dies geschieht zum einen durch den Kontakt mit flüssigem Wasser und zum anderen durch den Kontakt mit einem anderen überhygroscopisch feuchten Stoff, bis ein Gleichgewicht erreicht wird. Somit erfolgt die Wasseraufnahme im Gegensatz zum Sorptionsfeuchtebereich nicht durch den Kontakt mit feuchter Luft, sondern ausschließlich über den Kontakt mit flüssigem Wasser.
Die freie Wassersättigung gibt jene Stofffeuchte an, die durch freies Saugen ohne Einwirkung von äußeren Kräften unter Normaldruck erreicht werden kann. Die in einigen Poren eingeschlossene Luft verhindert ein Erreichen des maximal möglichen Wassergehaltes u_{max} , welcher einer völligen Füllung aller dem Wasser zugänglichen Hohlräume entspricht.
- Übersättigungsbereich
Eine Überschreitung der freien Wassersättigung ist nur durch die Anwendung eines äußeren Drucks (zum Beispiel Grundwasser), dem Anlegen eines Unterdruckes oder einer langen Wasserlagerung zum Entfernen der Lufteinschlüsse sowie durch Kondensation beim Erreichen des Taupunkts möglich. Die relative Luftfeuchte beträgt unabhängig vom Wassergehalt 100 %, und es liegen keine Gleichgewichtszustände mehr vor.
Eine Zuordnung des Wassergehaltes zur Saugspannung ist im Übersättigungsbereich nicht möglich, da sich beim Füllen einer bislang durch eine Luftblase eingeschlossene Pore zwar der Wassergehalt ändert, die Saugspannung hingegen nicht.

3.1 Sorption

Sorption, auch als Adsorption bezeichnet, ist die Anlagerung von Wasser aus der umgebenden Luftfeuchte an ein Material. Bis zum Erreichen des natürlichen Wassergehaltes, der so genannten Gleichgewichtsfeuchte, wird Wasser in Molekülform an den Oberflächen des Materials angelagert. Diese Anlagerung kann an der Außenseite oder auch im Inneren des der Feuchte ausgesetzten Stoffes geschehen. Anlagerungsebene ist bei porösen Stoffen die Oberfläche der Poren. Es wirken ausschließlich van-der-Waals Kräfte, wie Dispersions- und Dipolwechselwirkungen zwischen Adsorpt und Adsorbens.

Bei porösen Stoffen lagert sich das Wasser unter einem exothermen Vorgang, also bei Wärmeabgabe, in mono- oder multimolekularen Schichten an der Oberfläche an, und ist von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Oberfläche des Materials sowie dem Durchmesser der Poren abhängig. Diese Anlagerung von Wassermolekülen erfolgt nur solange bis ein Gleichgewicht zwischen der Wasseraktivität in der Luftfeuchtigkeit und der Wasseraktivität der mono- oder multimolekularen Schichten an der Materialoberfläche herrscht. Diese Art der Sorption verläuft nach der BET-Theorie, die im Jahre 1938 von Brunauer, Emmett und Teller veröffentlicht wurde. Aufgrund ihrer Wirklichkeitsnähe kann mit Hilfe von Edelgasen auch die Oberfläche von porösen Festkörpern oder Pulvern gemessen werden. Unter der Oberfläche sind nicht nur die nach außen gerichteten Oberflächen, sondern auch die inneren, von Gas erreichbaren Porenoberflächen gemeint. Die ersten drei Schichten, die sich nach dieser Theorie an diese Oberfläche anlagern, werden als strukturiertes Oberflächenwasser bezeichnet. Hierdurch kann es in den Gelporen zur Kapillarkondensation kommen, sodass die Pore mit flüssigem Wasser gefüllt wird. Dies geschieht bereits im Luftfeuchtebereich zwischen 0 – 50 %.

Der umgekehrte Prozess, bei dem Wasser von Stoffen an die Umgebung abgegeben wird, bezeichnet man als Desorption. Hierbei verringert sich der Wassergehalt des Stoffes solange bis die Wasseraktivitäten im Stoff und in der Umgebung gleich groß sind.

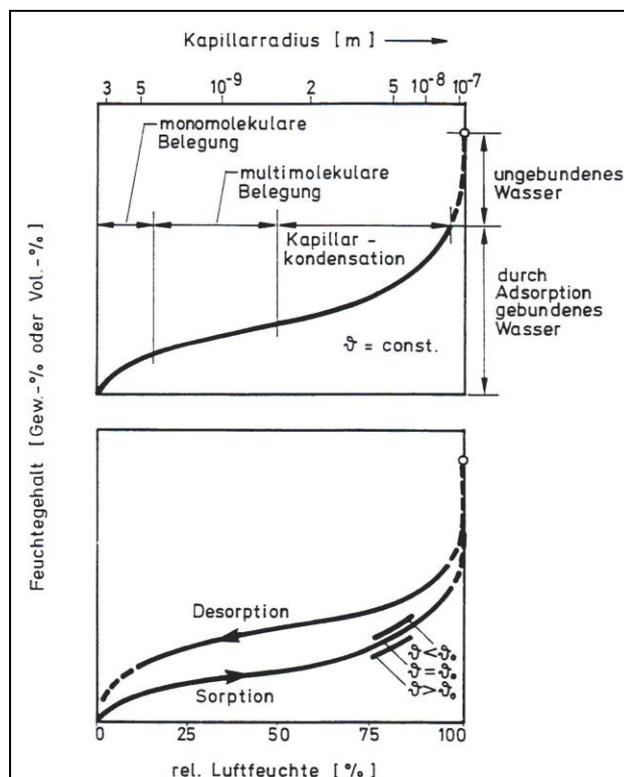


Abbildung 4: Sorptionsisotherme eines hygroscopischen porösen Baustoffes

3.2 Diffusion

Die im Weiteren behandelte Diffusion in Gasen und Flüssigkeiten soll den drei folgenden Definitionen entsprechen:

- Wasserdampfdiffusion ist ein langsam ablaufender Vorgang. Als Diffusion wird der Stofftransport im molekularen Bereich infolge der Eigenbewegung der Moleküle bezeichnet.
- Stofftransport, der auf der Eigenbewegung von Molekülen infolge ihres Energieinhalts beruht (Brown'schen Molekularbewegung) und nur durch den Impulsaustausch der Moleküle untereinander gekennzeichnet ist.
- Die auf der Wärmebewegung (Brown'schen Molekularbewegung) der Moleküle beruhende, selbstständige Vermischung von Gasen, Lösungen oder mischbaren Flüssigkeiten.

Die Diffusion ist ein Transportvorgang beim molekularen Bereich und wird angetrieben durch Wärmeenergie, die den einzelnen Molekülen innewohnt, und durch räumliche Molekülkonzentrationsunterschiede.

3.3 Oberflächendiffusion

An dieser Stelle nur die, doch entscheidende, Oberflächendiffusion beschrieben werden.

Die Oberflächendiffusion findet ausschließlich in porösen Materialien statt und ist mit der durch sie transportierten Wassermenge stark von der inneren Oberfläche des Diffusionsmediums abhängig. In den untersuchten Stoffen kann theoretisch auch diese Art der Diffusion vorkommen (gerade bei den Diffusionsdichteren Stoffen), doch soll sie an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Ihr Antrieb besteht aus der unterschiedlichen Schichtdicke des Sorbatfilms auf den inneren Porenoberflächen und folgt dem Fick'schen Gesetz. Die Dicke dieser Sorbatschicht folgt aufgrund der Gleichgewichtstheorie dem Partialdruckgefälle.

4 Tatsächlicher, kombinierter Wassertransport

4.1 Randbedingungen

Um den Wassertransport, auch nach Abbildung 5, zu erläutern sind folgende Randbedingungen zu beachten.

1. Der Werkstoff ist zu Beginn des Prozesses vollständig trocken.
2. In einem trockenen Baustoff findet kein Wassertransport statt.
3. Der Antrieb, der den Prozess startet und richtet, ist von einer Differenz des Wasserdampf- Partialdruckes abhängig.
 - a. somit von dem Feuchtegehalt des Wasserdampf- / Luftgemisches
 - b. somit von der Temperatur.

In dem Beispiel nach Abbildung 1 ist der Partialdruck des Wasserdampfes auf der linken Seite des Bauteils größer als auf der rechten Seite. Die Diffusionsstromrichtung ist somit von links nach rechts.

4. Der Prozess ist abhängig vom Wassergehalt in den Poren und von der Porengröße
 - a. somit von Wasserdampf-Sättigungsdruck in den Kapillaren und den Poren
 - b. somit von der Kapillarkondensation, die in keinen Räumen früher eintritt als in großen Räumen.

4.2 Wassergehalt in den Kapillaren und Luftporen

Dargestellt ist dem Beispiel eine (Teil-)Kapillare links und rechts an einer Pore (Mitte).

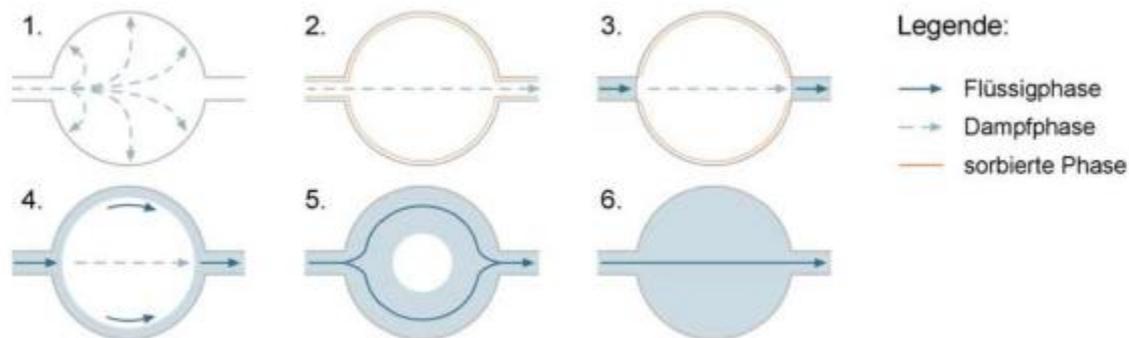


Abbildung 5. Feuchtetransportarten in porösen Baustoffen

Bedingt durch den unterschiedlichen Partialdrücke des Wasserdampfes links und rechts vom Werkstoff werden die Wasser- (und auch die Luft-) Moleküle von links nach rechts in und durch den Querschnitt gepresst.

- Zustand 1 – reine Absorption
Der eindringende Wasserdampf/ eindringenden Wassermoleküle werden an den Porenwänden adsorbiert und somit nicht weitertransportiert.
- Zustand 2 – Ende der Absorptionsphase
Nachdem die Porenwänden mit mehreren Molekülschichten belegt sind, entfallen die Adsorptionskräfte und der Wasserdampf diffundiert in die anschließenden Kapillaren.
- Zustand 3 – Kapillarkondensation
Bei steigendem Wasserdampfgehalt sind die Kapillaren auf Grund der beginnenden Kapillarkondensation mit flüssigem Wasser gefüllt. Der Wassertransport erfolgt nun in den Poren durch Diffusion und in den Kapillaren durch Kapillarkräfte.
- Zustand 4 – Kapillartransport in Kapillaren und an den Porenwänden und Diffusion über den Porenraum
In der vierten Phase ist die Dicke der adsorbierten Schicht soweit angewachsen, dass infolge der Oberflächendiffusion ein verstärkter Wassertransport stattfindet.
- Zustand 5 und 6 – reiner Kapillartransport
In den letzten beiden Phasen ist in den Poren und Kapillaren soviel Wasser enthalten, dass das Wasser zum einen durch Kapillarkräfte und zum anderen auf Grund eines hydraulischen Gefälles nach dem Darcy'schen Gesetz bewegt wird.

Aus Abbildung 5 wird deutlich, dass bei einem trockenen Werkstoff der Wassertransport vorerst durch Diffusion vorstatten geht. Diese wird dann durch die Kapillarkondensation zunehmend behindert. Bei höheren Feuchtigkeitsgehalten im Werkstoff wird das Wasser durch leistungsfähigere Mechanismen wie der Kapillarleitung und der Strömung ersetzt.

Durch den Einfluss der Temperatur und der Porengröße auf den Transportmechanismus ist es nicht möglich, einem bestimmten Transportmechanismus einen speziellen Feuchtegehalt zuzuordnen.

Bei direktem Kontakt mit Wasser findet in Abhängigkeit von der Porengröße zusätzlich ein Aufsteigen des Wassers infolge Kapillarität statt.

5 DIN EN ISO 12572 - Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß - (Cup-Messungen)

Die Norm DIN EN ISO 12572 regelt die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Baustoffen. Sie legt das Verfahren fest, wie der Wasserdampfdiffusionswiderstand verschiedener Materialien bei definierten (Labor-) Randbedingungen geprüft und bestimmt werden kann.

Die Norm geht detailliert auf die Beschaffenheit der Prüfgeräte und Probekörper ein und beschreibt die Prüfverfahren. Sie gibt Hinweise zur Berechnung und Darstellung der ermittelten Ergebnisse.

Grundsätzlich werden stationäre Zustände geprüft.

Hierzu dienen die (im Bauwesen) üblichen Messverfahren nach (dry cup) und (wet cup) – Randbedingungen

Satz	Prüfbedingung Temperatur Rel. Luftfeuchte	Temperatur [°C]	Rel. Luftfeuchte 1. Seite [%]	Rel. Luftfeuchte 2. Seite [%]
A - (dry cup)	23-0/50	23	0	50
C - (wet cup)	23-50/93	23	93	50

Es wird somit ein konstanter Diffusionsstrom auf das Bauteil aufgebracht, die die zuvor beschriebenen Zustände (1-4) des Materiales

- Sorption und Diffusion (dry cup)
- Diffusion und Kapillarleitung (wet cup)

durchlaufen.

Die Ergebnisse der Messungen a und C sind NICHT gleich!

- der Diffusionswiderstand aus dem dry cup – Versuch ist HÖHER
- der Diffusionswiderstand aus dem wet cup – Versuch ist NIEDRIGER

somit ist die

- der Wasserdampftransport beim dry cup – Versuch ist NIEDRIGER
- der Wasserdampftransport beim wet cup – Versuch ist HÖHER

Welcher Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl in den Technischen Merkblätter der Produkte angegeben wird ist (leider) dem Hersteller überlassen.

6 Zusammenfassung

Die nach dem wet-cup Verfahren gemessene Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit resultiert auf einem der Diffusion überlagerten Feuchtetransport in der flüssigen Phase. Es zeigt sich so ein erhöhtes diffusionstechnisches Materialverhalten in einem hohen Feuchtebereich. Diese Prozesse können messtechnisch nur aufwändigst unabhängig voneinander gemessen werden.

Die Ergebnisse der Normmessungen zeigen, dass

- der Diffusionswiderstand aus dem dry cup – Versuch ist HÖHER
- der Diffusionswiderstand aus dem wet cup – Versuch ist NIEDRIGER
- der Wasserdampftransport beim dry cup – Versuch ist NIEDRIGER
- der Wasserdampftransport beim wet cup – Versuch ist HÖHER
- der Materialfeuchte beim dry cup – Versuch ist NIEDRIGER
- der Materialfeuchte beim wet cup – Versuch ist HÖHER
- u.v.m.

So kann gesagt werden, dass in den Messungen nach DIN EN ISO 12572 auch eine Feuchtevariabilität des Werkstoffes verklausuliert mit gemessen wird.

Die DIN EN ISO 12572 liefert, im Wesentlichen, die Messwerte des Wasserdampfdiffusionswiderstandes. Diese Werte werden für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen nach *DIN 4108-Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden* benötigt.

Das in der DIN 4108 vorgeschriebene Verfahren wurde 1959 vom Helmuth Glaser als graphisch-rechnerischen Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen entwickelt und ist ein klassisches **Nachweis-Verfahren**.

Moderne **Berechnungs-Verfahren** zur Simulation von wärme- und feuchtetechnischen Prozessen, können realitätsnahe Berechnungen des instationären hygrischen Verhaltens von mehrschichtigen Bauteilen unter natürlichen Klimabedingungen betrachten.

Diese Verfahren erfordern aber auch komplexere Materialkennwerte.

Diese sind mit der Norm DIN EN ISO 12572 nicht eindeutig zu bestimmen oder zuzuordnen.