

**TROTEC**®



**T2000**

***Praxishandbuch***

Version 2.0

## Vorwort

*Sehr geehrter Kunde,*

*mit dem Kauf des digitalen Multifunktionsmessgerätes T2000 haben Sie sich für ein innovatives, präzises und einfach zu bedienendes Messsystem entschieden. Eine gute Entscheidung, für die wir uns bei Ihnen bedanken möchten.*

*Damit Sie das Potenzial dieses vielseitigen Messgerätes schnell und umfassend für Ihre Einsatzbereiche nutzen können, haben wir für Sie das vorliegende Praxishandbuch konzipiert.*

*Auch wenn Sie die aktuellste Fassung unseres Praxishandbuches in Ihren Händen halten, werden Sie nicht zu jedem verfügbaren Sensor eine explizite Einsatzbeschreibung vorfinden. Angesichts der wachsenden Anzahl verfügbarer Sensoren würde dies den Rahmen eines Praxishandbuchs sprengen. Stattdessen widmen wir uns für jede Sensorreihe exemplarisch dem meistgenutzten Sensor.*

*Beim T2000 handelt es sich um ein modular aufgebautes Messsystem, konzipiert aus der Praxis für die Praxis. Bei vielen Aufgabenstellungen ergeben sich durch die Kombination verschiedener Sensoren und Messmethoden ganz neue Problemlösungsstrategien und diagnostische Vorgehensweisen.*

*Deshalb würden wir uns freuen, auch von Ihren Erfahrungen aus der Praxis zu hören. Berichten Sie uns von Vorgehensweisen und Messkombinationen, die Sie bei Ihrer Arbeit erfolgreich einsetzen und die bisher nicht im Praxishandbuch aufgeführt sind. Dann finden Sie „Ihre Methode“ vielleicht schon in der nächsten aktualisierten Druckausgabe wieder.*

*Wir wünschen Ihnen nun viel Spaß und Inspiration bei der Lektüre dieses Handbuches und der praktischen Umsetzung mit Ihrem T2000.*

<b>1. Einleitung</b> .....	1 – 01
<b>2. Temperatur und Luftfeuchtemessung</b> .....	2.1 – 01
<b>2.1 Grundlagen zu Temperatur und Luftfeuchte</b> .....	2.1 – 01
<b>2.2 Messen der Lufttemperatur und Luftfeuchte</b> .....	2.2 – 01
2.2.1 Messprinzipien .....	2.2 – 01
2.2.2 Der TS 200 SDI-Sensor zur Klimamessung – Handhabung und Messvorgang .....	2.2 – 01
2.2.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise .....	2.3 – 01
<b>2.3 Temperaturmessung mit Pt100-Sensoren</b> .....	2.3 – 01
2.3.1 Messprinzip .....	2.3 – 01
2.3.2 Sensoren zur Temperaturmessung – Handhabung und Messvorgang .....	2.3 – 03
<b>3. Holz – Feuchtigkeitsbestimmung</b> .....	3.1 – 01
<b>3.1 Grundlagen zur Holzfeuchtigkeit und charakteristischen Kennwerten</b> .....	3.1 – 01
3.1.1 Definition der Holzfeuchte .....	3.1 – 01
3.1.2 Einfluss der Feuchte auf die Holzeigenschaften .....	3.1 – 02
3.1.3 Beurteilen der Holzfeuchtigkeit anhand einiger Kennwerte .....	3.1 – 05
<b>3.2 Holzfeuchte-Messung – Widerstandsprinzip</b> .....	3.2 – 01
3.2.1 Messprinzip .....	3.2 – 02
3.2.2 Elektroden zur Holzfeuchtemessung – Handhabung und Messvorgang .....	3.2 – 06
3.2.3 Messen der Holzfeuchte an Schnittholz .....	3.2 – 09
3.2.4 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der Widerstandsmessung .....	3.2 – 11
<b>3.3 Holzfeuchte-Messung – kapazitives Verfahren</b> .....	3.3 – 01
3.3.1 Messprinzip .....	3.3 – 01
3.3.2 Der TS 300 SDI-Sensor zur Holzfeuchtemessung – Messvorgang und Handhabung .....	3.3 – 01
3.3.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der kapazitiven Messmethode .....	3.3 – 03
3.3.4 Vergleichswerte zur Beurteilung der kapazitiven Messwerte .....	3.3 – 03
<b>4. Mineralische Baustoffe – Feuchtigkeitsbestimmung</b> .....	4.1 – 01
<b>4.1 Grundlagen zur Baustofffeuchte und charakteristischen Kennwerten</b> .....	4.1 – 01
4.1.1 Definition und Bestimmungsmöglichkeiten der Baustoff-Feuchte .....	4.1 – 01
4.1.2 Mechanismen des Feuchtetransportes in mineralischen Baustoffen .....	4.1 – 02
4.1.3 Beurteilen der Baustofffeuchte an einigen Grenzwerten .....	4.1 – 05

<b>4.2 Baustofffeuchte-Messung – Widerstandsprinzip</b> .....	4.2 – 01
4.2.1 Messprinzip .....	4.2 – 01
4.2.2 Elektroden zur Baustoff-Feuchtemessung – Handhabung und Messvorgang .....	4.2 – 02
4.2.3 Zusammenstellung der wichtigsten Vergleichswerte zur Messergebnisbeurteilung .....	4.2 – 05
4.2.4 Tiefenmessungen an verdeckten Baustoffschichten .....	4.2 – 06
4.2.5 Vergleichswerte zur Beurteilung von wassergeschädigten Bereichen .....	4.2 – 09
4.2.6 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der Widerstandsmessung .....	4.2 – 09
4.2.6.1 Störeinflüsse durch elektrisch leitende Salze im Baustoff .....	4.2 – 10
4.2.6.2 Störeinflüsse durch elektrisch leitende Materialien .....	4.2 – 10
<b>4.3 Baustofffeuchte-Messung – kapazitives Verfahren</b> .....	4.3 – 01
4.3.1 Messprinzip .....	4.3 – 01
4.3.2 Der TS 300 SDI-Sensor zur Baustoff-Feuchtemessung – Messvorgang und Handhabung .....	4.3 – 02
4.3.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der kapazitiven Messmethode .....	4.3 – 04
4.3.4 Zusammenstellung der wichtigsten Vergleichswerte zur Messergebnisbeurteilung .....	4.3 – 04
<b>4.4 Baustofffeuchte-Messung – hygrometrisches Verfahren</b> .....	4.4 – 01
4.4.1 Messprinzip .....	4.4 – 01
4.4.2 Hygrometrische Baustofffeuchte-Messung .....	4.4 – 01
4.4.2.1 Feuchtemessung im Estrich .....	4.4 – 01
4.4.2.2 Feuchtemessung im Beton .....	4.4 – 03
4.4.2.3 Feuchtemessung in gefliesten Wand- oder Bodenbereichen .....	4.4 – 04
4.4.2.4 Feuchtemessung in Kombination mit der CM-Messung .....	4.4 – 05
4.4.3 Erfahrungswerte bei der Beurteilung von Baustofffeuchte hinsichtlich der Belegreife .....	4.4 – 06
4.4.4 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise beim hygrometrischen Verfahren .....	4.4 – 07
<b>4.5 Baustofffeuchte-Messung – Mikrowellenverfahren</b> .....	4.5 – 01
4.5.1 Messprinzip .....	4.5 – 01
4.5.2 Feuchtemessung mit dem Mikrowellensensor TS 350 .....	4.5 – 02
4.5.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise beim Mikrowellenverfahren .....	4.5 – 03
4.5.4 Kombiniertes Einsatz von TS 300 SDI und TS 350 SDI in der Bauwerksdiagnostik .....	4.5 – 04
4.5.4.1 Ursachenanalyse von Schimmelbildung durch Kondensatfeuchte .....	4.5 – 04
4.5.4.2 Aufsteigende Mauerwerksfeuchte/ Hygroskopische Feuchteerscheinungen durch Versalzungen .....	4.5 – 05
4.5.4.3 Ortung von Undichtigkeiten und Leckagen .....	4.5 – 06
<b>5. Messen der Strömungsgeschwindigkeit von Luft</b> .....	5 – 01
<b>6. Kalibrierservice</b> .....	6 – 01
<b>7. Seminare und Know-how für die Praxis</b> .....	7 – 01
<b>8. Schlusswort</b> .....	7 – 01
<b>9. Literatur</b> .....	7 – 01

## 1. Einleitung

In vielen Bereichen von Industrie und Handwerk wird es zunehmend wichtiger, die raumklimatischen Bedingungen und die materialspezifischen Eigenschaften von Werk- oder Rohstoffen zu kennen. Hierzu gehört u.a. die Materialfeuchte als ein wichtiges Merkmal für die Qualität eines Werkstoffes oder Bauteils.

Beispielsweise muss der Feuchtezustand des zu verlegenden Werkstoffes und des Verlegeuntergrundes bekannt sein, um eine dauerhafte Gebrauchstauglichkeit zu gewährleisten.

Bei fachgerechtem Einsatz ist es mit dem T2000 möglich, sich vor Ort einen Überblick über den Zustand des Werkstoffes zu verschaffen. Dies geschieht in Form von schnellen, zerstörungsfreien beziehungsweise zerstörungssarmen Messungen.

Da nicht nur unsere Erfahrung gezeigt hat, dass zum fachgerechten Einsatz eines Messgerätes immer die Kenntnis der physikalischen und technischen Hintergründe zählt, wurde ein besonderes Gewicht auf die Bedienungsanleitung und das Praxishandbuch gelegt. In diesen beiden Dokumenten haben wir die wichtigsten Informationen für den Praxiseinsatz des T2000 zusammengefasst.

Die dem Messgerät beiliegende Bedienungsanleitung beschreibt vollständig den bestimmungsgemäßen Einsatz und eignet sich zum Schnelleinstieg erfahrener Anwender, die bereits mit den entsprechenden physikalisch-technischen Hintergründen der jeweiligen Messverfahren vertraut sind. Die aktuellste Fassung der Bedienungsanleitung (siehe Versionsnummer auf erster Seite) finden Sie auch im Downloadbereich unter [www.trotec.de](http://www.trotec.de). Dort ist ebenfalls die Holzsortentabelle erhältlich.

Für Einsteiger oder zum nochmaligen Nachlesen für fortgeschrittene Anwender ist das vorliegende Handbuch gedacht, das umfangreiches Hintergrundwissen für den fachgerechten Praxiseinsatz enthält. Darum sollte vor dem Studium des Handbuchs erst die Bedienungsanleitung gelesen werden. Manche Zusammenhänge, wie beispielsweise der eigentliche Messvorgang, lassen sich nur zusammen mit der Bedienungsanleitung durchführen.

Wie für alle Messgeräte gilt auch hier der Grundsatz: „jedes Messgerät ist immer nur so gut, wie sein Anwender“.

Nur eine richtige Handhabung ermöglicht eine korrekte Interpretation und fachgerechte Einordnung der Messwerte. Daher finden Sie im vorliegenden Handbuch neben den Grundzügen der physikalischen Messprinzipien auch bautechnische Hintergründe mit fundamentalen Gesetzmäßigkeiten sowie internationalen Grenz- und Richtwerten. Diese Angaben sollen als Einstieg in die Problematik verstanden werden, da diese Zusammenstellung nicht den Anspruch der Vollständigkeit erfüllen kann. Unbedingt erforderlich ist die Kenntnis der aktuell gültigen, landesspezifischen Grenzwerte und die allgemein anerkannten Regeln der Technik. Sie unterliegen der Eigenverantwortlichkeit des Geräteanwenders.

Für die Beurteilung und Interpretation der ermittelten Messwerte ist es unerlässlich, die Genauigkeit des eingesetzten Verfahrens zu kennen. Dazu gehört u.a. die Kenntnis, ob die Messwerte einem direkten oder indirekten Messverfahren zugeordnet werden können.

### Direkte versus indirekte Messverfahren

Als direkte Messverfahren werden u.a. das Darr-Verfahren und die CM-Methode eingestuft. Beide Verfahren zeichnen sich durch eine Trennung des Wassers vom Feststoff aus. [1]

Als genauestes Verfahren gilt hierbei das Darren (darren = austrocknen). Die entnommene Materialprobe wird gewogen, vollständig getrocknet und anschließend nochmals gewogen. Die Gewichtsdivergenz zwischen feuchter und trockener Probe entspricht dann der Masse des im Material enthaltenen Wassers. Das Darren weist von allen bekannten Messverfahren die reproduzierbarsten Messwerte aus und ist dementsprechend international anerkannt. [2]

Mit dem Verfahren sind jedoch **vier** entscheidende **Praxisnachteile** verbunden. **Erstens** können die Messungen nicht auf der Baustelle durchgeführt werden, **zweitens** wird das Material beschädigt, **drittens** können Aussagen erst nach einigen Tagen gemacht und **viertens** eine Messung an gleicher Stelle nicht wiederholt werden.

Bei dem indirekten Messverfahren wird der Feuchtegehalt über die Eigenschaften und Wirkungen des Wassers ermittelt. Als Messprinzipien werden die Widerstands-

die kapazitive, die hygrometrische sowie die Mikrowellen-Methode eingesetzt, die dann zu einem weitgehend störungsfreien Messergebnis führen.

Bei der Widerstandsmethode wird der Widerstand bzw. die Leitfähigkeit des Materials gemessen, welche sich in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Baustoffes ändert.

Bei der kapazitiven und der Mikrowellen-Methode ändert sich durch den Wassergehalt des Baustoffes die dielektrische Eigenschaft. Die Dielektrizitätskonstante ist, wie der elektrische Widerstand, ein veränderliches Merkmal von Materialien. Sie steigt oder fällt in Abhängigkeit von der Materialfeuchte.

Grundlage des hygrometrischen Messverfahrens ist die Eigenschaft, dass mineralische Baustoffe in Wechselwirkung mit der Umgebungsluft stehen. Steigt die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft, dann steigt auch der Feuchtegehalt des Baustoffs. Nach einem gewissen Zeitraum stellt sich ein Gleichgewichtsfeuchtezustand ein, bei dem der poröse Baustoff eine bestimmte Menge an Wasser aufweist.

Zur Genauigkeit der beiden indirekten Messmethoden sei angemerkt, dass die implementierten Messkurven für das Widerstands- und kapazitive Verfahren durch das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen untersucht wurden. Dabei sind Kalibriermessungen, in Verbindung mit dem Darrverfahren, an ausgesuchten Baustoffen durchgeführt worden. [18]

Des Weiteren wurden durch das Institut die Handhabbarkeit sowie die Baustelleneignung überprüft. Die entsprechenden Ergebnisse sind dann im Praxishandbuch mit berücksichtigt worden.

## Gliederung der Baustoffe

Die am Bau verwendeten Bau- und Werkstoffe lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen. Die Gruppe der anorganischen und die Gruppe der organischen Baustoffe (siehe Tabelle 1).

Die anorganischen Baustoffe teilen sich wiederum in die beiden Untergruppen mineralische und metallische Baustoffe auf.

Das Handbuch wurde in Anlehnung an diese Einteilung aufgebaut. Es beschäftigt sich hauptsächlich mit der Feuchtebestimmung der genannten Baustoffe.

Da der Feuchtegehalt von Baustoffen immer durch die Umgebungsbedingungen beeinflusst wird, ist dieser Thematik das Kapitel 2 gewidmet. Dort wird u.a. gezielt auf Temperatur- und Luftfeuchtemessungen eingegangen. In Kapitel 4 wird dieses Wissen dann zur Messung der Materialfeuchte verwendet.

Kapitel 3 geht auf die Feuchtemessung an organischen Baustoffen ein. Hauptaugenmerk liegt hier bei den Vollhölzern und den Holzwerkstoffen.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Feuchtebestimmung an mineralisch porösen Baustoffen. Die organischen Dämmstoffe (z. B. Polystyrolplatten), werden ebenfalls hier behandelt, da sie in der Regel Bestandteil eines mehrschichtigen, mineralischen Bauteils sind.

Zum Sensorumfang gehört auch ein Anemometersensor, mit dem die Strömungsgeschwindigkeit der Luft bestimmt werden kann. Diese Thematik wird in Kapitel 5 behandelt.

Anorganische Baustoffe		Organische Baustoffe
<i>mineralisch</i>	<i>metallisch</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mörtel</li> <li>• Beton</li> <li>• natürliche Bausteine</li> <li>• künstliche Bausteine</li> <li>• keramische Stoffe und Porzellan-Email</li> <li>• Glas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eisenwerkstoffe</li> <li>• Baustahl</li> <li>• Betonstahl</li> <li>• Spannstahl</li> <li>• Nichteisenmetalle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Holz und Holzwerkstoffe</li> <li>• Kunststoffe</li> <li>• Betonzusatzmittel</li> <li>• Bitumen</li> </ul>

**Tabelle 1: Einteilung der Baustoffe (nach [7])**

## 2. Temperatur und relative

### Luftfeuchtemessung

Für die Beurteilung von Feuchteschäden an Baustoffen oder Bauteilen reicht es in der Regel nicht aus, ausschließlich die Baustoffeuchte zu bestimmen.

Oberflächentemperaturen der Bauteile, Lufttemperatur und Luftfeuchte können bei der Gesamtbeurteilung entscheidende Zusatzinformationen liefern, da der Baustoff und das Umgebungsklima immer in Wechselwirkung zueinander stehen.

Im Zusammenhang mit diesen drei aufgeführten Messgrößen findet häufig die weiterführende Ermittlung der Taupunkttemperatur besondere Beachtung.

Das T2000 ermöglicht unter Zuhilfenahme der richtigen Sensoren die schnelle Temperatur- und Luftfeuchtemessung (absolute Luftfeuchte, relative Luftfeuchte) bei gleichzeitiger Ermittlung des Taupunktes.

### 2.1 Grundlagen zur Temperatur und relativen Luftfeuchte

In der Umgebungsluft befindet sich stets eine bestimmte Menge an gasförmigem Wasserdampf, der mit bloßem Auge nicht sichtbar ist. Abhängig von der Temperatur ist Luft in der Lage, eine ganz bestimmte Menge Wasser auf-

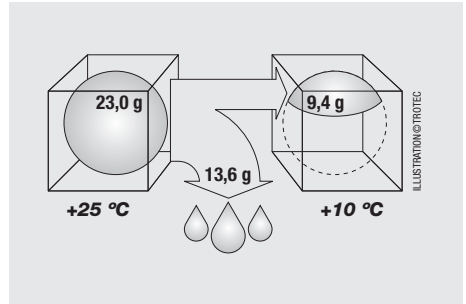


Abbildung 1: Wasserdampfgehalt der Luft [8]

zunehmen. Je wärmer die Luft ist, desto mehr Wasser kann sie aufnehmen. Wird die maximal mögliche Menge Wasser bei einer gegebenen Temperatur durch Absenken der Temperatur überschritten (wird z. B. im Winter nach dem Duschen das Badezimmerfenster geöffnet), so wird Wasser in Form von kleinen Tröpfchen ausgeschieden und für das menschliche Auge in Form von Nebel sichtbar (siehe Abbildung 1).

Die Wasserdampfkonzentration der Luft wird über die absolute Luftfeuchte angegeben. Sie beschreibt das Verhältnis vom Wassergehalt pro Luftvolumen und wird in Gramm Wasser pro Kubikmeter Luft angegeben (siehe Formel „Absolute Luftfeuchte“). [2]

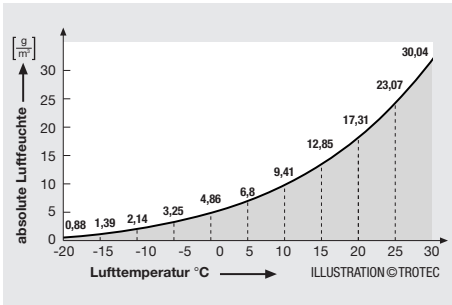
Analog zum Begriff der absoluten Feuchte steht die relative Luftfeuchte  $\varphi$  [r.H.: relative humidity]. Sie wird in %

$$\text{Absolute Luftfeuchte} = \frac{\text{Masse des Wasserdampfs bei einer bestimmten Temperatur [g]}}{\text{Luftvolumen bei bestimmter Temperatur [m}^3\text{]}}$$

$$\text{Relative Luftfeuchte r.H.} = \frac{\text{Sächliche Wasserdampfkonzentration bei bestimmter Temperatur}}{\text{maximale Wasserdampfkonzentration bei bestimmter Temperatur}}$$

Art des Raumes	rel. Feuchte	bei	Temperatur
Wohnräume, Büros, Arbeitsräume	50 %	bei	19 - 24 °C
Bibliothek	40 - 50 %	bei	22 °C
Bildergalerie	45 - 55 %	bei	20 °C
Antiquitäten	45 - 50 %	bei	20 - 24 °C
Bücher (Lagerung)	40 - 50 %	bei	15 - 20 °C

Tabelle 2: Ausgewählte Sollfeuchte- und Temperaturwerte für Räume



**Abbildung 2: Sättigungskurve**  
 Die Sättigungskurve gibt den Maximalwert an Feuchtigkeit, der von der Luft aufgenommen werden kann, an. Wasserdampfgehalte über die Sättigungskurve sind nicht möglich. [2]

angegeben und beschreibt den Sättigungszustand der Luft (siehe Formel „Relative Luftfeuchte“).

Im Zusammenhang mit der Sättigung und der Wasserdampfkonzentration muss die Temperaturabhängigkeit näher betrachtet werden. Wird feuchte Luft schnell abge-

kühlt, so fällt an der „kalten Stelle“ Wasser aus. Dies liegt darin begründet, dass „kalte“ Luft weniger Wasserdampf speichern kann, als „warme“ Luft.

Bei einer kontinuierlichen Abkühlung erhöht sich gleichzeitig die relative Luftfeuchte, bis die Luft schließlich gesättigt ist ( $\varphi = 100\%$ , Abbildung 2).

Die Temperatur, bei der dieser Sättigungszustand erreicht wird ist die Taupunkttemperatur (dt: dewpoint temperature) oder auch Taupunkt genannt. In der Regel muss der Taupunkt rechnerisch oder über ein Tabellenwerk (s. Tabelle 3) ermittelt werden.

Die Umrechnung zwischen den drei Größen Taupunkttemperatur, relative und absolute Feuchte lässt sich über das in Abbildung 3 dargestellte Diagramm ermitteln.

Das T2000 bietet den großen Vorteil, dass durch eine entsprechende Einheitenauswahl im Sensorfeld 2 direkt die Taupunkttemperatur, relative Luftfeuchte oder absolute Luftfeuchte angezeigt werden kann.

DT °C	Taupunkttemperatur DT in °C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit $\varphi$ von													
	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%	95%
30	10,5	12,9	14,9	16,8	18,4	20	21,4	22,7	23,9	25,1	26,2	27,2	28,2	29,1
29	9,7	12	14	15,9	17,5	19	20,4	21,7	23	24,1	25,2	26,2	27,2	28,1
28	8,8	11,1	13,1	15	16,6	18,1	19,5	20,8	22	23,2	24,2	25,2	26,2	27,1
27	8	10,2	12,2	14,1	15,7	17,2	18,6	19,9	21,1	22,2	23,3	24,3	25,2	26,1
26	7,1	9,4	11,4	13,2	14,8	16,3	17,6	18,9	20,1	21,2	22,3	23,3	24,2	25,1
25	6,2	8,5	10,5	12,2	13,9	15,3	16,7	18	19,1	20,3	21,3	22,3	23,2	24,1
24	5,4	7,6	9,6	11,3	12,9	14,4	15,8	17	18,2	19,3	20,3	21,3	22,3	23,1
23	4,5	6,7	8,7	10,4	12	13,5	14,8	16,1	17,2	18,3	19,4	20,3	21,3	22,2
22	3,6	5,9	7,8	9,5	11,1	12,5	13,9	15,1	16,3	17,4	18,4	19,4	20,3	21,2
21	2,8	5	6,9	8,6	10,2	11,6	12,9	14,2	15,3	16,4	17,4	18,4	19,3	20,2
20	1,9	4,1	6	7,7	9,3	10,7	12	13,2	14,4	15,4	16,4	17,4	18,3	19,2
19	1	3,2	5,1	6,8	8,3	9,8	11,1	12,3	13,4	14,5	15,5	16,4	17,3	18,2
18	0,2	2,3	4,2	5,9	7,4	8,8	10,1	11,3	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3	17,2
17	-0,6	1,4	3,3	5	6,5	7,9	9,2	10,4	11,5	12,5	13,5	14,5	15,3	16,2
16	-1,4	0,5	2,4	4,1	5,6	7	8,2	9,4	10,5	11,6	12,6	13,5	14,4	15,2
15	-2,2	-0,3	1,5	3,2	4,7	6,1	7,3	8,5	9,6	10,6	11,6	12,5	13,4	14,2
14	-2,9	-1	0,6	2,3	3,7	5,1	6,4	7,5	8,6	9,6	10,6	11,5	12,4	13,2
13	-3,7	-1,9	-0,1	1,3	2,8	4,2	5,5	6,6	7,7	8,7	9,6	10,5	11,4	12,2
12	-4,5	-2,6	-1	0,4	1,9	3,2	4,5	5,7	6,7	7,7	8,7	9,6	10,4	11,2
11	-5,2	-3,4	-1,8	-0,4	1	2,3	3,5	4,7	5,8	6,7	7,7	8,6	9,4	10,2
10	-6	-4,2	-2,6	-1,2	0,1	1,4	2,6	3,7	4,8	5,8	6,7	7,6	8,4	9,2

Tabelle 3: Taupunkttemperatur DT in Abhängigkeit von Temperatur T und relativer Feuchte  $\varphi$  [6]



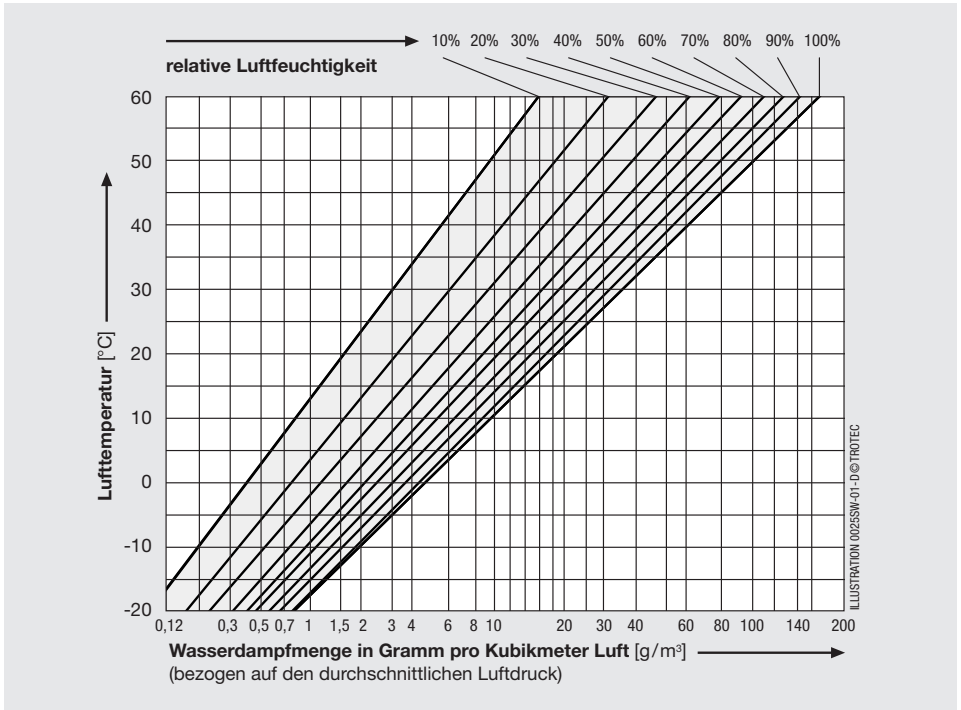


ILLUSTRATION 0025SW-01-D © TROTEC

Abbildung 3: Diagramm des Wasserdampfgehaltes der Luft [2]

In Abbildung 4 wird ein weiteres Problem in der Bauwerksdiagnostik verdeutlicht: Die Kondenswasser- bzw. Schimmelbildung in Gebäuden.

Deren Entstehung wird maßgeblich mitbestimmt durch das Klimaverhältnis von Raumlufttemperatur und relativer Luftfeuchte.

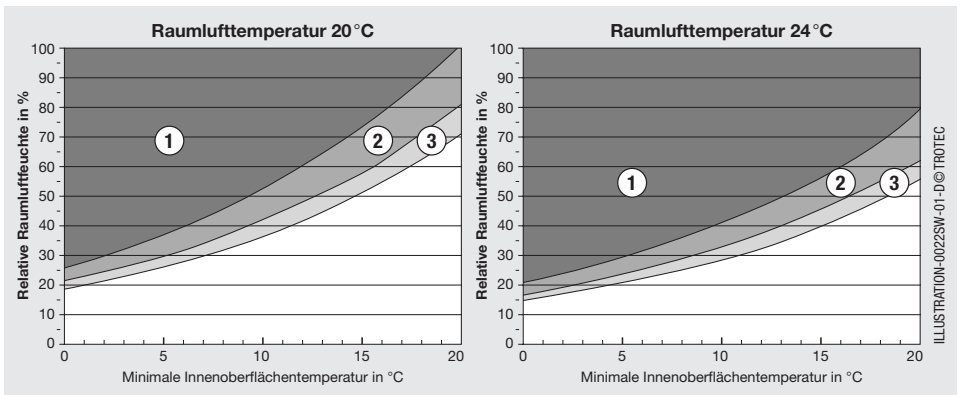


ILLUSTRATION-0025SW-01-D © TROTEC

① Kondenswasser- und Schimmelpilzbildung, ② Schimmelpilzbildung, ③ Grenzbereich für Schimmelpilzbildung

Abbildung 4: Grenzen der relativen Raumluftfeuchte für Kondenswasser- bzw. Schimmelbildung in Abhängigkeit der minimalen Innenoberflächentemperaturen im Bereich von Schwachstellen (Wärmebrücken, etc.).

## 2.2 Messen der Lufttemperatur und Luftfeuchte

Für die Ermittlung der beiden Messgrößen Lufttemperatur und Luftfeuchte wird nur ein SDI-Sensor benötigt. Standard-Sensor für die meisten Anwendungsbereiche ist hier der TS 200 SDI-Klimasensor. Aus diesem Grund bezieht sich insbesondere das nachfolgende Kapitel 2.2.2 exemplarisch auf diesen Sensor.

Sollen Messungen in sehr hohen Temperaturbereichen durchgeführt werden, dann ist der Einsatz des TS 220 SDI-Sensor notwendig. Dieser Hochtemperatursensor erlaubt Messungen in Bereichen bis +180 °C.

Für spezielle Applikationen, bei denen ein besonders schmaler Sensorkopf benötigt wird, insbesondere für hygrometrische Messungen in Bohrlöchern und schwer zugänglichen Bereichen, steht außerdem der TS 240 SDI-Klimasensor mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Länge von 250 mm zur Verfügung.

In der Messspitze aller drei Sensoren erfolgt die Messung über zwei unterschiedliche Messprinzipien. Zum einen über das Widerstandsprinzip zur Erfassung der Lufttemperatur und zum anderen über das kapazitive Messprinzip zur Ermittlung der relativen Luftfeuchte.

In Verbindung mit der digitalen Technik können jetzt die relative Feuchte (r.H.), die absolute Luftfeuchte (g/m<sup>3</sup>), die Lufttemperatur (°C, °F) und die Taupunkttemperatur (dp °C, dp °F) angegeben werden.

### 2.2.1 Messprinzipien

Die Temperaturmessung wird mit einem so genannten NTC-Sensor (Negativ Temperatur Coefficient) durchgeführt, der wie die Pt100-Sensoren seinen elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur verändert. Der Unterschied des NTC- zum Pt100-Sensor liegt in der kürzeren Ansprechzeit und dem engeren Messbereich.

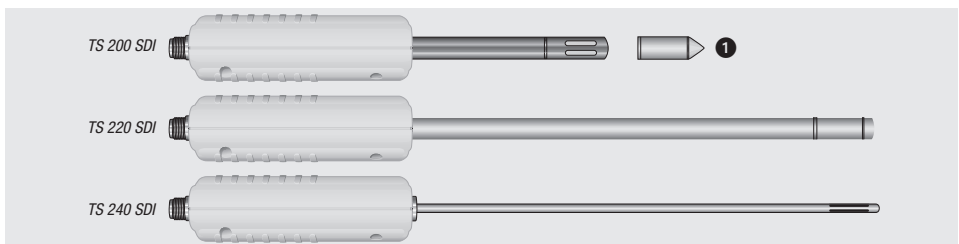
Parallel zur Temperaturmessung wird die Luftfeuchte mit einem Kondensator bestimmt. Der feuchteempfindliche Kondensator besteht aus zwei flachen Elektroden, zwischen denen sich eine elektrisch isolierende, hygroskopische Kunststoffschicht (Dielektrikum) befindet. Dieses Dielektrikum kann das in der Luft befindliche Wasser absorbieren. Mit steigender Luftfeuchte steigt auch die Kapazität des feuchteempfindlichen Kondensators.

### 2.2.2 Der TS 200 SDI-Sensor zur Klimamessung – Handhabung und Messvorgang

Der Klimasensor verfügt über einen robusten Kunststofffühler mit wechselbarer Filterkappe an der Spitze. Der Sensor eignet sich ausschließlich zur Messung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte. Dementsprechend darf die Spitze nicht in ein flüssiges Medium wie z. B. Wasser eingetaucht werden.

#### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Für präzise Messungen sollten sich Sensor und Messgerät erst an das Umgebungsklima angepasst haben. In der Regel reicht eine Wartezeit von etwa 10 bis 15 Minuten. Dies gilt insbesondere für die kalte Jahreszeit, wenn man z. B. den Messkoffer im kalten Auto transportiert hat und dann in einem beheizten Raum sofort die Messungen vornehmen will. Die Klimaangepasstung kann im abgeschalteten Zustand erfolgen.
2. Bei starker Staub-/Schmutzbelastung kann es zu einer Beeinträchtigung der Messergebnisse kommen. Verwenden sie daher als optional erhältliche Wechsel-Schutzkappe den Edelstahlinterfilter (❶). Hierbei sollte beachtet werden, dass es bauartbedingt bei diesem Filter zu Verzögerungen der Messwert-Anzeige kommt. Dies muss bei der Messwertermittlung berücksichtigt werden.



## Messvorgang

Bei der Temperatur-/Feuchtemessung sind folgende Arbeitsschritte in der automatisch aktiven Grundeinstellung durchzuführen:

1. Vor dem eigentlichen Messvorgang sind die oben beschriebenen Punkte der Handhabung (Staub-/Schmutzbelastung und Klimaanpassung) zu beachten.
2. Sensor mit dem Verbindungskabel TC 30 SDI an das T2000 anschließen.
3. Einschalten des T2000.
4. Einstellung der Sensornummer S200 überprüfen.  
Für den Fall, dass diese nicht eingestellt ist, 200 auswählen.
5. Im Sensorfeld 1 die Lufttemperatur (°C, °F) ablesen.
6. In Sensorfeld 2 die relative Luftfeuchte (r.H.) ablesen.

**Alternativ zu dieser Grundeinstellung können die absolute Feuchte und der Taupunkt im Sensorfeld 2 angezeigt werden (siehe Bedienungsanleitung).**

### 2.2.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise

Aus den oben beschriebenen Messprinzipien ergeben sich folgende Hinweise:

- Achten sie darauf, dass die Sensoreinheit nicht durch Umwelteinflüsse und/oder mechanisch beschädigt wird. Dies kann zum einen durch eine direkte Berührung des Feuchtesensors mit den Fingern geschehen. Zum anderen über direkten Kontakt des Sensors mit klebrigen Materialien und über Messungen in einer atmosphärisch belasteten Umgebung (z.B. Öldämpfe, Lösungsmittelhaltige Dämpfe, allgemein hohe schadstoffhaltige Luft).
- Geringe Luftströmungen wie zum Beispiel ein geöffnetes Fenster beeinflussen die Messwertanzeige. Dementsprechend kann es zu Messwertschwankungen kommen, wenn die Messung in einem Luftstrom durchgeführt wird.
- Die Filterkappe sollte in regelmäßigen Abständen gereinigt werden, da die Maschen sonst verstopfen. Gereinigt werden kann die Kappe mit Pressluft, indem die Maschen von innen nach außen vorsichtig freigeblasen werden.

- Für den Fall, dass dauerhaft hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Luftfeuchtemessungen gestellt werden, wird eine Einpunktkalibrierung im Abstand von einem Jahr empfohlen. Weitere Informationen zur Einpunktkalibrierung (r.H.) finden Sie im Kapitel 6 dieses Handbuchs und in der Bedienungsanleitung.

## 2.3 Temperaturmessung mit Pt100-Sensoren

Die elektrische Temperaturmessung lässt sich nach unterschiedlichen Messprinzipien durchführen. Zum einen gibt es das Messprinzip des Thermoelementes und zum anderen das Prinzip des Widerstandes.

**Thermoelemente** bieten einen **großen Messbereich** in Verbindung mit einer **schnellen Reaktionszeit**. Die **Widerstandssensoren (Pt100)** hingegen sind **langsamer**, haben Ihren Vorteil jedoch in der **präziseren Temperaturanzeige**.

Alle derzeit verfügbaren Sensoren sind Pt100-Sensoren, die sich lediglich in der Bauform und der Messgenauigkeit unterscheiden. Bei diesen Sensoren wird zur Temperaturmessung das Metall Platin eingesetzt. Es weist die besten Eigenschaften auf und wird als sogenanntes Pt100-Widerstandsthermometer bezeichnet.

### 2.3.1 Messprinzip

Die Temperaturmessung nach der Widerstandsmethode erfolgt an einer metallischen Sensorspitze über die Änderung des elektrischen Widerstandes. Je höher die Temperatur des Sensors ist, desto höher ist der elektrische Widerstand.

Jedes Metall besteht aus gleichmäßig angeordneten Bereichen seiner Atome (Atomgitter), in denen sich die Elektronen frei bewegen können. Die Beweglichkeit dieser freien Elektronen wie auch deren Anzahl hängt u.a. von der Temperatur des Metalles ab.

Mit diesem Zusammenhang lässt sich die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit eines Metalles erklären:

Wird nun über eine Temperaturerhöhung den Metallatomen Energie zugeführt, schwingen sie mit einer ent-

sprechend größeren Amplitude und Frequenz. Der Elektronenbewegung wird hierdurch zunehmend ein Widerstand entgegengesetzt, der zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes entspricht.

### Grenzabweichung nach DIN EN 60751 für Pt100-Messwiderstände

Das Pt100-Widerstandsthermometer wird in Genauigkeitsklassen eingeteilt, die sich folgendermaßen aus der Grenzabweichung nach DIN EN 60751 (siehe Abbildung 5 und Tabelle 4) ergeben:

- Klasse A:  $(0,15 + 0,002 \text{ lt}) \text{ } ^\circ\text{C}$
- Klasse B:  $(0,30 + 0,005 \text{ lt}) \text{ } ^\circ\text{C}$

Hiernach darf ein Pt100-Messwiderstand der Klasse A einen bestimmten Grenzfehler nicht überschreiten. **Beispiel für Klasse A:** Bei einer vorgegebenen Referenztemperatur von  $+200 \text{ } ^\circ\text{C}$  darf die Sensoranzeige die Werte von  $+199,45 \text{ } ^\circ\text{C}$  nicht unterschreiten oder  $+200,55 \text{ } ^\circ\text{C}$  nicht überschreiten.

Temperatur	Klasse A		Klasse B	
	$\pm \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm \text{ } \Omega$	$\pm \text{ } ^\circ\text{C}$	$\pm \text{ } \Omega$
-200 °C	0,55	0,24	1,3	0,56
-100 °C	0,35	0,14	0,8	0,32
0 °C	0,15	0,06	0,3	0,12
100 °C	0,35	0,13	0,8	0,30
200 °C	0,55	0,20	1,3	0,48
300 °C	0,75	0,27	1,8	0,64
400 °C	0,95	0,33	2,3	0,79
500 °C	1,15	0,38	2,8	0,93
600 °C	1,35	0,43	3,3	1,06
650 °C	1,45	0,46	3,6	1,13
700 °C	–	–	3,8	1,17
800 °C	–	–	4,3	1,28
850 °C	–	–	4,6	1,34

Tabelle 4: Grenzabweichungen nach DIN EN 60751:1996, bzw. IEC 751: 1986

### Erweiterte Toleranzklassen für Platin-Messwiderstände

Die neu geschaffenen Toleranzbänder 1/3 DIN B, 1/5 DIN B und 1/10 DIN B sind nicht in der DIN EN 607851:1996 bzw. IEC 751:1986 erfasst und basieren nach Absprache zwischen Kunden und Herstellern auf der Toleranzklasse B.

Obgleich die Grenzabweichungen wie in Tabelle 5 angegeben, weitläufig anerkannt sind, ergeben sich Unterschiede zwischen verschiedenen Anbietern.

Es wird empfohlen, sich für nähere Angaben zu den erweiterten Toleranzklassen mit uns in Verbindung zu setzen.

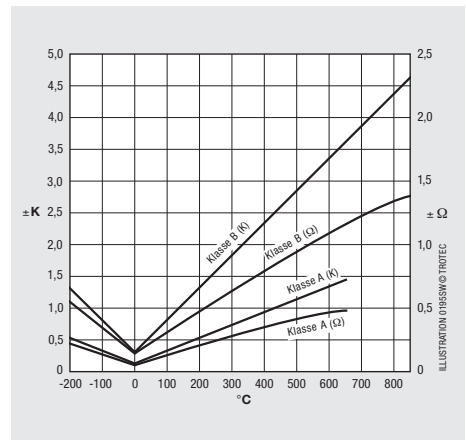


Abbildung 5: Grenzabweichungen nach DIN EN 60751 für Pt100-Messwiderstände

Toleranzklasse	Temperaturbereich	Grenzabweichung	
		bei 0 °C	bei 100 °C
DIN Klasse A	-200 bis +850 °C	$\pm 0,15 \text{ K}$	$\pm 0,35 \text{ K}$
DIN Klasse B	-200 bis +850 °C	$\pm 0,3 \text{ K}$	$\pm 0,8 \text{ K}$
1/3 DIN B	-200 bis +850 °C	$\pm 0,1 \text{ K}$	$\pm 0,2 \text{ K}$
1/5 DIN B	-150 bis +350 °C	$\pm 0,05 \text{ K}$	$\pm 0,15 \text{ K}$
1/10 DIN B	-150 bis +350 °C	$\pm 0,03 \text{ K}$	$\pm 0,12 \text{ K}$

Tabelle 5: Erweiterte Toleranzklassen für Platin-Messwiderstände

## 2.3.2 Sensoren zur Temperaturmessung – Handhabung und Messvorgang

Die Temperaturmessungen mit den Pt100-Sensoren lassen sich mit unterschiedlichen Bautypen durchführen. Insgesamt stehen derzeit 6 Sensoren zur Verfügung, die für den individuellen Messeinsatz entwickelt wurden.

### TS 110/150 ❶ – Einstech-Temperatursensor

Dieser Sensor der Genauigkeitsklasse B verfügt über eine 150 mm lange Messspitze (Durchmesser 4 mm) und eignet sich besonders für die Temperaturmessung in:

- Flüssigkeiten (z. B. Wasser)
- Schüttgütern (z. B. Sand)

*Messbereich -40 °C ... +400 °C*

#### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Sensorspitze mindestens 5 cm tief in das Messgut einbringen, damit keine Fremdeinflüsse (z.B. kalter Luftstrom) das Messergebnis verfälschen.
2. Ablesung des Messwertes – je nach Art des Messgutes – nach etwa 20 (z.B. Wasser) bis 180 Sekunden (z.B. Sand) Ansprechzeit.

### TS 120/150 ❷ und TS 120/300 ❸ – Tauch- und Rauchgas-Temperatursensor

Diesen robusten Sensor gibt es mit zwei unterschiedlichen Längen. Zum einen in der kurzen Ausführung von 150 mm Länge (Durchmesser 3 mm) und zum anderen in der langen Ausführung von 300 mm (Durchmesser 3 mm). Der Sensor der Genauigkeitsklasse A eignet sich besonders für die Temperaturmessung in:

- Flüssigkeiten (z. B. Wasser)
- Rauch-/Abgasen von Brenneinheiten

*Messbereich -40 °C ... +400 °C*

#### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Sensorspitze mindestens 5 cm tief in das Medium eintauchen.
2. Ablesung des Messwertes – je nach Art des Mediums – nach etwa 10 (z. B. Wasser) bis 180 Sekunden (z. B. Abgase) Ansprechzeit.

### TS 125/300 ❹ – hochpräziser Einstech-Temperatursensor

Dieser hochpräzise Sensor der Genauigkeitsklasse 1/10 DIN B verfügt über eine 300 mm lange Messspitze (Durchmesser 4 mm) und eignet sich besonders für die Temperaturmessung in:

- Flüssigkeiten (z. B. Wasser)
- Schüttgütern (z. B. Sand)

*Messbereich -40 °C ... +400 °C*

#### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Sensorspitze mindestens 5 cm tief in das Messgut einbringen, damit keine Fremdeinflüsse (z. B. kalter Luftstrom) das Messergebnis verfälschen.
2. Ablesung des Messwertes – je nach Art des Messgutes – nach etwa 20 (z.B. Wasser) bis 180 Sekunden (z.B. Sand) Ansprechzeit.

### TS 130/150 ❺ – Oberflächen-Temperatursensor

Dieser Sensor der Genauigkeitsklasse B verfügt über eine 150 mm lange Metallspitze (Durchmesser 4,5 mm), an der ein gefedert gelagerter Sensor sitzt, über den die Oberflächentemperatur erfasst wird. Der Sensor sollte ausschließlich für die Temperaturmessung an glatten Oberflächen eingesetzt werden. Sollte diese rau sein, dann ist die Kontaktstelle mit einer handelsüblichen Silikon-Wärmeleitpaste vorzubehandeln.

Der Sensor eignet sich besonders für den Einsatz der Temperaturkompensation bei der Holzfeuchte-Bestimmung. Durch die Bauform kann die Oberflächentemperatur des Messgutes besonders genau ermittelt werden (siehe Kapitel Holzfeuchtemessung).

*Messbereich -50 °C ... +400 °C*

#### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Gefederten Sensorkopf bis zum Anschlag auf das Messgut aufdrücken und darauf achten, dass ein flächiger Kontakt erfolgt. Ein Luftspalt würde das Ergebnis verfälschen.
2. Ablesung des Messwertes – je nach Art des Messgutes – nach etwa 10 bis 40 Sekunden Ansprechzeit.

## TS 140/150 6 – Einstech-Tempersensoren

Dieser Sensor der Genauigkeitsklasse B weist als Besonderheit einen Edelstahlgriff und eine Edelstahlmessspitze (Durchmesser 4 mm) auf und eignet sich dementsprechend besonders für die Temperaturmessung in:

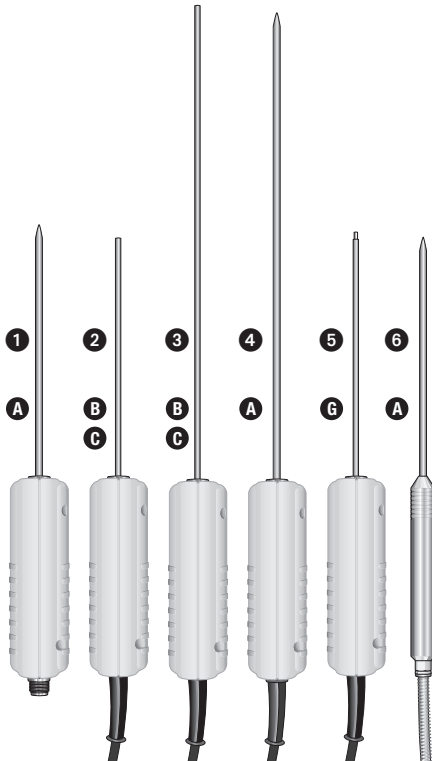
- Lebensmittel

Messbereich  $-40\text{ °C} \dots +400\text{ °C}$

### Bei der Handhabung sind folgende

#### Punkte zu beachten:

1. Sensorspitze mindestens 5 cm tief in das Messgut einbringen, damit keine Fremdeinflüsse (z.B. kalter Luftstrom) das Messergebnis verfälschen.
2. Ablesung des Messwertes – je nach Art des Messgutes – nach etwa 20 (z. B. Wasser) bis 180 Sekunden (z.B. Schüttgut) Ansprechzeit.



## Messvorgang

Bei jeder Temperaturmessung sind dann folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

1. Sensor in Abhängigkeit von der Messaufgabe und dem Einsatzgebiet auswählen.
2. Die Handhabung und Messvorbereitungen entsprechend den ausgewählten Sensoren durchführen.
3. Sensor mit dem Verbindungskabel TC 30 SDI an das T2000 anschließen.
4. Einschalten des T2000.
5. Einstellung der Sensornummer 150 überprüfen. Ist diese nicht eingestellt, 150 auswählen.
6. Zwischen Sensor und Messgut muss erst ein Temperaturengleich erfolgen. Der Sensor muss dazu erst die Temperatur des Messgutes „annehmen“, bevor eine präzise Messung erfolgen kann (Ansprechzeit).
7. Die Temperatur – entsprechend der Ansprechzeit (siehe Bedienungsanleitung) des eingesetzten Sensors – im Sensorfeld 1 ablesen.

### Bauformen und Anwendungsbereiche:

**Sensor mit Einstechspitze (A)**  
für Messungen in plastischen und pastösen Medien.

**Tauchsensor (B)** für Messungen in Flüssigkeiten, pulvrigen Medien, Luft und Gasen.

**Freier Sensor (C)** für Messungen in Luft und Gasen.

**Schwertsensor (D)** für Messungen in Papier-, Karton- und Textilstapeln.

**Oberflächensensor mit flacher Messspitze (E)** für Messungen an guten Wärmeleitern, auf glatten und planen Oberflächen.

**Sensoren mit hitzebeständiger Messspitze (F)** für Messungen bei extrem hohen Temperaturen.

**Oberflächensensor mit federndem Thermoelementband (G)** für schnelle Messungen auf nicht planen Oberflächen.



## 3. Holz – Feuchtigkeits- bestimmung

### 3.1 Grundlagen zur Holzfeuchtigkeit und charakteristischen Kennwerten

Die derzeit genaueste und sicherste Methode zur Bestimmung der Holzfeuchte ist die Darr-Methode. Die Ermittlung erfolgt an Prüfkörpern durch Wiegen, Heruntertrocknen bis zum Feuchtegehalt von 0 % und nochmaligem Wiegen (DIN EN 13183-1).

Da diese Methode, wie bereits angesprochen, nicht zerstörungsfrei und zeitaufwendig ist, kann der Feuchtegehalt einfacher und zudem weitestgehend zerstörungsfrei über das Widerstands-Verfahren ermittelt werden.

Das T2000 erfüllt diesbezüglich die technischen Voraussetzungen, um qualitativ hochwertige Aussagen bei der Holzfeuchtemessung zu erhalten. Dies wurde im Rahmen von Forschungsarbeiten international anerkannter Institute nachgewiesen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Begriffe und Kennwerte zur Holzfeuchte aufgeführt und erläutert.

#### 3.1.1 Definition der Holzfeuchte

##### Holzfeuchtigkeit „u“

Die Holzfeuchtigkeit „u“ wird in Masseprozent angegeben und bezeichnet das Verhältnis zwischen der Masse des im Holz enthaltenen Wassers und der darrtrockenen Holzsubstanz.

Ermittelt wird die Holzfeuchte über die Darr-Methode. Dazu wird eine Holzprobe gewogen, bei 105 °C vollständig getrocknet und dann ein zweites Mal gewogen. Durch die Subtraktion des Trockengewichtes vom Feuchtgewicht erhält man das Gewicht des vormals in der Probe enthaltenen Wassers. [2]

Holz gilt als „hygroskopisch“. Es besitzt die Eigenschaft, aus der Luft Feuchtigkeit aufnehmen (Quellen) und auch wieder abgeben (Schwinden) zu können. Der Feuchtegehalt des Holzes ist abhängig von der Art und Dauer der Lagerung, der Feuchte der umgebenden Luft und den Querschnittsabmessungen.

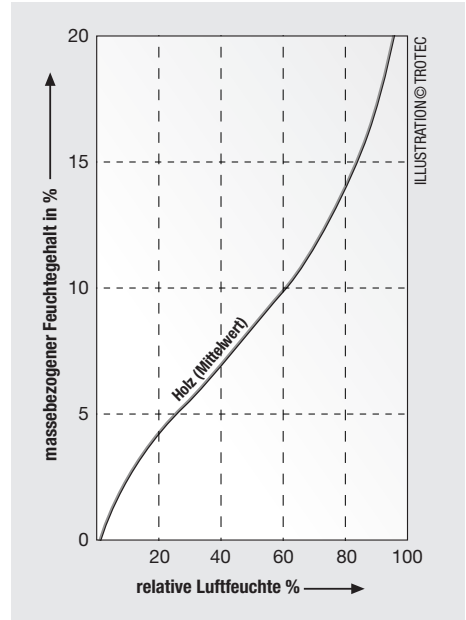


Abbildung 6: Sorptionsisotherme Holz [19]

In Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte bei konstanter Temperatur stellt sich ein Feuchtegleichgewicht ein, welches sich grafisch als so genannte Sorptionsisotherme darstellen lässt (siehe Abbildung 6).

Beispielsweise stellt sich bei einer natürlichen Trocknung (im Freien und überdacht) je nach Holzart in ein bis vier Jahren ein Feuchtegehalt „u“ von etwa 15 % ein [12]. Dies entspricht einer rel. Luftfeuchte im Jahresdurchschnitt von 80 %.

Holzfeuchte „u“ =

$$\frac{\text{Masse feuchtes Holz} - \text{Masse darrtrockenes Holz}}{\text{Masse darrtrockenes Holz}}$$

\* 100 [%]

### 3.1.2 Einfluss der Feuchte auf die Holzeigenschaften

Im Zusammenhang mit der Maßhaltigkeit des Holzes ist das Quellen und Schwinden bedeutend. Diese Eigenschaft hängt stark vom Fasersättigungspunkt ab.

#### Fasersättigungspunkt

Holzfeuchte tritt in einem Holzstück in zwei verschiedenen Erscheinungsformen auf. Zum einen als gebundenes Wasser in der Zellwandsubstanz und zum anderen als freies Wasser in den Zellhohlräumen des Holzes (siehe Abbildung 7). Bei der Trocknung verdunstet zuerst das freie Wasser aus den Zellhohlräumen. Den Punkt, an dem das Holz kein freies Wasser mehr enthält, bezeichnet man als Fasersättigungspunkt. In Abhängigkeit von der Holzart liegt er zwischen 23 und 35 M-%. [3]

#### Schwinden und Quellen

Bei einer natürlichen oder künstlichen Trocknung vom Frischholz bis zum darrtrockenen Zustand durchläuft das Holz vier charakteristische Zustände.

1. Bei frisch gefälltem Holz sind die Zellhohlräume und die Zellwände mit Wasser gefüllt. Dabei kann die Masse des Wassers ein Mehrfaches der Holzsubstanz betragen. Eine frisch gefällte Fichte kann beispielsweise einen Feuchtegehalt von bis zu 150 % aufweisen [3]. (1)
2. In der ersten Trocknungsphase verdunstet das freie Wasser. In Abhängigkeit von den Umgebungsbedin-

gungen und der Holzart dauert dies unterschiedlich lange. Wenn das freie Wasser vollständig verdunstet ist, wird der Fasersättigungspunkt erreicht. (2) und (3)

3. In der zweiten Trocknungsphase verdunstet das in den Zellwänden gebundene Wasser. Das Volumen des Holzes nimmt ab, was dann als **Schwinden** bezeichnet wird (4)
4. Eine weitere Trocknung des Holzes bis zu einem Feuchtegehalt von 0 %, ist nur über eine künstliche Trocknung zu erreichen, da die Umgebungsluft immer eine relative Feuchte besitzt. Dieser Zustand kann nur über das Darren erreicht werden. (5)

Innerhalb der Feuchtespanne von 0 % und etwa 30 % kann sich das Volumen nicht nur durch den Vorgang des Schwindens verändern. Nimmt Holz – umgekehrt zum Schwinden – Wasser aus der Luft auf, dann wird dies zuerst in den Zellwänden gebunden. Das Volumen des Holzes vergrößert sich, was als **Quellen** bezeichnet wird (4).

Der Quellvorgang schreitet jedoch nur solange fort, bis der Fasersättigungspunkt erreicht wird (3). Oberhalb des Fasersättigungspunktes verändert sich das Volumen nicht mehr, da sich das aufgenommene Wasser jetzt in den Zellhohlräumen sammelt.

Dementsprechend verändert sich das Volumen des Holzes durch Quellen und Schwinden nur innerhalb der Feuchtegrenzen von 0 % bis etwa 30 %. Die Schwind- und Quellmaße sind abhängig von Art und Dichte des Holzes und

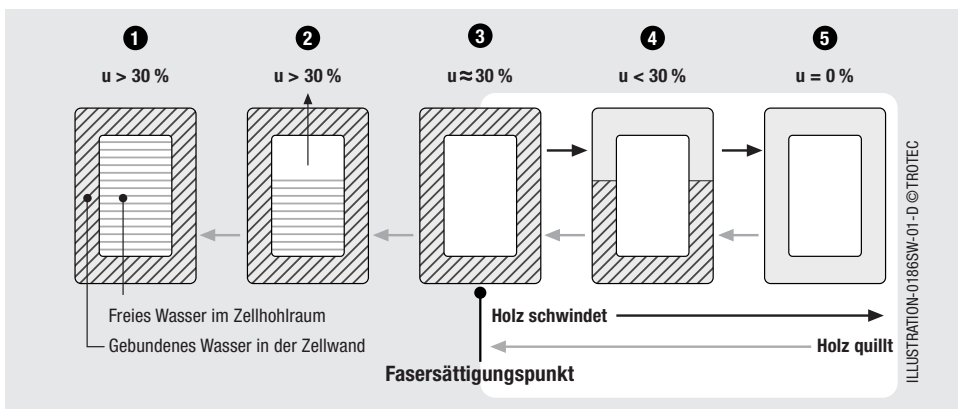


Abbildung 7: Wasserabgabe und Wasseraufnahme der Holz-Zelle [12]



von der Richtung der Volumenveränderung. Am stärksten arbeitet Holz in Richtung der Jahresringe (etwa 10 %), halb so viel in Richtung der Markstrahlen (etwa 5 %), ganz wenig in Faserrichtung (etwa 0,1 %). Alle drei Verformungen treten zusammen auf und überlagern sich. [3]

In Tabelle 6 sind für ausgewählte Holzsorten die Gesamtschwindmaße  $\beta$  ( $\beta_t$  = tangential,  $\beta_r$  = radial,  $\beta_v$  = vertikal) und differentielle Schwind-/Quellmaße  $q$  ( $q_t$  = tangential,  $q_r$  = radial,  $q_v$  = vertikal) in % angegeben.

Da die Maßhaltigkeit des Holzes bei der Verarbeitung entscheidend ist, erklärt sich die besondere Notwendigkeit der Holzfeuchtebestimmung. Für die Endverarbeitung muss das Holz in einen Feuchtigkeitszustand gebracht werden, der möglichst genau dem Umgebungsklima entspricht, in dem das fertige Erzeugnis später eingesetzt wird.

Dieser Zustand kann über die Gleichgewichtsfeuchte  $u_{gl}$  (oder auch Ausgleichsfeuchte) definiert werden.

Holzart	$\beta_t$	$\beta_r$	$\beta_v$	$q_t$	$q_r$	$q_v$
Abachi	4,6...5,6...6,7	2,2...3,3...4,2	6,9...9,1...11,5	0,22	0,11	0,19...0,32
Afzelia, Doussié	3,6...4,4	2,2...3,3	6,4...7,7	0,22	0,11	~ 0,23
Afromosia, Kokrudua	6,0...7,0	3,0...3,5	9,4...10,0	0,32	0,18	0,41...0,43
Agba, Tola branca	4,0...4,2...5,7	1,9...2,0...2,8	6,5...7,6...8,3	0,2	0,11	~ 0,25
Ahorn	~ 8,0	~ 3,0	11,5...11,8	0,26	0,15	~ 0,25
Birke	~ 7,8	~ 5,3	13,7...14,2	0,41	0,29	~ 0,23
Birnbaum	~ 9,1	~ 4,6	13,6...14,7	0,33	0,16	~ 0,48
Brasilkiefer, Parana Pinie	4,7...6,4...8,3	2,7...3,9...5,2	7,4...10,3...13,5	0,33	0,19	0,25...0,45
Bongossi, Azobé	8,3...8,7...10,8	6,7...7,4...9,2	15,2...16,4...21,0	0,4	0,31	0,51...0,70
Eiche	7,8...10,0	4,0...4,6	12,6...15,6	0,36	0,16	~ 0,45
Erle	7,7...9,3	4,4...4,8	12,6...14,2	0,27	0,16	0,15...0,30
Esche	8,0...8,4	4,6...5,0	12,8...13,6	0,38	0,21	0,43...0,45
Fichte	7,8...8,0	3,5...3,7	11,6...12,0	0,39	0,19	0,39...0,40
Hemlock	7,9...8,5	4,3...5,4	12,4...13,0	0,25	0,13	~ 0,41
Iroko, Kambala	4,5...5,5...9,8	2,5...3,8...5,6	7,1...10,0...15,6	0,28	0,19	0,24...0,52
Kiefer	7,5...8,7	3,3...4,5	11,2...12,4	0,36	0,19	0,37...0,41
Kirschbaum	6,5...8,7	3,5...5,0	13,7...14,0	0,28	0,17	~ 0,46
Lärche	7,8...10,4	3,3...4,3	11,4...15,0	0,3	0,14	0,38...0,50
Limba	4,2...5,5...7,4	2,7...4,7...6,2	7,0...10,4...13,9	0,22	0,14	0,31...0,51
Sipo	5,9...7,9...8,8	4,0...5,0...6,4	10,0...11,8...14,7	0,25	0,2	0,33...0,49
Makoré	4,3...6,3...9,5	3,5...4,7...6,5	7,9...11,2...16,5	0,27	0,22	0,43...0,48
Meranti, Dark Red	7,1...9,7...11,0	3,4...4,1...4,6	11,3...14,1...16,0	0,32	0,17	0,38...0,53
Niangon	7,6...8,5...9,2	2,9...3,7...4,5	10,0...12,9...14,0	0,33	0,18	0,33...0,47
Nussbaum	~ 7,5	~ 5,4	13,4...14,0	0,29	0,18	0,25...0,45
Ramin	~ 9,4	~ 4,0	13,6...15,0	0,39	0,19	~ 0,47
Rotbuche	~ 11,8	~ 5,8	14,0...17,9...21,0	0,41	0,2	0,40...0,60
Rüster	6,9...8,3	4,6...4,8	11,8...13,8	0,23	0,2	0,39...0,46
Sapelli	4,3...7,0...9,8	4,1...5,4...7,6	8,5...12,6...17,8	0,32	0,24	0,29...0,61
Teak	4,2...5,8	2,1...3,0	6,9...9,4	0,26	0,16	0,24...0,32

**Tabelle 6: Gesamtschwindmaß  $\beta$  in % bei Abnahme der Holzfeuchte von Fasersättigung bis 0 %  
Differentielles Schwind-/Quellmaß  $q$  in % bei Änderung der Holzfeuchte um 1 % (nach DIN EN 68100)**

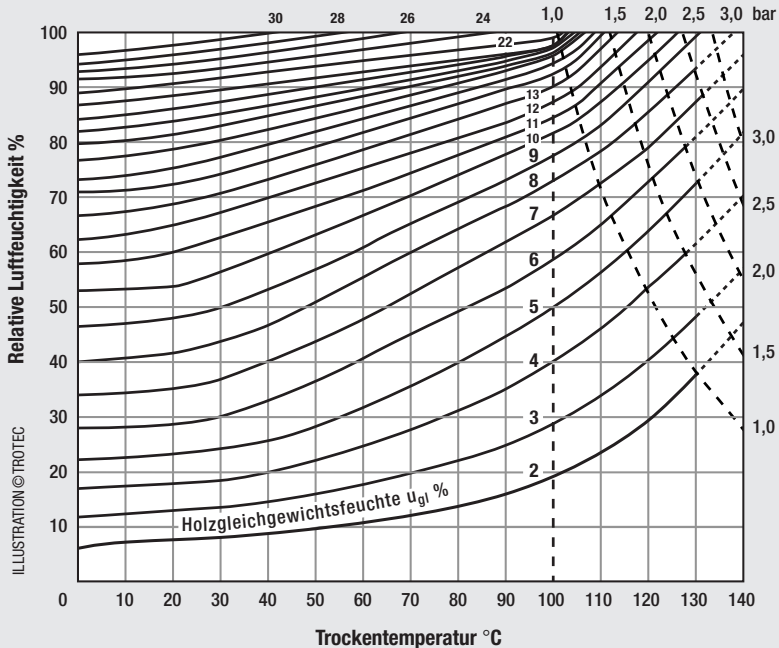


Abbildung 8: Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur ([3], nach Bollmann)

### Ausgleichs-/Gleichgewichtsfeuchte $u_g$

Unter der Ausgleichsfeuchte versteht man die Holzfeuchtigkeit, die sich in Abhängigkeit von dem umgebenden Klima einstellt. Es herrscht dann ein Gleichgewicht zwischen Holz- und Umgebungsfeuchte, bei dem das Holz gleich viel Feuchtigkeit abgibt wie aufnimmt. [3]

Dieser Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte und den unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten der angrenzenden Luft bei einer bestimmten Temperatur kann grafisch dargestellt werden.

Beispielsweise stellt sich bei einer Lufttemperatur von +20 °C und relativen Luftfeuchte von 60 % eine Gleichgewichtsfeuchte von 11 % ein (siehe Abbildung 8).

### Oberflächenfeuchte

In Verbindung mit der Widerstandsmessung wird die Oberflächenfeuchte als Feuchtegehalt bezeichnet, der mit eingeschlagenen, isolierten Elektroden bis in eine Tiefe von 1/6 der Holzdicke gemessen wird (siehe Kapitel 3.2.3). [3]

### Mittlere Holzfeuchte

Mit der mittleren Holzfeuchte wird der Feuchtegehalt bezeichnet, der mit eingeschlagenen, isolierten Elektroden bis in eine Tiefe von 30 % (etwa 1/3) der Holzdicke gemessen wird. Dies ist bei einer Einzelmessung der Wert, welcher der Holzfeuchte – ermittelt nach der Darr-Methode – am nächsten kommt. [3]

### Kernfeuchte

Mit der Kernfeuchte wird der Feuchtegehalt bezeichnet, der mit eingeschlagenen, isolierten Elektroden bis in eine Tiefe von 1/2 der Holzdicke gemessen wird. [3]

### 3.1.3 Beurteilen der Holzfeuchtigkeit anhand einiger Kennwerte

Ziel dieses Kapitels ist es, dass der Anwender einen schnellen Überblick über die von ihm ermittelten Messwerte erhält. Gleichzeitig soll er anhand von festgelegten Kennwerten die ermittelten Messwerte einordnen und fachgerecht interpretieren können.

In Tabelle 7 wird die mittlere Holzfeuchte „u“ als Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich dargestellt. Dementsprechend muss das Einbauholz bei einem beheizten und allseitig geschlossenen Bauwerk die Gleichgewichtsfeuchte „u“ von  $9 \pm 2$  % aufweisen.

In Tabelle 8 werden die derzeit aktuellen, charakteristischen Feuchtigkeitsgehalte aufgelistet und die normativen Quellen mit angegeben. Zusätzlich sind in Tabelle 9 nochmal einige wichtige Richtwerte der Holzfeuchte dargestellt.

In der Tabelle 10 wird auf ein weiteres, wichtiges Problem in der Holzverarbeitung und der Bauwerksdiagnostik eingegangen. Häufig schädigen Pilze und Insekten das Holz. Die Lebensbedingungen dieser biologischen Holzschädlinge werden vornehmlich durch die Temperatur und die Holzfeuchte bestimmt.

Die Tabelle gibt eine grobe Orientierung zu den günstigsten Lebensbedingungen an. In der einschlägigen Fachliteratur werden für jede Pilz- und Insektenart die einzelnen Temperatur- und Holzfeuchtebereiche differenziert aufgeführt. Dementsprechend wurde auf eine Auflistung dieser zahlreichen Pilz- und Insektenarten verzichtet.

Grundsätzlich gilt nach DIN EN 335-1, dass für die Entwicklung holzerstörender Pilze eine Holzfeuchte von mehr als 20 % erforderlich ist.

Gleichgewichtsfeuchte in %	Anwendungsbereich/Einbausituation
$9 \pm 2$ %	Allseitig geschlossene Bauwerke mit Heizung
$12 \pm 3$ %	Allseitig geschlossene Bauwerke ohne Heizung
$15 \pm 3$ %	Überdeckte offene Bauwerke
$18 \pm 6$ %	Konstruktionen, die allseitig der Witterung ausgesetzt sind

**Tabelle 7: Mittlere Holzfeuchte als Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich bzw. Einbauzustand nach DIN 1052-1**

Holzfeuchte in %	Richtwert nach	Charakterisierung des Richtwertes
$9 \pm 2$	DIN EN 13226	Sollfeuchte von Parkett zum Zeitpunkt der Anlieferung
10 bis 15	DIN 18355	Sollfeuchtigkeit bei Bauteilen, die ständig mit Außenluft in Berührung stehen (z.B. Fenster)
$12 \pm 2$	DIN 68368	Sollfeuchtigkeit bei Laubschnittholz für den Treppenbau
16 bis 18	DIN 4071 bis 4073, DIN 68122 bis 68128	Messbezugfeuchte für genormte Bohlen, Bretter und Fußleisten
16 bis 18	DIN 68126 T3	Halbtrocken bei Massivholzprofilen mit Schattennut

**Tabelle 8: Richtwerte der Holzfeuchte für die einschlägigen Verwendungsbereiche**

Holzfeuchte %	Charakterisierung des Kennwertes
0	Darrtrockenes, ofentrockenes Holz
20	Grenzwert für die Bezeichnung „trocken“ nach DIN 4074 und DIN 68365
23 bis 35	Fasersättigungsfeuchte bei 100% relativer Luftfeuchte
30 bis 35	Grenzwert für die Bezeichnung „halbtrocken“ nach DIN 4074 und DIN 68365
> 35	„Frisches“ Bauholz nach DIN 4074 und DIN 68365

**Tabelle 9: Wichtige Feuchtekenwerte**

	Biologische Schädigung	Temperaturbereich °C	Holzfeuchte %
<b>PILZE</b>	Befall durch holzverfärbende Pilze	18 - 25	30 - 120
	Befall durch holzzerstörende Pilze	3 - 38	35 - 60
<b>INSEKTEN</b>	Hausbockkäfer	28 - 30	28 - 30
	Gewöhnliche Nagekäfer	22 - 23	10 - 12
	Brauner Splintholzkäfer	26 - 27	ca. 16

**Tabelle 10: Zusammenstellung der Temperatur- und Holzfeuchtebereiche, innerhalb derer eine Strukturschädigung durch biologischen Befall hervorgerufen werden kann. (nach [4])**

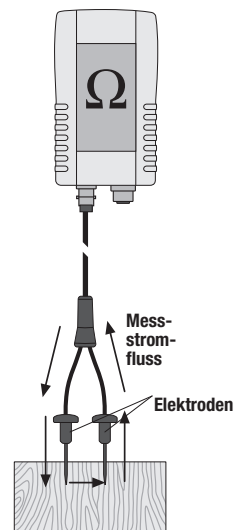
## 3.2 Holzfeuchte-Messung – Widerstandsprinzip

Diese Messmethode ist eine indirekte Messmethode, da über die elektrische Leitfähigkeit des Holzes auf die Feuchtigkeit zurückgeschlossen wird.

Vor der Beschreibung des eigentlichen Messvorgangs wird erst das Messprinzip erläutert, um das Verfahren in der Genauigkeit und den möglichen Messproblemen besser einschätzen zu können. Hier anschließend werden die verfügbaren Sensoren entsprechend der Zusammensetzung, den Einsatzgebieten und der Handhabung vorgestellt.

In Anlehnung an die DIN EN-13183-2 (Juli 2002) wird dann eine häufig auftretende Messaufgabe beschrieben, die problemlos mit dem Messgerät erfüllt werden kann.

Zum Schluss wird auf die Problematiken und Störeinflüsse hingewiesen, um möglichst präzise Messergebnisse erzielen zu können.



**Abbildung 9: Skizzenhafte Darstellung der Widerstandsmessung mit dem T2000**

### 3.2.1 Messprinzip

Beim Messprinzip des Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit, wird im Messgerät ein elektrischer Messstrom erzeugt, der mit Hilfe von Elektroden durch das Holz geleitet wird.

Mit steigendem Wassergehalt des zu untersuchenden Holzes sinkt der Widerstand, beziehungsweise nimmt die Leitfähigkeit zu.

Der gemessene Widerstand ist also umgekehrt proportional zur vorhandenen Wassermenge. Hat das Messgut einen hohen Widerstand, ist der Feuchtegehalt gering. Hat es einen niedrigen Widerstand, ist der Feuchtegehalt hoch.

Die Abbildung 9 veranschaulicht diesen Vorgang. Das Messgerät erzeugt einen Messstrom und eine bestimmte Spannung.

Dieser Messstrom fließt über die erste Elektrode in den Baustoff und über die zweite Elektrode wieder zur Stromquelle zurück. Die Spannung, die an den Elektroden anliegt und die Stärke des Messstroms sind bekannt bzw. werden vorgegeben.

Nach dem Ohmschen Gesetz kann dadurch der elektrische Widerstand des Holzstückes errechnet werden.

In Abbildung 10 ist dieser Zusammenhang anhand einer Feuchte-/Widerstandskurve dargestellt. Demnach entsprechen 10 MOhm einer Holzfeuchte von 12 % und 0,1 MOhm einer Holzfeuchte von 36 %.

Die Holzfeuchtemessung mit Hilfe des Widerstandsprinzips lässt sich besonders gut im Bereich zwischen 6 % und 30 % Holzfeuchte anwenden. Zwischen dem darrtrockenen Zustand und etwa 6 % Feuchte nimmt der Widerstand exponentiell ab. Von dort bis zur holzeigenen Fasersättigung (etwa 30 %) ist der Zusammenhang nahezu linear und oberhalb des Fasersättigungspunktes ändert sich der Widerstand nur noch wenig mit der Feuchte.

Deshalb werden die meisten Messungen oberhalb dieser Holzfeuchte – in Abhängigkeit von der Art, Rohdichte und Holztemperatur – zunehmend ungenau (Abbildung 13).

#### Einfluss der Leitfähigkeit

Hieraus erklärt sich u.a. die Notwendigkeit, warum vor jeder Feuchtemessung die zu messende Holzsorte ausge-

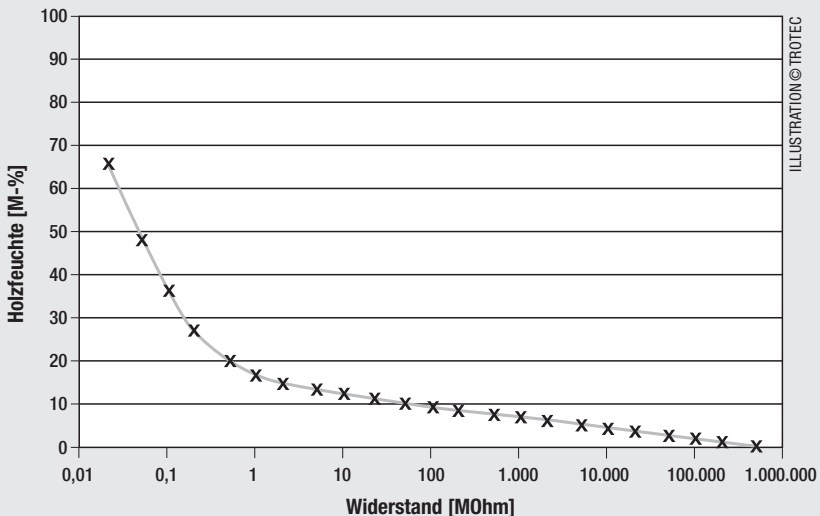


Abbildung 10: Darstellung einer Widerstands-/Holzfeuchtemesskurve des T2000

wählt werden muss. Nicht jede Holzsorte weist nämlich die gleiche Leitfähigkeit auf, sodass die Hölzer in bestimmte Klassen (Mat.-Nr.) eingeteilt werden. [9]

So sind beispielsweise bei der Pinie und der Douglasie (Mat.-Nr. 12) die Messwiderstände identisch zu der tatsächlichen Holzfeuchte.

Hingegen entspricht derselbe Widerstand bei der Zirbelkiefer (Mat.-Nr. 02) einer höheren Holzfeuchte. Aus diesem Grund sind im Messgerät verschiedene Widerstandskurven hinterlegt, von denen in Abbildung 11 vier Kurven dargestellt sind.

### Einfluss der Temperatur

Die Leitfähigkeit wird darüber hinaus durch die Temperatur des Holzes beeinflusst. So verursacht eine Temperaturerhöhung im hygroskopischen Feuchtebereich eine scheinbare Erhöhung der Feuchte um 0,03 bis 0,15 % [1]. Dieser Messfehler lässt sich über die Temperaturkompensation des Messgerätes korrigieren. [10]

In Abhängigkeit von der Gerätetemperatur werden die Widerstandskurven der ausgewählten Holzsorte automatisch angepasst (siehe Abbildung 12).

Um präzise Feuchtemessungen durchführen zu können, müssen die Holztemperatur und die Messgerätetemperatur identisch sein.

#### Praxistipp:

Zur schnellen Kontrolle der Holzoberflächentemperatur kann ein Pyrometer eingesetzt werden.

Ist dies nicht gegeben (z.B. kaltes Holz oder Messung während einer Holz Trocknung), kann an den 5-Pol-Stecker ein Pt100-Sensor angeschlossen werden.

Das Messgerät erkennt den Sensor im Holzfeuchte-Messmodus (120) automatisch und kompensiert den Messfehler entsprechend der Pt100-Temperaturmessung.

### Vorgehensweise bei nicht klassifizierten Holzsorten

Die Beschreibung des Widerstandsprinzips und der damit verbundenen Klassifizierung der Holzsorten macht deutlich, dass für das zu messende Holz eine Widerstands-/Feuchtekurve (Materialnummer) gegeben sein muss.

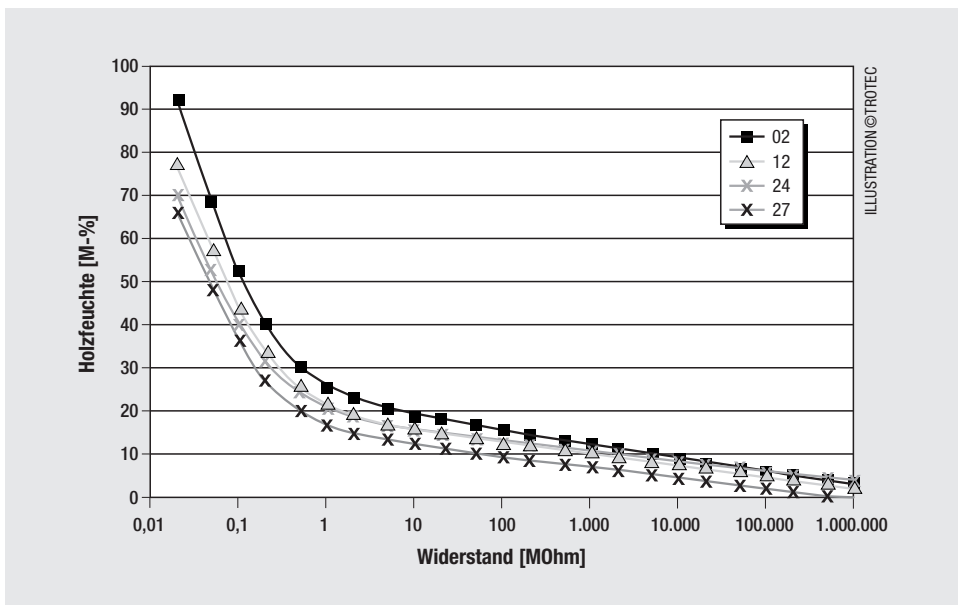


ILLUSTRATION ©TROTEC

Abbildung 11: Holzfeuchte in Abhängigkeit des gemessenen Widerstands für die Sorten 02, 12, 24, 27 bei 20 °C

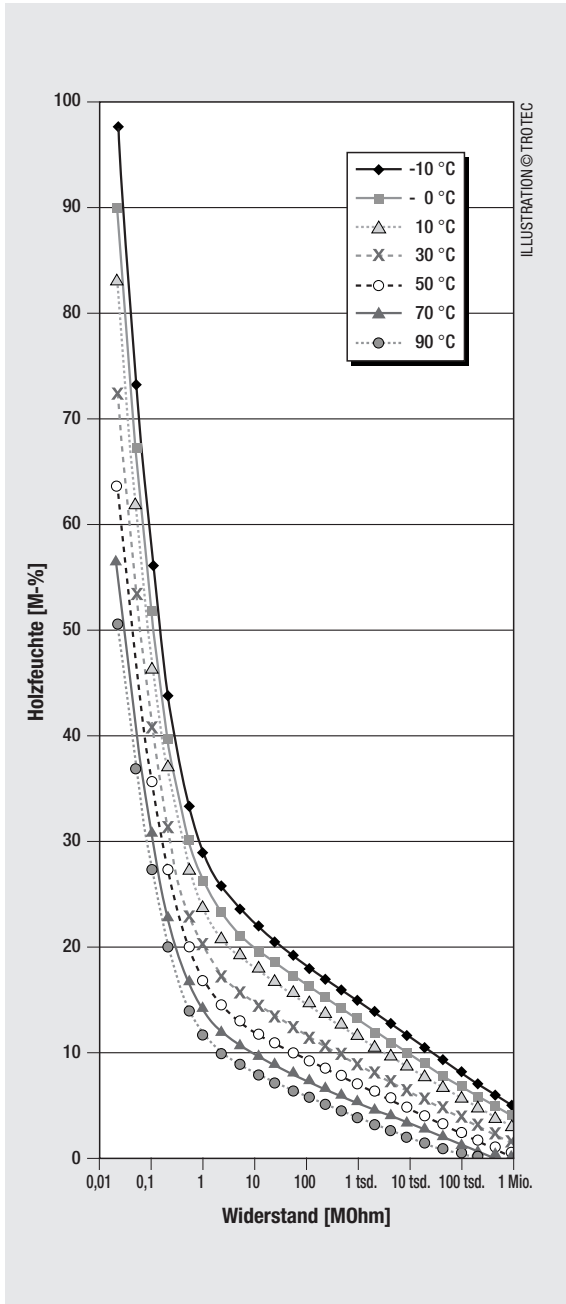


Abbildung 12: Temperaturkompensation für die Holzsorte 12

Sollte in der TROTEC®-Holzsortentabelle eine Holzsorte nicht aufgeführt sein, wird empfohlen die Holzsorte mit der Mat.-Nr. 08 zu messen.

Diese Kurve stellt den Mittelwert aller hinterlegten Materialkurven dar und minimiert somit den Messfehler. Zur genauen Ermittlung einer bestimmten Holzfeuchtemesskurve setzen Sie sich mit uns in Verbindung.

### Exemplarischer Vergleich von Messwert-Feuchtegehalt bei Holzfeuchtemessungen nach dem Widerstandsprinzip

Durch das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen wurden im Rahmen einer Forschungsarbeit an ausgewählten Holzstücken die Widerstands-/ Feuchtemesskurven überprüft und optimiert.

An zehn verschiedenen Messterminen wurden zum einen die Widerstandsmessung mit dem T2000 durchgeführt und zum anderen sind die Feuchtegehalte über die Darmmethode ermittelt worden.

Die Widerstandsmessungen sind an der Oberfläche, bei 1/3 der Querschnittsdicke, sowie im Kern des Prüfgutes durchgeführt worden.

Exemplarisch sind in Abbildung 13 Ergebnisse zusammengestellt, die an einem Fichten-, Eichen- und Buchenstück ermittelt wurden.

Die dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass die Widerstandsmessung mit abnehmendem Wassergehalt deutlich an Genauigkeit zunehmen. Die größte Messgenauigkeit liegt im Bereich zwischen 6 und etwa 28 % Holzfeuchte.

Holzsorte	wissenschaftlicher Name	Code-Nr. T2000S
Fichte	Picea abies	8
Kiefer	Pinus sylvestris	1
Lärche	Larix decidua	9
Tanne	Abies alba	1
Douglasie	Pseudotsuga menziesii	12
Rüster	Feldrüster (Ulmus glabra)	8
Buche	Fagus sylvatica	14
Eiche	Stiel- oder Traubeneiche (Quercus robur oder Quercus petraea)	12
Robinie	Rubinia pseudoacacia	8
Kastanie	Aesculus hippocastanum	8
Ahorn (kanadischer und amerikanischer)	Acer platanoides, Acer pseudoplatanus	8
Esche	Fraxinus excelsior	8

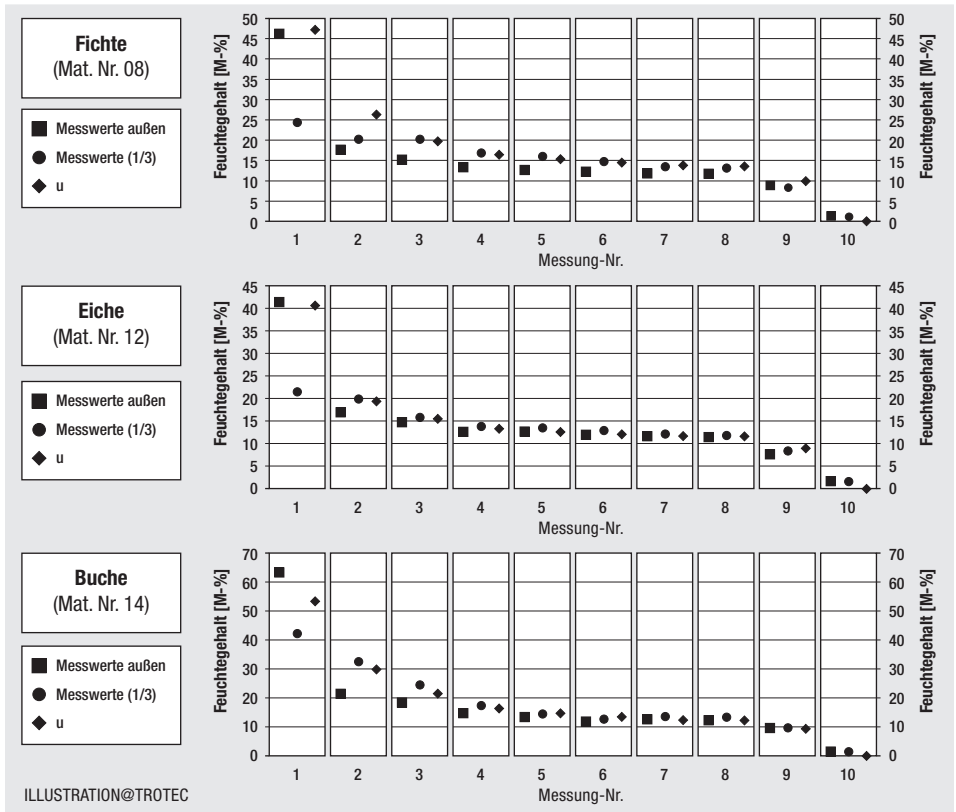


Abbildung 13: Vergleich Messwert-Feuchtegehalt bei Holzfeuchtemessungen nach dem Widerstandsprinzip an einem Fichten-, Eichen- und Buchenstück [18]



### 3.2.2 Elektroden zur Holzfeuchtemessung – Handhabung und Messvorgang

Zur Bestimmung der Holzfeuchte lassen sich unterschiedliche Bauformen der passiven Elektroden einsetzen, die je nach Einsatzgebiet Vor- und Nachteile aufweisen. Um ein möglichst genaues Messergebnis zu erzielen, müssen bei der Auswahl der Elektroden gewisse Randbedingungen eingehalten werden.



#### TS 60 Hand-Elektrode

Die Hand-Elektrode TS 60 setzt sich zusammen aus dem schlagfesten Kunststoffkörper und den zwei Sechskant-Überwurfmuttern. In die Überwurfmuttern lassen sich die Elektrodenspitzen einsetzen, die in folgenden Längen lieferbar sind:

- 20 mm (max. Eindringtiefe von 14 mm)
- 30 mm (max. Eindringtiefe von 24 mm)
- 40 mm (max. Eindringtiefe von 34 mm)
- 60 mm (max. Eindringtiefe von 54 mm)

Einsatzgebiet ist u.a. die Erfassung der Holzfeuchte bei Schnittholz oder Plattenwerkstoffen aus Holz (z. B. Spanplatten oder Faserplatten).

#### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Überwurfmuttern mit den jeweiligen Elektrodenspitzen bestücken und mit einem Schraubenschlüssel anziehen.
2. Die Feuchtemessungen in Anlehnung an die DIN EN 13183-2 durchführen (siehe auch Kapitel 3.2.3).
3. Die Nadeln quer zur Faserrichtung in das Messgut einstechen. Die Einschlagtiefe sollte dabei entsprechend der zu ermittelnden Holzfeuchte gewählt werden. In der Regel 1/3 der Holzdicke.



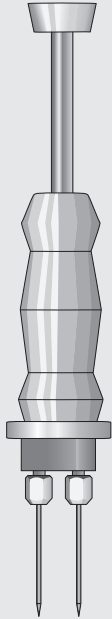
#### TS 8/200 und TS 8/300 Rundelektroden, 4 mm

Die Einstech-Elektroden TS 8/200 und TS 8/300 sind nicht isolierte Elektroden, die sich lediglich in der Länge unterscheiden (200 mm oder 300 mm).

Das Einsatzgebiet liegt u.a. bei der Feuchtemessung an losen Haufwerken wie beispielsweise Holzwolle oder Sägespäne.

#### Bei der Handhabung sollte folgendes beachtet werden:

1. Vor dem Einstechen der Elektroden muss das Messgut verdichtet werden. Sägespäne sollten mit ca. 8 kg Pressdruck verdichtet werden. Bei Holzwolle ist eine Verdichtung von 1 kg ausreichend.
2. Vor dem Einstechen der Elektroden muss ausgeschlossen sein, dass sich in dem Haufwerk Fremdkörper befinden.



### TS 70 Ramm-Elektrode

Die Rammelektrode setzt sich im wesentlichen zusammen aus dem beweglich geführten Schlaggriff und den Elektroden-spitzen. Im allgemeinen Einsatz finden die unisolierten Elektroden-spitzen Verwendung.

Zur präzisen Zonen- bzw. Tiefenmessung, insbesondere bei Hölzern mit unterschiedlicher Feuchteverteilung (z. B. Flüssigkeits-nester), empfiehlt sich der Einsatz von teflonisolierten Elektroden-spitzen. Diese sind in den Längen 45 und 60 mm lieferbar.

### Bei der Handhabung sollte folgendermaßen vorgegangen werden:

1. Überwurfmuttern mit den jeweiligen Elektroden-spitzen bestücken und mit einem Schraubenschlüssel anziehen.
2. Die Elektrode quer zur Faserrichtung des Messgutes positionieren.
3. Sonde senkrecht auf das Werkstück stellen und die Elektroden-spitzen mit dem beweglichen Schlaggriff bis in die gewünschte Messtiefe eintreiben. Die Tiefe kann unter Zuhilfenahme eines Maßstabes kontrolliert werden.
4. Nach dem Messvorgang sollten die Spitzen mit dem beweglichen Schlaggriff – mit Schlagrichtung nach oben – vorsichtig aus dem Messgut herausgeschlagen werden. Ein Verbiegen der Spitzen wird hierdurch vermieden.

### Der Messvorgang bei der Widerstandsmessung

Die Holzfeuchtemessung kann über zwei unterschiedliche Methoden durchgeführt werden.

Zum einen über die automatische Temperaturkompensation mit Hilfe eines Pt100-Sensors. Zum anderen ohne einen Pt100-Sensor, wobei zur Kompensation die Temperatur im Geräteinneren des T2000 verwendet wird.

Hierbei sollte jedoch unbedingt darauf geachtet werden, dass die Holztemperatur und die im Display angezeigte Temperatur nahezu identisch sind.

Hintergrund ist die temperaturabhängige Leitfähigkeit des Holzes (siehe Messprinzip, Kapitel 3.2.1). Bei höherer Holztemperatur im Vergleich zur Gerätetemperatur wird eine

höhere Holzfeuchte als die effektiv vorhandene angezeigt. Der scheinbar höhere Wert wird jedoch bei Verwendung eines externen Pt100-Sensors korrigiert.

Vor dem eigentlichen Messvorgang sind demnach immer die Temperaturverhältnisse zu prüfen. Dazu wird mit dem Pyrometer die Oberflächentemperatur der Holzsorte gemessen und mit der Gerätetemperatur (Anzeigefeld Sensor 2) verglichen.

Sind beide Temperaturen identisch, kann der Messvorgang ohne Pt100-Sensor durchgeführt werden. Differieren die beiden Messwerte, sollte der Messvorgang mit einem Pt100-Sensor zur Messung der Holztemperatur durchgeführt werden.

### Messvorgang ohne Pt100-Sensor

*(Anzeigetemperatur und Holztemperatur sind identisch)*

1. Sensoren in Abhängigkeit von der Messaufgabe und dem Einsatzgebiet auswählen.
2. Die Handhabung und Messvorbereitungen entsprechend den ausgewählten Elektroden durchführen.
3. Elektrode(n) mit dem Kabel TC 20 an den BNC-Stecker anschließen.
4. Gerät einschalten.
5. Messmethode durch Wahl der Sens-Nummer 120 (Holzfeuchtemessung) aktivieren.
6. Die zu messende Holzsorte über die Mat-Nr. des unteren Konfigurations- und Abgleichmenüs einstellen.

Eine Liste der unterstützten Holzsorten mit den entsprechenden Material-Nummern finden Sie im Holzsorten-Handbuch oder in unserer Holzsorten-Datenbank unter [www.trotec.de](http://www.trotec.de).

7. Im Display wird im Anzeigefeld des Sensors 1 der aktuelle Messwert in % Holzfeuchte angezeigt.

Im Anzeigefeld des Sensors 2 erscheint die Gerätetemperatur, die zur Temperaturkompensation herangezogen wird.

8. Holzfeuchte und Temperatur am Display ablesen.



### Messvorgang mit Pt100-Sensor

*(Anzeigetemperatur und Holztemperatur sind nicht identisch)*

1. Sensoren in Abhängigkeit von der Messaufgabe und dem Einsatzgebiet auswählen.
2. Die Handhabung und Messvorbereitungen entsprechend den ausgewählten Elektroden durchführen.
3. Elektrode(n) mit dem Kabel TC 20 an den BNC-Stecker anschließen.
4. Pt100-Sensor an den 5-Pol-Stecker anschließen.
5. Gerät einschalten.
6. Messmethode durch Wahl der Sens-Nummer 120 (Holzfeuchtemessung) aktivieren.
7. Die zu messende Holzsorte über die Mat-Nr. des unteren Konfigurations- und Abgleichmenüs einstellen.

Eine Liste der unterstützten Holzsorten mit den entsprechenden Material-Nummern finden Sie im Holzsorten-Handbuch oder in unserer Holzsorten-Datenbank unter [www.trotec.de](http://www.trotec.de).

8. Im Display wird im Anzeigefeld des Sensors 1 der aktuelle Messwert in % Holzfeuchte angezeigt.

Im Anzeigefeld des Sensors 2 erscheint die Messtemperatur des Pt100-Sensors in °C, die zur Temperaturkompensation herangezogen wird.

9. Pt100-Sensor auf das Messgut aufdrücken.
10. Holzfeuchte und Temperatur nach einer Ansprechzeit von etwa 10 Sekunden am Display ablesen.

### 3.2.3 Messen der Holzfeuchte an Schnittholz

Die Bestimmung der Holzfeuchte an einem Stück Schnittholz ist die Form der Messung, die am häufigsten durchgeführt werden muss. Dementsprechend sollen hiermit, in Anlehnung an die DIN EN 13183-2, die wesentlichen Arbeitsschritte einer solchen Widerstandsmessung aufgeführt werden.

Der Messvorgang wird in vier Arbeitsschritte untergliedert. In die aufgabenspezifische Gerätejustierung, die Auswahl der Messposition, die Häufigkeit der Messungen und die Dokumentation der Prüfergebnisse.

#### 1. Arbeitsschritt – Gerätejustierung

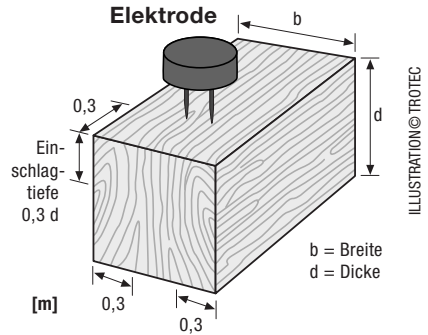
Entsprechend der obigen Angaben wird die geeignete **Elektrode** zur Holzfeuchtemessung ausgewählt und an das Basisgerät angeschlossen.

Dann wird nach obiger Beschreibung die Sens-Nummer 120 (Holzfeuchtemessung) aktiviert. Anschließend wird über die Mat.-Nummer die vorliegende Holzsorte ausgewählt. Die zugehörige Mat.-Nummer finden Sie in der Holzsorten-Tabelle oder im Internet unter [www.trotec.de](http://www.trotec.de).

Es folgt eine Kontrolle mittels Pyrometer, ob die Holztemperatur mit der Gerätetemperatur übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall, wird so lange gewartet bis die beiden Temperaturen übereinstimmen oder der Temperaturfühler Pt100 wird eingesetzt, mit dessen Hilfe eine Temperaturkompensation über das gezielte Abgreifen der Oberflächentemperatur am Messgut durchgeführt wird.

#### 2. Arbeitsschritt – Auswahl der Messposition

Grundsätzlich ist die Messung an Stellen durchzuführen, an denen keine sichtbaren Fehler (z.B. Risse, Harzgallen, Äste) erkennbar sind. Anschließend ist die Messposition entsprechend der Abbildung 14 zu wählen.



**Abbildung 14:**  
**Lage der Messposition (nach DIN EN 13 183-2)**

Die Elektrode ist quer zur Faserrichtung in einem Abstand von 0,3 m von einem der beiden Enden des Schnittholzes einzuschlagen. Ist das Prüfstück kürzer als 0,6 m, liegt die Messposition in der Mitte des Messgutes. Zur Ermittlung der mittleren Holzfeuchte sollten dann die isolierten Elektroden in eine Tiefe von 0,3 d (d = Dicke des Holzes) eingeschlagen werden.

#### 3. Arbeitsschritt – Häufigkeit der Messungen

In Abhängigkeit der zu prüfenden Stücke werden gemäß der DIN EN 13183-2 unterschiedliche Messhäufigkeiten gefordert, die in Tabelle 11 angegeben sind.

#### 4. Arbeitsschritt – Dokumentation

Bei einer Dokumentation der Prüfergebnisse sollten folgende Angaben nicht fehlen:

- Prüfer, Datum der Prüfung
- Bezeichnung des Schnittholzes: Art, Maße, Anzahl
- Lieferant, Kunde, interne Codierung usw.
- Angaben zum Gerätetyp und den Messparametern: Elektrodenart und Messtiefe, Holzartcodierung, Temperatureinstellung

Anzahl der Prüfstücke	1	2	3	4	5	> 5
Anzahl der Messungen je Prüfstück <sup>1)</sup>	3	3	2	2	2	1

<sup>1)</sup>: Die Messpositionen sollen nach Zufallsgesichtspunkten entlang der Länge ausgewählt werden, in einem Abstand von 0,3 m (oder in der Mitte bei Prüfständen kürzer als 0,6 m) vom Ende.

**Tabelle 11: Probenentnahme und Messhäufigkeit (nach DIN EN 13 183-2)**

**DOKUMENTATION**

**Kunde**

\_\_\_\_\_  
Name

\_\_\_\_\_  
Straße

\_\_\_\_\_  
PLZ / Ort

\_\_\_\_\_  
Telefon / Telefax

\_\_\_\_\_  
Ansprechpartner:

**Lieferant**

\_\_\_\_\_  
Name

\_\_\_\_\_  
Straße

\_\_\_\_\_  
PLZ / Ort

\_\_\_\_\_  
Telefon / Telefax

\_\_\_\_\_  
Ansprechpartner

**Messung T2000**

\_\_\_\_\_  
Elektrodenart

\_\_\_\_\_  
Messtiefe [cm]

**Prüfgut**

\_\_\_\_\_  
Holzart

\_\_\_\_\_  
Maße

\_\_\_\_\_  
Lieferumfang

**Messparameter**

Mat.-Nummer / Holzartcodierung    Holztemperatur °C    Gerätetemperatur °C

**Temperaturkompensation**

mit PT 100-Sensor     ohne PT 100-Sensor

Prüfstück	1			2			3			4			5		
Messergebnis in M-%															

**Bestätigung**

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Straße

\_\_\_\_\_  
PLZ / Ort

\_\_\_\_\_  
Firma

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum / Unterschrift

ILLUSTRATION © TROTEC

### 3.2.4 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der Widerstandsmessung

Wie für jede messtechnische Untersuchung, gilt auch bei diesem Messverfahren die Grundsatzregel: „Schaffen Sie sich immer gleichbleibende Messbedingungen, dann werden die möglichen Fehlerquellen minimiert!“. Aus dem oben beschriebenen Messprinzip und den materialspezifischen Eigenschaften ergeben sich folgende Hinweise:

- **Vor der Messung an Hölzern muss die richtige Sens-Nummer (120) ausgewählt werden.**
- **Vor der Messung muss die richtige Mat.-Nummer (siehe Holzsorten-Liste) ausgewählt werden.**
- Bei Messungen an Schnitthölzern sollte sich an die Anweisungen der DIN EN 13183-2 gehalten werden.
- Für die jeweilige Aufgabenstellung die geeignetste Elektrode auswählen.
- Keine verbogenen oder fehlerhaft isolierten Einschlagelektroden verwenden.
- Positionieren der Elektroden immer quer zur Holzfaserrichtung. Die Leitfähigkeit quer zur Faserrichtung ist geringer als entlang der Faser. Sie variiert je nach Holzart um den Faktor 2,3 bis 8.
- **Einschlagtiefe** der Elektroden nach folgenden Kriterien auswählen: Oberflächenfeuchte = 1/6 Brettstärke, Mittlere Holzfeuchte = 1/3 Brettstärke (Vergleichswert für die Darr-Methode), Kernfeuchte = 1/2 Brettstärke
- **Bei der Wahl der Messpositionen sind drei Punkte zu beachten:**
  1. *Immer an drei Messpositionen die Feuchte des Messgutes messen, um über das arithmetische Mittel eine hinreichende Genauigkeit zu erzielen.*
  2. *Es sollte nicht an der Stirnseite gemessen werden, da dort trockene Bereiche vorliegen.*
  3. *Möglichst nicht über Rissen, Ästen und Harzgallen der Hölzer messen.*
- Ölige und/oder wässrige Holzschutzmittel beeinflussen das Messergebnis.
- Möglichst kein Holz messen, welches eine Temperatur unter  $-5\text{ °C}$  aufweist.
- Statische Aufladung des Messgutes durch Reibung vermeiden, da ansonsten ein verfälschtes Messergebnis hervorgerufen wird.
- Bei einer Holzfeuchte die niedriger als 10 % ist, können am Prüfgut elektrostatische Kräfte auftreten, die das Messergebnis extrem verfälschen. Erfahrungsgemäß tritt dies am Ausgang von Furniertrocknungsanlagen auf. In jedem Fall sollte durch geeignete Erdungsmaßnahmen die statische Aufladung beseitigt werden.
- Die größte Messgenauigkeit liegt im Bereich zwischen 6 bis etwa 28 % Holzfeuchtigkeit. Über 28 % werden die Messergebnisse ungenauer, da sich der Widerstand nur noch wenig mit der Feuchte ändert. Unterhalb 6 % Holzfeuchte sind praktisch keine aussagekräftigen Messungen mehr möglich, weil das Ergebnis durch molekulare Anziehungskräfte bestimmt wird.
- Oberhalb des Fasersättigungspunktes verliert die Feuchtemessung an Genauigkeit.
- Die TS 60 Hand-Elektrode sowie das untere Kunststoffteil der TS 70 sollten je nach Gebrauch in regelmäßigen Abständen gereinigt werden, um einen unkontrollierten Stromfluss zwischen den Elektroden zu verhindern. Dies würde zu Fehlmessungen führen. Zur Reinigung eignet sich destilliertes Wasser.
- Die angezeigte Messgerätetemperatur muss nahezu identisch zur Holztemperatur sein. Ist dies nicht der Fall, sollte der Temperaturunterschied über den PT100-Sensor kompensiert werden, der eine automatische Korrektur der gemessenen Holzfeuchte einrechnet. Bei einer Raumtemperatur von  $20\text{ °C}$  und einer Holztemperatur von  $30\text{ °C}$  wird das Messergebnis um etwa 1,5 % nach oben verfälscht, wenn der Temperaturkompensation keine Beachtung geschenkt wird.
- Keine defekten Kabel verwenden.

- Die Genauigkeit der Messung ist abhängig vom Anpressdruck der Messelektroden. Die Elektroden müssen mit dem Holz so gut verbunden sein, dass der Übergangswiderstand gegenüber dem des Messwiderstands klein ist.
- Zur Messprobenkontrolle sollten die ermittelten Werte stichprobenartig über eine Vergleichsdarrprobe kontrolliert werden.

### 3.3 Holzfeuchte-Messung – kapazitives Verfahren

Neben der Widerstandsmessung bietet das T2000 die Möglichkeit, die Holzfeuchte über das kapazitive Messverfahren zu ermitteln.

Dieses ebenfalls indirekte Verfahren ist insbesondere für orientierende Messungen geeignet, wenn Auffeuchtungen und Feuchteverteilungen am Holzwerkstoff ermittelt werden sollen.

Die relative Messung lässt dann schnelle, zerstörungsfreie Aussagen zu, bei denen zwischen feuchten und trockenen Zonen unterschieden werden kann.

Grundsätzlich gilt hierzu, dass die Ergebnisse dieser Messmethode nicht an die Genauigkeit der Widerstandsmessung heranreichen können.

#### 3.3.1 Messprinzip

Das kapazitive Messverfahren ist ein indirektes Verfahren, da nicht der Wassergehalt ermittelt wird, sondern die dielektrische Materialeigenschaft des Holzwerkstoffes gemessen wird.

Genauer betrachtet wird die Dielektrizitätskonstante „ $\epsilon$ “ des Holzes bestimmt. Diese Konstante ist, wie der elektrische Widerstand, ein Merkmal des Holzwerkstoffes, dessen Wert sich ändert, wenn der Baustoff Feuchtigkeit aufnimmt. [2]

Die Messung unterliegt der Beeinflussung eines kapazitiven, elektrischen Feldes. Bei dem Sensor TS 300 SDI bildet sich das Messfeld zwischen dem aktiven Kugelkopf-

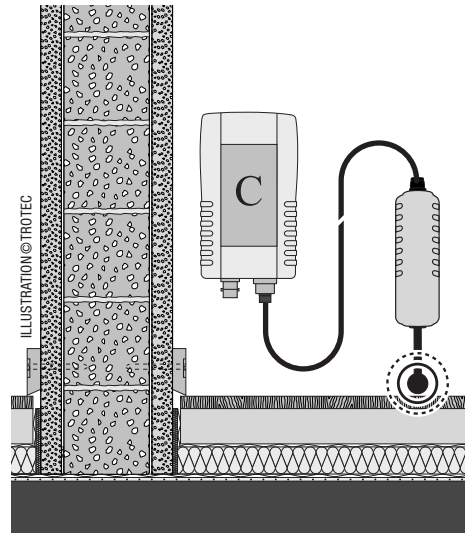


Abbildung 15: Schematische Darstellung der kapazitiven Holzfeuchte-Messung von Parkett mit dem T2000

kondensator und dem zu beurteilenden Holzwerkstoff aus (siehe Abbildung 15).

Die Veränderung des elektrischen Feldes durch die physikalischen Eigenschaften (z. B. Rohdichte und Feuchte) wird erfasst und als digitaler Zahlenwert (Digit) angezeigt.

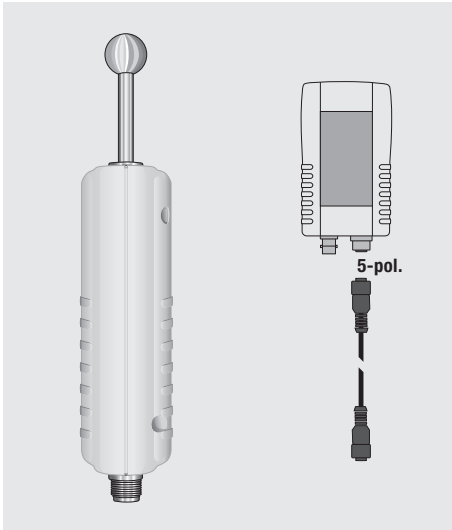
Eine eingehendere Erläuterung des Messprinzips finden Sie im Kapitel 4.3 (Baustofffeuchte-Messung).

#### 3.3.2 Der TS 300 SDI-Sensor zur Holzfeuchtemessung – Messvorgang und Handhabung

Zur orientierenden Messung der Feuchteverteilung an Holzwerkstoffen lässt sich der kapazitive Sensor TS 300 SDI einsetzen.

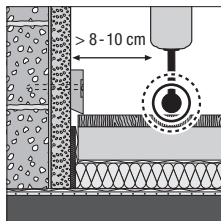
Bei der Handhabung sollte immer bedacht werden, dass die nachfolgenden Randbedingungen eingehalten werden, um ein möglichst genaues Messergebnis zu erzielen.

Der Baufeuchtesensor TS 300 SDI setzt sich im wesentlichen aus dem Kugelkopf und dem Schaft zusammen, der eine abgegrenzte Grifffläche aufweist.



Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten (siehe auch Kapitel Baustofffeuchte-Messung):

1. Die Einwirktiefe des Messfeldes beträgt 2 bis 4 cm.
2. Der Sensor darf beim Einsatz weder im Arretierschlitz des Basisgerätes befestigt sein, noch darf der Sensorgriff zu weit oben angefasst werden (siehe Abbildung „Falsch/Richtig“). In beiden Fällen würde ein zu hoher Messwert angezeigt.



3. Den Sensor möglichst senkrecht zum Messgut fest aufsetzen. Um Messfehler zu vermeiden, muss ein Mindestabstand von 8 bis 10 cm zu Eckbereichen eingehalten werden.

#### Praxistipp:

Im Vorfeld einer Holzfeuchtemessung mit dem Widerstandsverfahren lassen sich mit der kapazitiven Methode oberflächennahe Feuchtester schnell und einfach lokalisieren. Dem entsprechend können je nach Aufgabenstellung repräsentative Einstechpositionen ermittelt werden.

### Messvorgang

Wenn eine Abschätzung der oberflächennahen Feuchteverteilung am Holzwerkstoff durchgeführt werden soll, müssen grundsätzlich folgende Arbeitsschritte beachtet werden:

1. Den Sensor TS 300 SDI mit dem Verbindungskabel TC 30 SDI an das Messgerät anschließen.
2. Gerät einschalten.
3. Messmethode durch Wahl der Sens-Nummer 200 überprüfen und ggf. einstellen.
4. Funktionskontrolle durchführen. Sensor an der Grifffläche anfassen und in die Luft halten. Der Sensor kalibriert sich nun selbst, was durch ein mehrfaches akustisches Signal bestätigt wird. Der Anzeigewert sollte danach zwischen 0 und 5 Digits betragen, anderenfalls ist der Sensor nicht bestimmungsgemäß kalibriert (siehe Bedienungsanleitung Kapitel 6.8).
5. Den Kugelkopf des Sensors fest auf die Oberfläche des Baustoffs aufdrücken und den Schaft senkrecht zur Oberfläche ausrichten. Es sollte darauf geachtet werden, dass der Sensor auf möglichst glatten Oberflächen platziert wird. Raue Oberflächen verfälschen den Messwert.
6. Im Display wird im Anzeigefeld des Sensor 1 der aktuelle Messwert ohne Einheit angezeigt. Zum besseren Verständnis wird dieser Anzeigewert als Digit (Digitaler Zahlenwert) verstanden.
7. Messwert im Display ablesen und den Vergleichswert aus den beigefügten Tabellen (siehe Kapitel 3.3.4) ermitteln.



**Praxistipp:**

Mit dem TS 300 SDI kann zusätzlich auch die Alarmfunktion des T2000 eingesetzt werden.

**Vorteil:** Mit dem Alarmgrenzwertsensor können auch große Flächen schnell und effektiv vermessen werden. Der Anwender kann sich auf das Messobjekt konzentrieren, ohne die Messergebnisse permanent auf dem Display beobachten zu müssen:

Sobald der voreingestellte Grenzwert überschritten wird, alarmiert der TS 300 SDI-Sensor den Anwender durch ein akustisches Signal!



Die Alarmfunktion ermöglicht eine unkonventionelle und äußerst effektive Einsatzmöglichkeit der Flächenmessung:

Dabei wird das Messgerät so gehalten, dass der TS 300 SDI-Sensor am angeschlossenen TC 30 SDI-Kabel möglichst senkrecht den Boden berührt.

Nun kann der Sensor beim Abschreiten der Messzone neben dem Anwender hergezogen werden. Wird der definierte Grenzwert überschritten, alarmiert der Sensor den Anwender.

Noch schneller kann man eine Flächenmessung wahrscheinlich nicht durchführen!

### 3.3.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der kapazitiven Messmethode

Aus dem oben beschriebenen Messprinzip ergeben sich wichtige Hinweise für den Mess-Einsatz des TS 300 SDI:

- Die Messergebnisse dürfen ausschließlich zu orientierenden Feuchtemessungen herangezogen werden. Ein Rückschluss auf absolute Feuchte-Werte in M.-% ist nur bei den Messungen möglich, die unter den selben Randbedingungen und Material-Zusammensetzungen ermittelt wurden, wie die in der Abbildung 13.
- Eine wichtige Einflussgröße auf den Messwert ist die Rohdichte des Holzes. Je höher die Rohdichte ist, desto höher fällt der Messwert aus.
- Vor der Messung muss die Oberfläche des Holzes von Verunreinigungen befreit werden (z. B. Farbreste, Staub).
- Wenn im Holzwerkstoff Metall (z. B. Nägel, Schrauben etc.) enthalten ist und sich im Messfeld des Sensors befindet, steigt der Messwert sprunghaft an.
- Wenn der Kugelkopf Kondensator in Ecken gehalten wird (z.B. Fensterrahmen), fällt der Messwert grundsätzlich höher aus, da sich mehr Substanz im Streufeld des Messkopfes befindet. Es muss von der Ecke ein Abstand von mehr als 8 bis 10 cm eingehalten werden.
- Den Kugelkopf nicht abkippen.
- Kugelkopf immer fest an die zu messende Oberfläche andrücken.
- Die Einwirktiefe beim TS 300 SDI Sensor liegt je nach Rohdichte und Holzfeuchte bei 2 - 4 cm. Aussagen zu tiefer gelegenen Zonen des Holzes sind nicht möglich.

- Raue Oberflächen werden immer einen zu niedrigen Messwert anzeigen.
- Bei Holzstärken von weniger als 2 cm besteht die Gefahr, dass auch Feuchtwerte aus angrenzenden Materialschichten den Messwert beeinflussen.

### 3.3.4 Vergleichswerte zur Beurteilung der kapazitiven Messwerte

Unter Berücksichtigung der vorher beschriebenen Störeinflüsse lassen sich die ermittelbaren Messwerte (Digit) in zwei grobe Feuchtebereiche unterteilen.

Den „trockenen“, der sich bei einem Raumklima in ausgetrockneten, und bewohnten Räumen einstellt und der „Sättigungsbereich“, der dahingehend definiert ist, dass nicht nur gebundenes Wasser in der Zellwand erfasst wird, sondern auch freies Wasser in den Zellhohlräumen (siehe Kapitel 3.1.2).

Anzeige T2000	Holzfeuchtebereich
< 50 Digit	Trocken
> 80 Digit	oberhalb Sättigungsgrenze

**Tabelle 12: Orientierungswerte zur Holzfeuchte-Beurteilung**

Da die Messwertanzeige des kapazitiven Messverfahrens – in Abhängigkeit von den Randbedingungen – starken Schwankungen unterworfen sind, kann **dieses Verfahren nur als Orientierung der Indikatoren (trocken, feucht, nass) dienen.**

Aus diesem Grund sollte bei Messungen mit dem Anspruch hoher Genauigkeit immer eine Widerstandsmessung vorgezogen werden.

## 4. Mineralische Baustoffe – Feuchtigkeitsbestimmung

### 4.1 Grundlagen zur Baustofffeuchte und charakteristischen Kennwerten

Die derzeit genauesten und sichersten Methoden zur Bestimmung des Feuchtegehaltes an mineralischen Baustoffen sind die Darr-Methode und die CM-Methode.

Da diese Bestimmungsmethoden keine zerstörungsfreien und zudem zeitaufwändige Methoden sind, kann der ungefähr Feuchtegehalt auch über das elektrische Widerstands-Messverfahren bestimmt werden. Das T2000, eingesetzt mit den aufgabenspezifischen Sensoren, erfüllt diesbezüglich die technischen Voraussetzungen.

Im Zusammenhang mit der Feuchtigkeitsbestimmung liegt das Hauptaugenmerk auf den porösen, mineralischen Baustoffen. Im Rahmen des Praxishandbuchs wird dabei den Mörteln (Estriche, Putze) und Betonen besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Beispielsweise darf ein Bodenbelag erst auf einem Estrich verlegt werden, wenn dieser einen bestimmten Grenzfuchtegehalt unterschreitet.

Für die Beurteilung des Feuchtezustandes und die spezifischen Messaufgaben sind, wie beim Holz, einige grundlegende Vorkenntnisse notwendig. Das Umgebungsklima des Baustoffes hat einen großen Einfluss auf den Feuchtezustand des Baustoffes. Des Weiteren muss die Zusammensetzung des Baustoffes, der Porenanteil und die Porenradialverteilung beachtet werden.

#### 4.1.1 Definition und Bestimmungsmöglichkeiten der Baustoff-Feuchte

Die Baustofffeuchte „ $u$ “ wird genau wie die Holzfeuchtigkeit in % angegeben und bezeichnet das Verhältnis zwischen der Masse des im Baustoff enthaltenen Wassers  $m_w$  und der darrtrockenen Baustoffmasse  $m_0$ . Bei der Ermittlung wird folgender Formelzusammenhang verwendet:

$$\frac{\text{Massebezogener Feuchtegehalt} = \text{Feuchtwegicht-Trockengewicht}}{\text{Trockengewicht}} \cdot 100$$

Die genaueste Ermittlung der Baustoff-Feuchte erfolgt über die oben erwähnte Darr-Methode. Eine Baustoffprobe wird gewogen, vollständig getrocknet und ein weiteres Mal gewogen. Durch Subtraktion des Trockengewichtes vom Feuchtwegicht erhält man das Gewicht des vormals in der Probe enthaltenen Wassers.

In der Praxis wird neben der Einheit Masseprozent (M.-%) auch die Einheit Volumenprozent (Vol.-%) angegeben. Der volumenbezogene Feuchtegehalt bezieht die Rohdichte des Baustoffs und des Wassers mit in die Messung ein.

Es gilt folgender Formelzusammenhang:

$$u_m = (\rho_w / \rho_b) \cdot u_v \text{ [M.-%]}$$

$$\text{oder } u_v = (\rho_b / \rho_w) \cdot u_m \text{ [Vol.-%]}$$

mit:

- $u_m$  = massebezogener Feuchtegehalt
- $u_v$  = volumenbezogener Feuchtegehalt
- $\rho_w$  = Rohdichte des Wassers mit 1000 kg/m<sup>3</sup>
- $\rho_b$  = Rohdichte des Baustoffs in kg/m<sup>3</sup> aus Tabellenwerken

Als weiteres direktes Messverfahren kann die sogenannte CM-Messung angewendet werden. Der Vorteil gegenüber dem Darr-Verfahren liegt in der schnelleren Ermittlung des Messergebnisses.

Bei der CM-Messung führt man eine chemische Reaktion zwischen der als Wasser im Baustoff enthaltenen Feuchtigkeit und Calciumcarbid herbei. Das Calciumcarbid reagiert mit Wasser zu Acetylen und Calciumhydroxyd.

Diese chemische Reaktion lässt man in einem abgeschlossenen Druckbehälter ablaufen, der mit einem Manometer

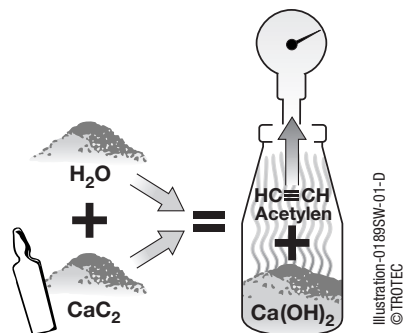


Abbildung 16: Schematische Darstellung des chemischen Reaktionsmechanismus bei der CM-Messung

(Druckmesser) versehen ist. Das freigesetzte Acetylen gas erzeugt einen Überdruck, der mit zunehmendem Wassergehalt des Prüfgutes steigt.

**Das Messergebnis wird, im Gegensatz zum Darrverfahren (Masse-%), in der Einheit CM-% angegeben und fällt bei zementösen Baustoffen grundsätzlich niedriger aus als beim Darren.** Die Ursache liegt darin begründet, dass ausschließlich das freie Wasser der Kornoberfläche und den Zwischenräumen ermittelt wird. Das physikalisch gebundene Wasser wird nicht erfasst. **Eine Ausnahme bilden die Calciumsulfatbaustoffe, bei denen Masse-% gleich CM-% sind.**

### 4.1.2 Mechanismen des Feuchttransportes in mineralischen Baustoffen

Die porösen, mineralischen Baustoffe werden von einem Netzwerk aus Poren unterschiedlicher Art, Größe und Form durchzogen. Diese Poren sind verantwortlich für den Transport und die Speicherung des Wassers im Baustoff. Hieraus lassen sich drei Wassergehaltsbereiche unterscheiden, der Sorptionsfeuchtebereich (auch bezeichnet als hygroscopischer Wassergehaltsbereich), der Kapillarwasserbereich und der Übersättigungsbereich. [5]

Die Einteilung der drei Bereiche ergibt sich aus dem Speichermechanismus und dem vornehmlichen Transportme-

chanismus des Wassers in den Porenräumen des Baustoffes (siehe Abbildung 18, Phasen 1 bis 6) [5].

Der Sorptionsbereich wird durch den Vorgang der Diffusion gekennzeichnet und die Wasserspeicherung findet durch Absorptionsvorgänge statt, d.h. es lagert sich Wasser aus der umgebenden Luft an den Porenwänden an.

In einem sehr trockenen Baustoff (1) wird der gesamte Wasserdampf, der in die Poren eindringt an den Wänden absorbiert. Ein Transport findet im eigentlichen Sinne noch nicht statt. Das Wasser wird nur gespeichert.

Sind die Porenwände mit einer oder mehreren Molekülschichten belegt (2), ist der Porenraum für Wasserdampf diffundierbar (durchströmbar). Der Bereich der Sorptionsfeuchte wird auch als hygroscopischer Bereich bezeichnet, da der Baustoff aus der Luft Feuchtigkeit aufnimmt.

Der Bereich, der sich dem hygroscopischen Bereich anschließt ist der Kapillarbereich. Hier findet ein Wassertransport durch ungesättigte Porenwasserströmung statt.

Es füllen sich als erstes die Porenengpässe mit Wasser (3) und in den erweiterten Porenräumen bildet sich an der Oberfläche eine Sorbatschicht aus. Diese Sorbatschicht wächst im Laufe der fortschreitenden Wassereinlagerung derart an, dass man erstmals von einem Flüssigwassertransport spricht (4). Diese beginnende Transportphase ist

rel. Luftfeuchte	Wassergehalt	Wassergehaltsbereich	Speichermechanismus	vorherrschender Transportmechanismus
$\varphi = 1$	$U_{max}$	Übersättigungsbereich	-	Wasserströmung
$\varphi = 1$	$U_F$			
$\varphi = 0,95$	$U_{95}$	Kapillarbereich	Kapillarkondensation	Ungesättigte Porenwasserströmung
		Sorptionsbereich	Adsorption	Wasserdampfdiffusion
$\varphi = 0$	$U = 0$			

Abbildung 17: „Säulendiagramm“ (Wassergehaltsbereiche in einem feinporigen, hygroscopischen Baustoff) [5]

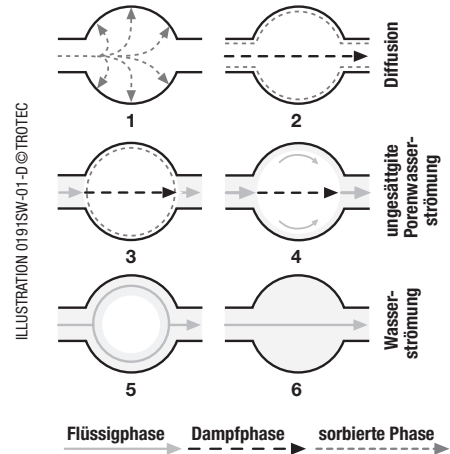


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Speicher- und Transportmechanismus von Wasser in mineralisch porösen Baustoffen [5]

dementsprechend auch deutlich leistungsfähiger als die der Diffusion.

Beim dritten Wassergehaltsbereich, dem Übersättigungsbereich, hat die relative Luftfeuchte den Wert 1 (Abbildung 17). Der Gleichgewichtszustand zwischen Luft- und Wassergehalt existiert nicht mehr. In den erweiterten Porenräumen befindet sich nun so viel Wasser, dass von einem entspannten Wassertransport gesprochen werden kann (5) (6). [5]

### Gleichgewichtsfeuchte – hygroskopische Gleichgewichtsfeuchte

Die Gleichgewichtsfeuchte  $u_{gl}$  beschreibt bei den mineralischen Baustoffen in gleicher Weise einen bestimmten Feuchtezustand, wie dies oben schon beim Holz beschrieben wurde. Demnach stellt sich, in Abhängigkeit von der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte, der Feuchtegehalt des Baustoffes ein, bei dem gleich viel Feuchtigkeit aus der Umgebung aufgenommen wie an diese abgegeben wird.

Sinkt die relative Luftfeuchte, so gibt der Baustoff Wasser ab, der Wassergehalt sinkt. Erhöht sich die relative Luft-

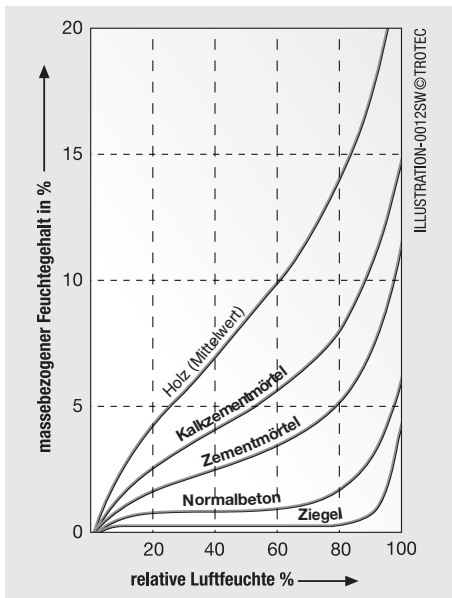


Abbildung 19:  
Sorptionsisotherme verschiedener Baustoffe [19]

Monat	relative Luftfeuchte %	
	7.00 - 14.00 Uhr	14.00 - 6.00 Uhr
Januar	88	89
Februar	72	89
März	60	86
April	54	81
Mai	54	79
Juni	54	81
Juli	55	85
August	60	90
September	69	93
Oktober	78	91
November	82	90
Dezember	84	93

Tabelle 13: relative Luftfeuchtigkeit ( $\theta$ ) in Frankfurt,  
Quelle: Wettermessstation Flughafen Frankfurt am Main

feuchte der umgebenden Luft, so nimmt der Baustoff Wasser auf. Der Wassergehalt des Baustoffes steigt an.

Klimatische Verhältnisse im Außenbereich, die eine permanente relative Luftfeuchtigkeit unterhalb 50 % mit sich bringen würden, herrschen im mitteleuropäischen Raum in der Regel nicht vor und sind nur mit technischen Hilfsmitteln herstellbar. In Tabelle 13 finden Sie eine Auflistung der typischen Luftfeuchtwerte am Beispiel Frankfurt.

Der funktionale Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der relativen Luftfeuchtigkeit lässt sich in den sogenannten Sorptionsisothermen darstellen. In Abbildung 19 sind fünf Sorptionsisotherme skizzenhaft zusammengestellt, die alle einen s-förmigen Verlauf wiederspiegeln.

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, verändern sich die Feuchtegehalte von Ziegel im Bereich von 0 bis 80 % r.H. kaum. Innerhalb der Luftfeuchte von 80 bis 100 % verändert sich die Ziegelfeuchte dann sprunghaft bis auf 4 Masse-%.

Hingegen ist beim Holz ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte zu erkennen. Somit lässt sich feststellen, dass die Holzfeuchte – in Abhängigkeit vom Umgebungsklima – starken Schwankungen unterworfen ist. Bei mineralischen Baustoffen, wie Normalbeton und Ziegel, verändert sich der Feuchtegehalt erst bei hohen, relativen Luftfeuchten von über 80 %.

Zeile	Baustoffe	Praktischer Feuchtegehalt <sup>1)</sup>	
		volumenbezogen <sup>2)</sup> u <sub>v</sub> in %	massebezogen u <sub>m</sub> in %
1	Ziegel	1,5	–
2	Kalksandsteine	5	–
3	3.1 Beton mit geschlossenem Gefüge mit porigen Zuschlägen	5	–
	3.2 Beton mit geschlossenem Gefüge mit dichten Zuschlägen	15	–
4	4.1 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit dichten Zuschlägen nach DIN 4226 T1	5	–
	4.2 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge mit porigen Zuschlägen nach DIN 4226 T2	4	–
5	Gasbeton	3,5	–
6	Gips, Anhydrit	2	–
7	Gußasphalt, Asphaltmastix	0	0
8	Anorganische Stoffe in loser Schüttung: Expandiertes Gassteinglas (z.B. Bläherlit)	–	5
9	Mineralische Faserdämmstoffe aus Glas-, Stein-, Hochofenschlacken- (Hütten-) Fasern	–	1,5
10	Schaumglas	0	0
11	Holz, Sperrholz, Spanplatten, Holzfaserplatten, Holzwolle-Leichtbauplatten, Schilfrohrplatten und -matten, organische Faserdämmstoffe	–	15
12	Pflanzliche Faserdämmstoffe aus Seegras, Holz-, Torf- und Kokosfasern und sonstigen Fasern	–	15
13	Korkdämmstoffe	–	10
14	Schaumkunststoffe aus Polystyrol, Polyurethan (hart)	–	5

<sup>1)</sup> Unter praktischem Feuchtegehalt versteht man den Feuchtegehalt, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten, die zum dauernden Aufenthalt von Menschen dienen, in 90% aller Fälle nicht überschritten wurde.

<sup>2)</sup> Der volumenbezogene Feuchtegehalt bezieht auch bei Lochsteinen, Hohlziehlen oder sonstigen Bauelementen mit Lufthohlräumen immer auf das Material allein ohne die Hohlräume.

**Tabelle 14: Praktischer Wassergehalt von Baustoffen nach DIN 4108, Teil 4**

### 4.1.3 Beurteilen der Baustofffeuchte an einigen Grenzwerten

Bei der Beurteilung der Feuchtigkeit von Baustoffen muss immer das Umgebungsklima beachtet werden, denn **alle Bau- und Werkstoffe wechseln den Feuchtegehalt entsprechend den Lufttemperaturen und Luftfeuchten**.

Die Baustoffe sind nie ganz trocken, sondern enthalten eine von den Umgebungsverhältnissen abhängige Wassermenge. Bei neu errichteten Gebäuden kommt zusätzlich Wasser aus dem Herstellungsprozess hinzu. Durch die natürliche Austrocknung stellt sich in den Baustoffen im Laufe der Zeit ein Feuchtezustand ein, der als praktischer Wassergehalt bezeichnet wird. [19]

Er ist nach DIN 4108, Teil 4, definiert als der Wert, der bei der Untersuchung genügend ausgetrockneter Bauten in 90% der Fälle nicht überschritten wird. In Tabelle 14 werden die praktischen Feuchtegehalte zu den häufigsten Baustoffen aufgeführt. Diese sollten jedoch ausschließlich zur Orientierung herangezogen werden.

Ein weiteres, wichtiges Gebiet bei der Feuchte-Beurteilung von Baustoffen ist die Einordnung des Feuchtezustandes von Estrichen. Bevor ein Belag, wie beispielsweise Parkett, auf einen Estrich aufgebracht werden darf, ist die Prüfung des Feuchtegehaltes des Estrichs zwingend notwendig. Die technischen Voraussetzungen müssen gegeben sein, damit keine Schäden am Belag zu erwarten sind. Der Estrich muss demnach auf eine zulässige Restfeuchte hin überprüft werden.

Dies geschieht in der Regel mit Hilfe des CM-Verfahrens. An ausgewählten Stellen des Estrichs werden Materialproben entnommen, an denen dann der CM-Wert ermittelt wird. Die Ergebnisse geben nun – in Abhängigkeit vom Oberboden – Auskunft darüber, ob der maximal zulässige Feuchtegehalt des Estrichs über- oder unterschritten ist (siehe Tabellen 15).

<b>Zementgebundene Untergründe</b>	
<b>ohne Bodenheizung</b>	
• Linoleum, Textilien	max. 2,5 %*
• Kunststoff, Parkett, Holzwerkstoffe und Schichtstoffprodukte	max. 2,3 %*
• Gummi, Kork	max. 2,0 %*
<b>mit Bodenheizung</b>	max. 1,5 %*
<b>Anhydrit-Mörtel konventionell (Kalziumsulfat-Mörtel)</b>	
<b>ohne Bodenheizung</b>	
	max. 0,8 %*
<b>mit Bodenheizung</b>	max. 0,5 %*
<b>Anhydrit-Fließestriche (Kalziumsulfat-Fließmörtel)</b>	
<b>ohne Bodenheizung</b>	
	max. 0,5 %*
<b>mit Bodenheizung</b>	max. 0,3 %**
<b>Holzunterböden</b>	7 - 12 %**
<b>Spanplatten</b>	6 - 9 %**
<b>Faserplatten</b>	4 - 7 %**
* Messung mit CM-Gerät,	
** Messung mit Holzfeuchtemessgerät	

**Tabelle 15-A: maximaler Feuchtigkeitsgehalt für die Belegreife (Schweiz)**

<b>Oberboden</b>	<b>Zementestrich in CM-%</b>		<b>Calciumsulfatestrich in CM-%</b>	
	<b>beheizt</b>	<b>unbeheizt</b>	<b>beheizt</b>	<b>unbeheizt</b>
Elastische Beläge	1,8	2,0	0,3	0,5
Textile Beläge	1,8	2,0	0,3	0,5
Parkett und Holzpflaster	1,8	2,0	0,3	0,5
Laminatboden	1,8	2,0	0,3	0,5
Stein- und keramische Beläge im Dickbett	1,8	2,0	0,3	0,5
Stein- und keramische Beläge im Dünnbett	1,8	2,0	0,3	0,5

\* Magnesiaestrich: 1,0 bis 3,5 – je nach Aufbau der organischen Bestandteile; Erfahrungswerte sind beim Hersteller zu erfragen.

**Tabelle 15-B: maximaler Feuchtigkeitsgehalt für die Belegreife (Deutschland)**

## 4.2 Baustofffeuchte-Messung – Widerstandsprinzip

### 4.2.1 Messprinzip

Das Widerstandsprinzip wurde bereits im Kapitel 3.2 behandelt. Das Prinzip ist bei der Baustofffeuchtemessung identisch. Trotzdem wird hier noch einmal materialspezifisch darauf eingegangen. Wie bei der Holzmessung wird durch das Messgerät der Widerstand bzw. die Leitfähigkeit des Materials gemessen.

Die elektrische Leitfähigkeit eines trockenen, mineralischen Baustoffes (z. B. Zementestrich) ist sehr niedrig. Wird Wasser durch die oben beschriebenen Sorptionsvorgänge aufgenommen, kann die Leitfähigkeit des Materials schnell ansteigen bzw. der Widerstand abnehmen.

Bei der Beurteilung der Messergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse durch die Materialzusammensetzung des Messgutes beeinflusst werden. Die Anwesenheit von löslichen Salzen kann das Messergeb-

nis erheblich verfälschen. Je mehr Salze vorhanden sind desto höher fällt die Messwertanzeige aus.

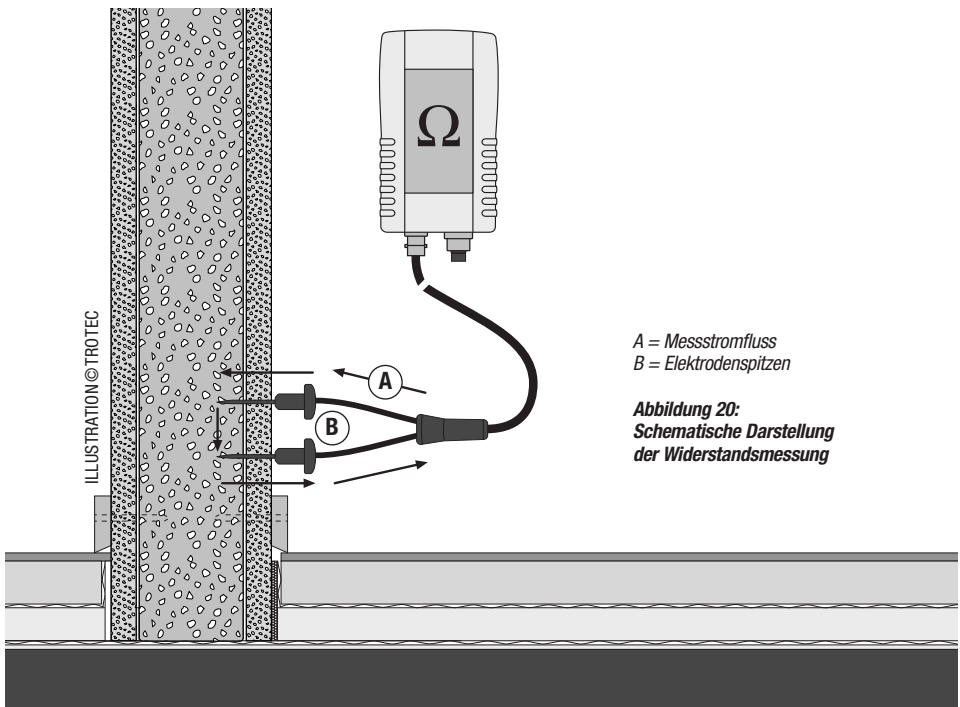
Eine weitere Einflussgröße bei der Beurteilung der Ergebnisse ist die Verbindung der Elektroden mit dem Baustoff.

Bei mineralischen, porösen Baustoffen können durch geringen Elektrodenkontakt (Ankopplung) verhältnismäßig hohe Übergangswiderstände entstehen, welche die Messergebnisse verfälschen. Hier sollten Hilfsmittel wie z. B. Kontaktmasse eingesetzt werden.

Beide genannten Punkte sind dafür verantwortlich, dass die Genauigkeit der Messergebnisse bei mineralischen Baustoffen geringer ist als bei Holzwerkstoffen.

**Quantitative Aussagen zum Feuchtegehalt** des mineralischen Messgutes sind nur mit Hilfe des Darr-Verfahrens oder der CM-Methode machbar.

Wenn jedoch **qualitative Aussagen zur Baustofffeuchte** ausreichen, dann sollte die weniger zeitaufwändige Widerstandsmethode eingesetzt werden.





## 4.2.2 Elektroden zur Baustoff-Feuchtemessung – Handhabung und Messvorgang

Zur qualitativen Bestimmung der Feuchte an mineralischen porösen Baustoffen wie Putz- oder Estrichmörtel lassen sich je nach Einsatzgebiet unterschiedliche Bauformen der passiven Elektroden einsetzen, die spezifische Vor- und Nachteile aufweisen.

Bei der Wahl der Elektrode ist darauf zu achten, dass gewisse Randbedingungen eingehalten werden, um ein möglichst genaues Messergebnis zu erzielen. Besondere Beachtung ist, nach oben aufgeführten Gründen, der Ankopplung an das Messgut zu widmen.



### TS 60 Hand-Elektrode

Die Hand-Elektrode TS 60 gilt als Basishalter, der einen definierten Abstand für die Elektrodenspitzen ausweist.

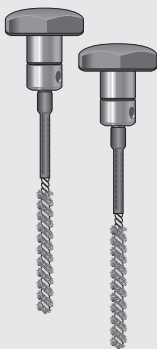
Durch den schlagfesten Kunststoffkörper können die Spitzen vollständig in das Prüf-gut eingetrieben werden.

Die beiden Sechskant-Überwurfmutter ermöglichen zudem den Austausch der Elektrodenspitzen.

Lieferbare Längen sind derzeit:

- 20 mm (max. Eindringtiefe von 14 mm)
- 30 mm (max. Eindringtiefe von 24 mm)
- 40 mm (max. Eindringtiefe von 34 mm)
- 60 mm (max. Eindringtiefe von 54 mm)

Das Einsatzgebiet liegt u.a. in der Erfassung der Feuchte bei weichen Baustoffen wie Gips oder Putzmörtel. Bei der Handhabung ist darauf zu achten, dass die Spitzen in der gesamten Länge in das Messgut eingetrieben werden.



### TS 20/110 Bürstenelektroden, 7 mm

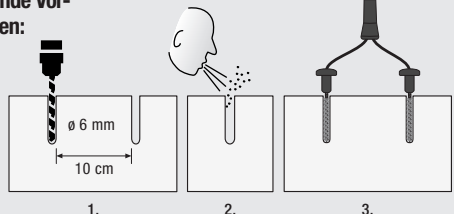
Die zwei Elektroden der Bürstenelektroden setzen sich jeweils zusammen aus dem 110 mm langen Bürsten-Kopf und dem isolierten Schaft. Das Einsatzgebiet ist die gezielte Feuchtemessung in einem homogenen Baustoff ohne Verwendung einer Kontaktmasse. Die Ankopplung an das Messgut erfolgt über den Bürstenkopf.

Bei der Handhabung sollte folgende Vorgehensweise eingehalten werden:

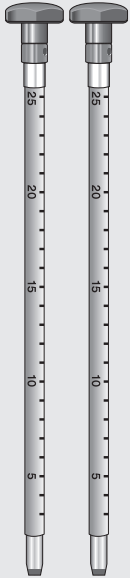
1. In das homogene Messgut müssen zwei Löcher gebohrt werden, die einen Abstand von ca. 10 cm und einen Durchmesser von 6 mm aufweisen.

Für die Bohrung sollte ein scharfer Bohrer mit niedriger Drehzahl eingesetzt werden.

2. Die beiden Bohrlöcher vom Staub befreien (z.B. ausblasen).
3. Nach einer Wartezeit von etwa zehn Minuten (Feuchteausgleich) die Elektrodenbürsten bis in die gewünschte Messtiefe einschieben.







### Schichttiefen-Elektroden TS 24/250, 8 mm

Jede Elektrode setzt sich zusammen aus Elektrodenrohr und Elektrodenstab.

Das Einsatzgebiet ist die gezielte Schichtfeuchtemessung in homogenen Baustoffen unter Verwendung der Kontaktmasse.

Die Materialfeuchte kann entsprechend der Länge, bis in eine maximale Tiefe von ca. 250 mm ermittelt werden.

Die Elektrodenrohre sind isoliert und mit einer Tiefenskala versehen, so dass der Messwert in der gewünschten Messtiefe gezielt erfasst werden kann.

Bei der Handhabung sollte folgende Vorgehensweise eingehalten werden (siehe auch „Hinweis zur Handhabung von Kontaktmasse“):

1. In das harte Messgut müssen 2 Löcher bis in die Messtiefe gebohrt werden, die einen Abstand von ca. 10 cm und einen Durchmesser von 8 mm aufweisen. Für die Bohrung sollte ein scharfer Bohrer mit niedriger Drehzahl eingesetzt werden.
2. Beide Bohrlöcher sind vom Staub zu befreien (z. B. Ausblasen).
3. Nach etwa zehnminütiger Wartezeit (Feuchteausgleich) die Elektrodenrohre mit Kontaktmasse befüllen. Dazu die Spitze des Elektrodenrohres 30 mm senkrecht in die Kontaktmasse einstecken und mit dieser füllen.

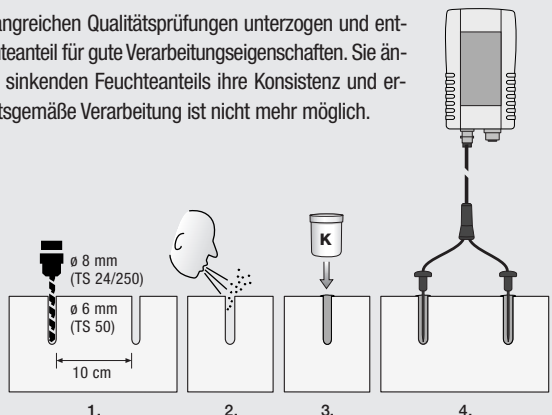
Das Elektrodenrohr zur Spitze hin mit einem trockenen Tuch säubern und bis zum Anschlag in ein Bohrloch einführen. Anschließend den selben Vorgang mit der zweiten Elektrode durchführen.

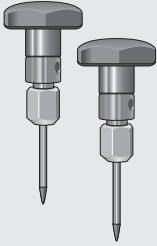
4. Die beiden Elektrodenstäbe so lange in die Rohre einführen bis die Kontaktmasse an das Ende des Bohrloches gepresst wird.

### Hinweis zur Handhabung von Kontaktmasse mit Einsteck- oder Schichttiefenelektroden:

Die Kontaktmasse wird bei der Produktion umfangreichen Qualitätsprüfungen unterzogen und enthält im Auslieferungszustand einen idealen Feuchteanteil für gute Verarbeitungseigenschaften. Sie ändert bei längerem Nichtgebrauch aufgrund des sinkenden Feuchteanteils ihre Konsistenz und erscheint dann trocken und spröde, eine vorschriftsgemäße Verarbeitung ist nicht mehr möglich.

In diesen Fällen hat es sich im Praxiseinsatz als einfache Lösung erwiesen, die ausgetrocknete Substanz erneut mit der benötigten Menge Feuchtigkeit anzureichern, um eine gleichmäßige Verteilung der Feuchtigkeit zu erreichen. Dazu einfach etwas Wasser in den Kontaktmassebehälter begeben und kurze Zeit warten. Nach dieser Maßnahme lässt sich die Kontaktmasse wieder gut verwenden.





### TS 50 Einsteckelektroden

Die zweiteilige Einsteckelektrode ermöglicht den variablen Abstand bei der Positionierung der Elektrodenspitzen.

Die beiden Sechskant-Überwurfmuttern lassen zudem den Austausch der Elektrodenspitzen zu:

- 20 mm (max Eindringtiefe von 14 mm)
- 40 mm (max Eindringtiefe von 34 mm)
- 30 mm (max Eindringtiefe von 24 mm)
- 60 mm (max Eindringtiefe von 54 mm)

In der Grundausstattung mit den kurzen Spitzen liegt das Einsatzgebiet in der Erfassung der Feuchte bei harten Baustoffen wie Beton oder Zementestrich.

**Bei der Handhabung sollte folgende Vorgehensweise eingehalten werden (siehe auch „Hinweis zur Handhabung von Kontaktmasse“):**

1. In das harte Messgut müssen 2 Löcher gebohrt werden, die einen Abstand von ca. 10 cm und einen Durchmesser von 6 mm aufweisen. Für die Bohrung sollte ein scharfer Bohrer mit niedriger Drehzahl eingesetzt werden.
2. Beide Bohrlöcher sind sofort vom Staub zu befreien (z. B. ausblasen).
3. Nach etwa zehnminütiger Wartezeit die Kontaktmasse mit der Rückseite des Bohrers fest in das Bohrloch eindrücken, bis das Loch gefüllt ist.
4. Vollständiges Einstecken der Elektrodenspitzen in die Kontaktmasse.
5. Der Anwender sollte darauf achten, dass nur die Bohrlöcher und nicht die Oberfläche des Messgutes mit Kontaktmasse behaftet sind, da sonst falsche Messergebnisse erzielt werden. Hintergrund ist die hohe Leitfähigkeit der Kontaktmasse.



### Messvorgang

Bei der Messung sind folgende Arbeitsschritte durchzuführen:

1. Elektrode(n) in Abhängigkeit von der Messaufgabe und dem Einsatzgebiet auswählen.
2. Die Handhabung und Messvorbereitungen entsprechend der ausgewählten Elektroden durchführen.
3. Elektrode(n) mit dem Verbindungskabel TC 20 an den BNC-Stecker anschließen.
4. Gerät einschalten.
5. Messmethode durch Wahl der Sens-Nummer 100 (Baufeuchtemessung) aktivieren. Im Display des T2000 wird im Anzeigefeld des Sensor 1 der aktuelle Messwert ohne Einheit angezeigt. Zum besseren Verständnis kann der Anwender diesen Anzeigewert mit der Einheit Digit (Digitaler Zahlenwert) bezeichnen.
6. Messwert im Display ablesen und den Vergleichswert aus den dargestellten Diagrammen in Kapitel 4.2.3 entnehmen.

### 4.2.3 Zusammenstellung der wichtigsten Vergleichswerte zur Messergebnisbeurteilung

Damit die Messwerte den tatsächlichen Feuchtegehalten eines Baustoffs zugeordnet werden können, wurden Kalibriermessungen an ausgesuchten Baustoffen durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauforschung der RWTH Aachen sind Tabellen und Diagramme erstellt worden, die den Zusammenhang zwischen Messwert und dem massebezogenen Feuchtegehalt (M.-%) des untersuchten Baustoffs wiedergeben.

Zur gezielten Einstellung von Feuchtegehalten sind als erstes Prüfkörper hergestellt worden, die anschließend mit einem berechneten Wasservolumen beaufschlagt wurden. Im zweiten Arbeitsschritt lagerten die Probekörper dann zwei Wochen in speziellen Verpackungen, um eine homogene Feuchteverteilung zu gewährleisten.

Nach diesen zwei Wochen konnten dann die Widerstandsmessungen durchgeführt werden, bevor sich dann das Darrverfahren anschloss. Bei baustoffspezifischen Temperaturen sind die Probekörper so lange getrocknet worden, bis sich eine Gewichtskonstanz einstellte. Der sich ergebende Feuchtegehalt (in M.-%) konnte dann dem Widerstands-Messwert gegenübergestellt werden.

Zu beachten ist, dass neben Feuchtegehalt und Porenraumstruktur des Probekörpers auch die Temperatur einen erheblichen Einfluss auf die Widerstandsermittlung hat. Aus diesem Grund führt man vergleichende Messungen entweder bei konstanten klimatischen Bedingungen durch (Labor), oder man bezieht die erhaltenen Messwerte auf eine Basistemperatur. Dies ist durch eine Korrekturfunktion nach Arrhenius möglich. Die Referenztemperatur hierbei ist 23 °C (Klima 23/60).

Am Beispiel vom Beton C 30/37 sind die Messwertverläufe für die Temperaturen 5 °C, 20 °C und 30 °C in einen ausgesuchten Bereich grafisch dargestellt (siehe Abbildung 21).

Somit sollte bei der Messung immer bedacht werden, dass ein Vergleich zwischen Widerstands-Messwert und Feuchtegehalt durch die Materialtemperatur beeinflusst wird. Ist die Materialtemperatur höher als 23 °C, so wird ein höherer Messwert angezeigt. Ist die Materialtemperatur hingegen niedriger als 23 °C, so fällt auch der Messwert niedriger aus.

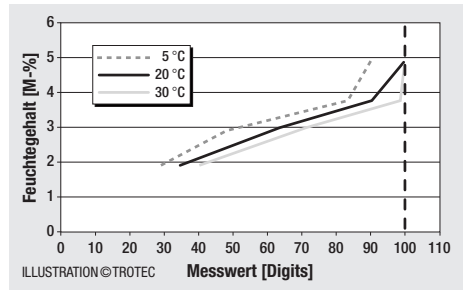
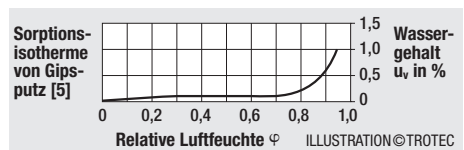


Abbildung 21: Beton C 30/37, Feuchtegehalt in Abhängigkeit vom Widerstands-Messwert. Grafische Darstellung des Messwertverlaufes bei verschiedenen Temperaturen (siehe Abbildung 22) [18]

Die Abbildungen 22 bis 25 zeigen die messtechnischen Ergebnisse in Diagrammform. Diese Diagramme lassen nun den Vergleich zwischen Messwert und tatsächlichem Feuchtegehalt zu. Die Auswahl der Diagramme ist auf die gebräuchlichsten, mineralischen Baustoffe beschränkt. Die Diagramme beziehen sich auf eine Referenztemperatur von 23 °C (Klima 23/60). [18]

#### Gipsputz

Gesondert zu betrachten ist die Ermittlung des Feuchtegehalts bei einem Gipsputz. Wie man dem nachfolgend dargestellten Diagramm entnehmen kann, ändert sich der volumenbezogene Feuchtegehalt von Gipsputz bei Luftfeuchtwerten von 0 bis 80 % wenig:



Oberhalb von 80 % ändert sich der Feuchtegehalt sprunghaft. Dies wurde auch durch die Kalibriermessungen des Institutes für Bauforschung bestätigt [18].

Dementsprechend sind wir der Meinung, dass eine direkte Zuordnung zwischen Messwert und massebezogenem Feuchtegehalt nicht möglich ist. Als hinreichendes Kriterium zur Einordnung der Messwerte lässt sich jedoch festhalten, dass ein Gipsputz als „trocken“ bezeichnet werden kann, wenn der **Widerstandsmesswert** kleiner als 30 Digit ist.

Bei der Beurteilung der Messwerte muss unbedingt darauf geachtet werden, dass bei jeder Messung unterschiedliche Randbedingungen vorherrschen (siehe Kapitel 4.2.6).

**Wichtige Einflussgrößen, welche die Höhe des Messwertes beeinflussen, sind die Ankopplung der Elektroden an das Messgut, die Materialtemperatur, die Baustoffzusammensetzung, die Salzbelastung und die Zuschlagstoffe.**

Bei nicht aufgeführten Baustoffen lassen sich in der Regel hinreichende Aussagen über örtliche Vergleichswerte treffen. So kann bei einem Wasserschaden das betroffene Feuchtigkeitsfeld derart eingegrenzt werden, dass als Beurteilungsgrundlage eine Vergleichsmessung an einer augenscheinlich trockenen Wand- oder Bodenfläche durchgeführt wird.

Über die höheren Messwerte des zu beurteilenden Bereiches lässt sich dann die Ausdehnung des Feuchtigkeitsfeldes gut festlegen.

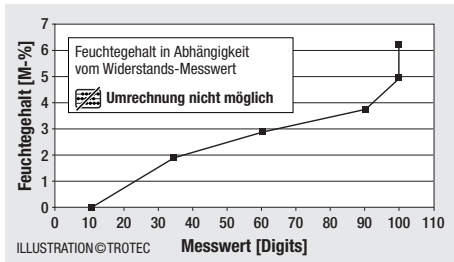


Abbildung 22: Beton C 30/37, Feuchtegehalt in Abhängigkeit vom Widerstands-Messwert

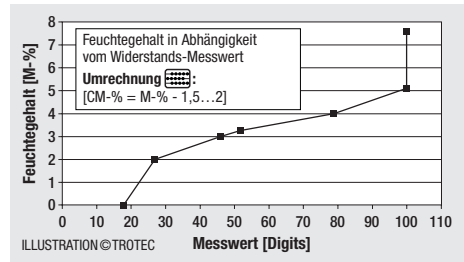


Abbildung 23: Zement-Estrich, Feuchtegehalt in Abhängigkeit vom Widerstands-Messwert

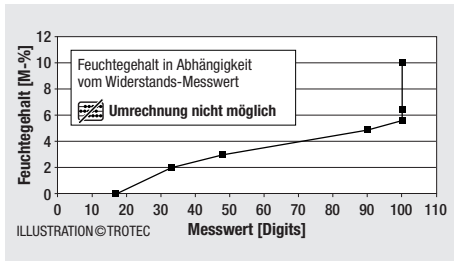


Abbildung 24: Zementfließestrich, Feuchtegehalt in Abhängigkeit vom Widerstands-Messwert

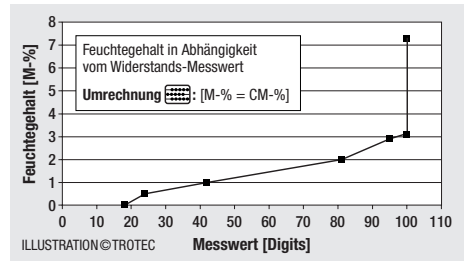
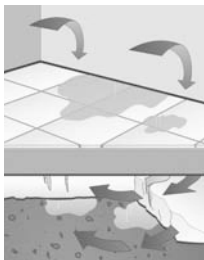


Abbildung 25: Anhydritfließ-Estrich, Feuchtegehalt in Abhängigkeit vom Widerstands-Messwert

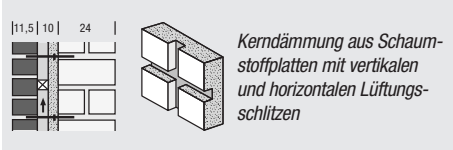
#### 4.2.4 Tiefenmessungen an verdeckten Baustoffschichten



Bei der Beurteilung von der Feuchteverteilung an Baukonstruktionen steht der Anwender häufig vor dem Problem, dass der sichtbare Schaden durch eine versteckte Feuchteverteilung hervorgerufen wird, zum Beispiel bei Fertigfußboden mit Trittschalldämmung, mehrschaligem gedämmten Mauerwerk, gedämmten Flachdächern oder verdeckt liegenden Balken eines Fachwerkhauses (siehe Abbildungen 26 bis 29).

Bei einem Wasserschaden kann es vorkommen, dass sich die Nässe versteckt in der Konstruktion verteilt hat. Das Wasser hat sich in der verdeckt liegenden Ebene der Dämmung ausgebreitet und steigt über Kapillarkräfte in den Wandbereichen nach oben. Das sichtbare Schadensbild stimmt aber in der Regel nicht mit dem tatsächlichen Schadensbild überein.

Für diesen Fall steht das Widerstandsmessverfahren mit speziell hierzu entwickelten Elektroden zur Verfügung, die so konzipiert sind, dass bei fachgerechtem Einsatz die Messung in der verdeckten Baustoff-Schicht erfolgt.



Kerndämmung aus Schaumstoffplatten mit vertikalen und horizontalen Lüftungsschlitzen

Abbildung 26: Zweisechalige Außenwand / Kerndämmung

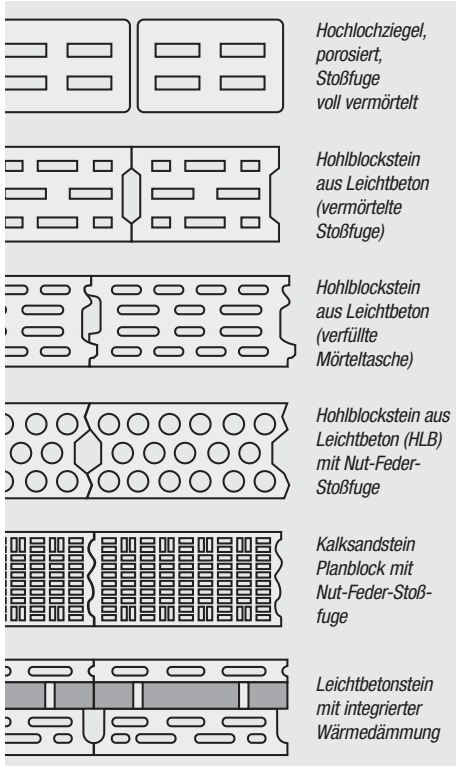


Abbildung 27: Großformatige Steine für Innen- und Außenmauerwerke

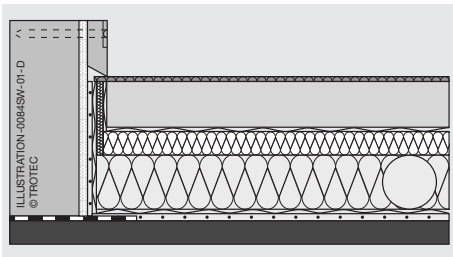
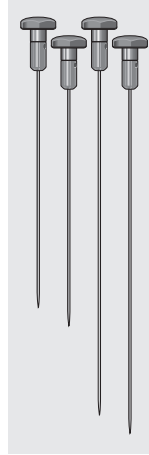


Abbildung 28: Fertigfußboden mit Trittschalldämmung



### TS 4/200 und TS 4/300 Rundelektroden, 2 mm

Die unisolierten Rundelektroden TS 4 sind in den Längen 200 und 300 mm lieferbar.

Das Einsatzgebiet ist die Feuchtemessung in verdeckt liegenden Bauteilebenen, bei denen die Elektroden aufgrund technischer Gegebenheiten besonders dünn sein müssen und keine isolierten Rundelektroden TS 12 eingesetzt werden können (z. B. Wand- oder Deckenaufbauten, bei denen eine Tiefenmessung über schmale Fugen durchgeführt werden muss).

Grundsätzlich sollten immer die isolierten Rundelektroden eingesetzt werden, da durch die Isolierung eine gezielte Messung in der gewünschten Bauteilschicht durchgeführt werden kann.

### Bei der Handhabung sollte folgende Vorgehensweise eingehalten werden:

1. In die zu untersuchenden Bauteilschichten müssen zwei Löcher gebohrt werden, die einen Abstand von ca. 10 cm und einen Durchmesser von minimal 4 mm aufweisen.
2. Einschieben der Elektroden in die Bohrlöcher und dann Einstechen der Spitzen in das Messgut.

**Achtung – Vorsicht: Elektroden nicht verbiegen, ansonsten besteht aufgrund der geringen Materialstärke Bruchgefahr am Elektrodenschaft!**

Achten Sie darauf, dass keine metallischen Bauteile (z. B. Alukasierungen der Wärmedämmung) das Messergebnis verfälschen (siehe Kapitel 4.2.6.2, Abbildung 31).

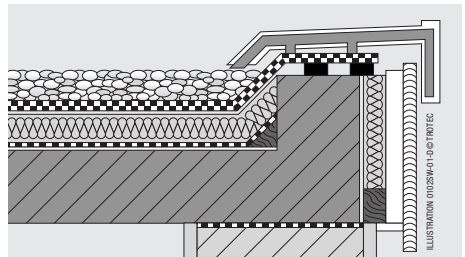
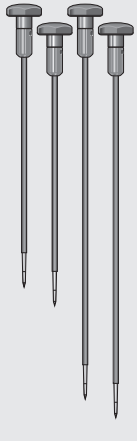


Abbildung 29: Flachdächer (Warmdach), gedämmt



### TS 12/200 und TS 12/300 Rundelektroden, 4 mm

Die isolierten Rundelektroden TS 12 sind in den Längen 200 und 300 mm lieferbar.

Das Einsatzgebiet ist die gezielte Feuchtemessung in verdeckt liegenden Bauteilebenen, wo es zwingend erforderlich ist, dass der Schaft der Elektroden isoliert ist. Eine fehlende Isolierung würde das Messergebnis verfälschen.

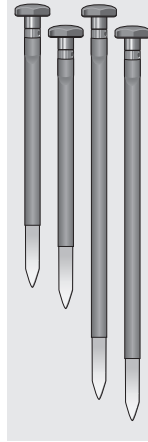
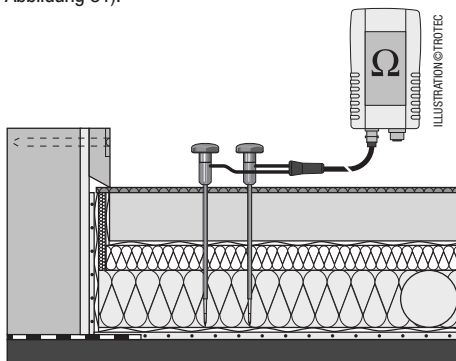
Der häufigste Gebrauch liegt erfahrungsgemäß bei der Bestimmung

der Feuchteverteilung von mehrschaligen Wand- oder Deckenaufbauten wie schwimmende Estriche, mehrschalige Mauerwerke, Holzbalkendecken, Wärmdächern etc. (siehe Abbildungen 26 bis 29)

#### Bei der Handhabung sollte folgende Vorgehensweise eingehalten werden:

1. In die zu untersuchenden Bauteilschichten müssen zwei Löcher gebohrt werden, die einen Abstand von ca. 10 cm und einen Durchmesser von minimal 6 mm aufweisen.
2. Einschieben der Elektroden in die Bohrlöcher und dann Einstechen der Spitzen in das weiche Messgut (z.B. Trittschall- oder Wärmedämmung).

Achten Sie darauf, dass keine metallischen Bauteile (z.B. Alukaschierungen der Wärmedämmung) das Messergebnis verfälschen (siehe Kapitel 4.2.6.2, Abbildung 31).



### TS 16/200 und TS 16/300 Flachelektroden, 1 mm

Die isolierten Flachelektroden TS 16 sind in den Längen 200 und 300 mm lieferbar.

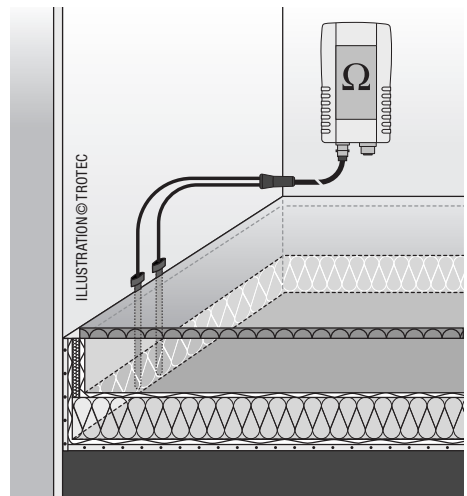
Das Einsatzgebiet entspricht dem Verwendungszweck der isolierten Rundelektroden TS 12/200 und TS 12/300.

Der Vorteil der Flachelektroden liegt darin, dass Bohrungen in der Fläche entfallen und die Elektroden einfach nach Entfernen der Sockel durch den Randstreifen eingeführt werden können.

#### Bei der Handhabung sollte folgende Vorgehensweise eingehalten werden:

1. Einschieben der Elektroden über den Randdämmstreifen des Fertigfußbodens, bis die Elektroden nicht mehr tiefer eingeschoben werden können.
2. Etwa 1 cm wieder herausziehen.

Achten Sie darauf, dass keine metallischen Bauteile (z. B. Alukaschierungen der Wärmedämmung) das Messergebnis verfälschen (siehe Kapitel 4.2.6.2, Abbildung 31).



## 4.2.5 Vergleichswerte zur Beurteilung von wassergeschädigten Bereichen

Im Falle eines Wasserschadens kann über die Widerstandsmessung eine Beurteilung des zu trocknenden Bereiches vorgenommen werden.

Auf Grundlage des praktischen Feuchtegehaltes und den veränderlichen Randbedingungen (siehe Kapitel 4.2.6) kann mit der Tabelle 16 die Notwendigkeit einer technischen Trocknung beurteilt werden.

Hierbei muss unbedingt beachtet werden, dass die Messergebnisse nur ein Baustein einer umfassenden Schadensdiagnose sind. Die Erfahrung des Beurteilenden und die örtlichen Gegebenheiten spielen eine ebenso gewichtige Rolle, wie die Dokumentation der Messergebnisse. Über die Dokumentation lässt sich zudem der Erfolg einer technischen Trocknungsmaßnahme darstellen.

	Digit-Skalenwerte	Trocken*	Grenzbereich**	Starke Durchfeuchtung***
Baustoffe	Anhydrit-, Zement-, Holzzementestrich	< 36	36 - 50	> 50
	Steinholz	< 41	41 - 55	> 55
	Gipsputz	< 31	31 - 40	> 40
Dämmschichten/Schüttungen	Polystyrol (Partikelschaum), Polystyrolhartschaum (extrudiert), Polyurethanhartschaum	< 36	36 - 50	> 50
	Glasfaser, Stein- oder Schlackenwolle	< 36	36 - 45	> 45
	Silicatschaumglas	< 36	36 - 50	> 50
	Kork, geblähtes Eruptivgestein	< 31	31 - 40	> 40
	Holzwolleleichtbauplatten	< 41	41 - 50	> 50
	Lehmschüttung	< 41	41 - 55	> 55
	Kokosfaser	< 36	36 - 40	> 40

\* keine Austrocknung erforderlich;

\*\* eventuell Austrocknung erforderlich nach Bewertung der Schadenscharakteristik;

\*\*\* technische Trocknung erforderlich;

alle Werte sind ca.-Werte und ohne jede Gewähr

© TROTEC

Tabelle 16: Orientierungswerte zur Baustoffeuchte-Beurteilung

## 4.2.6 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der Widerstandsmessung

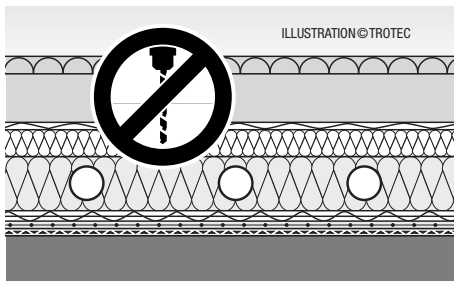


Abbildung 30: Zur Schadensvermeidung dürfen Bohrungen nicht ohne vorherige Leitungsdetektion durchgeführt werden.

Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, ist es wichtig, die allgemeingültigen Störeinflüsse zu kennen. Aus dem oben beschriebenen Messprinzip und den materialspezifischen Eigenschaften ergeben sich bei der Widerstandsmessung folgende Hinweise:

- Prüfen sie vor jeder Bohrung, ob elektrische Leitungen oder wasserführende Leitungen im Bohrlochbereich verlegt sind.

Zur schnellen zerstörungsfreien Leitungsdetektion empfehlen wir Ihnen die Verwendung geeigneter Messgeräte. Eine Übersicht entsprechender Geräte finden Sie im Internet unter [www.trotec.de](http://www.trotec.de).

- Bei harten, mineralischen Baustoffen muss die Ankopplung der Elektroden an den Baustoff mit einer Kontaktmasse gewährleistet werden, da nur so der Übergangswiderstand zwischen Elektroden und Baustoff gering gehalten wird.
- Die Materialtemperatur des Baustoffes sollte bei der Baufeuchtemessung etwa im Bereich von 20 °C liegen.
- Achten Sie darauf, dass die Elektroden immer einwandfrei isoliert sind. Bei einer fehlenden oder beschädigten Isolierung könnte keine gezielte Tiefenmessung durchgeführt werden. Das Messgerät zeigt immer den Messwert des geringsten Widerstandes an. Der gemessene Widerstand könnte dementsprechend in einer anderen Ebene erfasst werden und nicht wie gewünscht an den Elektrodenspitzen. Eine Fehlinterpretation der Ergebnisse wäre die Folge.

#### **Praxistipp:**

*Beschädigte Isolierungen können durch einen handelsüblichen Schrumpfschlauch ersetzt werden, so dass kein neues Elektrodenpaar angeschafft werden braucht.*

- Um die Isolierung der Elektrodenpaare nicht zu beschädigen, sollte das Durchstoßen von härteren Baustoffen, wie beispielsweise Gipskartonplatten vermieden werden. Kann dies nicht eingehalten werden sollten zwei Löcher (Durchmesser größer als die Messelektroden) in die Trennebene gebohrt werden.
- Wenn die eigentliche Messung durchgeführt wird, sollten die Elektroden nicht in der Hand gehalten werden. Zweckmäßigerweise sollten die Messkabel, das Messgerät und die Elektroden bei der Ablesung des Messwertes nicht bewegt werden.

#### **4.2.6.1 Störeinflüsse durch elektrisch leitende Salze im Baustoff**

Den Störeinflüssen durch Salz wird an dieser Stelle ein eigenes Kapitel gewidmet, da bauwerksbedingte Feuchtigkeitsproblematiken häufig in Kombination mit wasserlöslichen Salzen auftreten.

Salze verbessern die Leitfähigkeit eines Baustoffs im erheblichen Maße. Das Messergebnis wird bei der Widerstandsmessung dahingehend verfälscht, dass ein zu hoher Messwert angezeigt wird.

Salze ionisieren, wenn sie in Lösung gehen, das bedeutet, dass die verschieden geladenen Bestandteile (Ionen) des gelösten Salzkristalls sich trennen.

Wird der Feuchtegehalt eines Baustoffs gemessen, der Wasser mit gelösten Salzen enthält, legt man über die Elektroden eine Spannung an die Salzlösung an. Die positiven Ionen der Salze wandern zur negativen Elektrode, die negativen Ionen wandern zur positiven Elektrode.

Die Ionen gleichen an den Elektroden ihre Ladung aus, was einem Stromfluss entspricht.

Dieser zusätzliche Stromfluss addiert sich zum Messstrom, wodurch der Messstrom und entsprechend der Messwert erhöht erscheint. Vom Messgerät wird der erhöhte Messstrom als geringerer Widerstand und damit als höherer Messwert interpretiert.

#### **4.2.6.2 Störeinflüsse durch elektrisch leitende Materialien**

Enthält ein Baustoff oder eine mehrschalige Wand bzw. Deckenaufbau ein elektrisch leitendes Material, so ergibt sich daraus ein niedriger Widerstandswert, welcher hohe Feuchtwerte vortäuscht. Dies führt zu falschen Messwertanzeigen.

Durch Sichtkontrolle ist in der Regel nicht zu erkennen, ob elektrisch leitende Materialien im Aufbau vorhanden sind.

Zu den größten Fehlerquellen zählen hierbei insbesondere Bewehrungen, Metallkaschierungen und leitende Dämmstoffe wie Schlacken in Holzbalkendecken. Insbesondere bei Dämmstoffen mit Metallkaschierungen kommt es bei der Widerstandsmessung immer wieder zu Fehlinterpretationen der Messwerte.

Zur Veranschaulichung zeigt die Abbildung 31 drei Anwendungsbeispiele zur Widerstandsmessung bei Dämmschichten mit Metallkaschierung.



**Anwendungsbeispiel 1:**

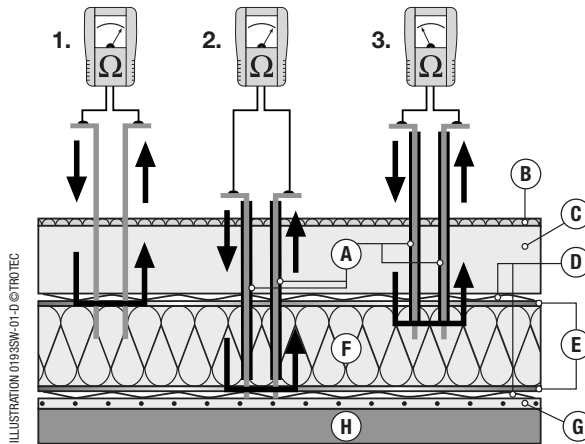
Einsatz von nicht isolierten Elektroden, der Messstrom fließt über die Metallfolie an der Oberseite der Dämmschicht. Der Messwert ist falsch.

**Anwendungsbeispiel 2:**

Einsatz von isolierten Elektroden, Messpunkt auf der PVC-Folie, der Messstrom fließt über die Metallfolie an der Dämmschichtunterseite. Der Messwert ist falsch.

**Anwendungsbeispiel 3:**

Einsatz von isolierten Sonden, nicht ganz eingestoßen. Der Messstrom fließt über die Dämmschicht. Der Messstrom entspricht dem elektrischen Widerstand der Dämmschicht.



- A: Isolierende Beschichtung  
 B: Teppich  
 C: Estrich  
 D: PE-Folie  
 E: Metallkaschierung  
 F: Dämmschicht  
 G: PVC-Folie  
 H: Betonplatte

**Abbildung 31:**  
 Die elektrisch leitende Metallschicht wird bei einer Berührung mit dem Sender totale Durchnässung vortäuschen.

## 4.3 Baustofffeuchte-Messung – kapazitives Verfahren

Neben dem Messprinzip des Widerstandes bietet das T2000 die Möglichkeit, die Baufeuchte über das kapazitive Messprinzip zu erfassen. Auch dieses Verfahren ist ein indirektes Messverfahren, da nicht der Wassergehalt ermittelt, sondern die dielektrischen Materialeigenschaften erfasst werden.

Besonderen Vorteil weist dieses Verfahren bei qualitativen Aussagen aus, wenn schnelle, zerstörungsfreie Messergebnisse gefordert werden. **Quantitative Aussagen hinsichtlich der Baustofffeuchte sind mit dem kapazitiven Messverfahren im Praxiseinsatz nicht möglich.**

### 4.3.1 Messprinzip

Das kapazitive Messverfahren ist zerstörungsfrei, da die Dielektrizitätskonstante „ $\epsilon$ “ des Baustoffs über das Hochfrequenzfeld eines Kondensators bestimmt wird.

Die Dielektrizitätskonstante ist, wie der elektrische Widerstand, ein Merkmal von Baustoffen, dessen Wert sich ändert, wenn der Baustoff Feuchtigkeit aufnimmt.

Ein Kondensator setzt sich schematisch normalerweise aus zwei Platten zusammen, die aus einem stromleitenden Material bestehen. Diese Platten sind einander gegenüber angeordnet, dürfen sich aber nicht berühren.

Legt man an diese Platten jeweils einen Pol einer Spannung an, lädt sich die eine Platte positiv, die andere negativ auf. Zwischen den Platten bildet sich ein elektrisches Feld aus, welches, nachdem es seine volle Stärke aufgebaut hat, konstant bleibt. [2]

Beim Sensor TS 300 SDI bildet sich das Messfeld zwischen dem aktiven Kugelkopf und dem zu beurteilenden Untergrund aus (siehe Abbildung 32).

Diese Möglichkeit der Speicherung von Energie im elektrischen Feld eines Kondensators wird Kapazität genannt. Je größer die Fläche der Kondensatorplatten und je geringer der Abstand der Platten ist, desto höher ist die Kapazität des Kondensators.

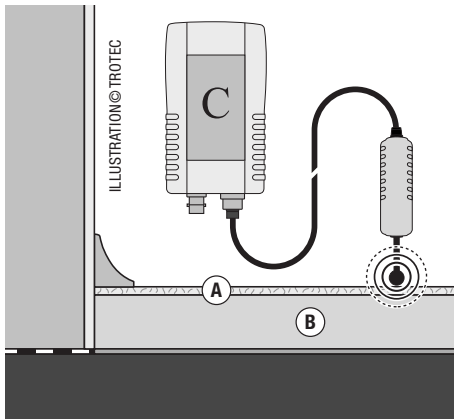
Zusätzlich ist die Kapazität noch abhängig von dem Stoff, der die Platten trennt. Dieses Trennmateriale nennt man Dielektrikum. Das Dielektrikum ändert die Kapazität des Kondensators, obwohl es den Strom nicht leitet.

Der Wert der Dielektrizitätszahl ist eine Verhältniszahl und gibt an, um wie viel mal mehr ein Stoff die Kapazität des Kondensators gegenüber der Luft erhöht.

Wasser hat eine Dielektrizitätskonstante, die etwa 80 Mal größer ist als die der Luft („ = 1) und mindestens 10 („ = etwa 2 bis 8) Mal größer ist, als die eines mineralischen Baustoffes.

Dementsprechend lässt sich Wasser in Baustoffen sehr gut nachweisen. Je höher der Feuchtegehalt des Baustoffes ist, desto größer wird die resultierende Dielektrizitätskonstante.

Das Messgerät misst also mit einem hochfrequenten Wechselstrom die Kapazität des Kugelkopfkondensators, welche ausschließlich durch die veränderliche Dielektrizitätskonstante beeinflusst wird



A: Fliesen, Teppich, PVC; B: Estrich

**Abbildung 32: Schematische Darstellung der kapazitiven Messung mit dem T2000**

#### 4.3.2 Der TS 300 SDI-Sensor zur Baustoff-Feuchtemessung – Messvorgang und Handhabung



Im Gegensatz zur Baustofffeuchtemessung mit Hilfe der Widerstandsmethode wird bei der kapazitiven Messmethode der Sensor TS 300 SDI eingesetzt. Der Vorteil dieses Sensors liegt in der zerstörungsfreien Erfassung der Baufeuchte.

Der Baufeuchtesensor setzt sich im wesentlichen aus dem Kugelkopf und dem Schaft zusammen, der eine abgegrenzte Griff-Fläche aufweist.

Das Einsatzgebiet des Sensors liegt in der oberflächennahen Ermittlung von Feuchteverteilungen in Bauteilen und Baustoffen.

**Die Messwerte sind als relative Werte zu interpretieren, da über die oben beschriebene Messmethode ausschließlich eine Unterscheidung zwischen trockenen und feuchten Baustoffen getroffen werden kann.**

Dies liegt darin begründet, dass die Rohdichte des Baustoffes einen unmittelbaren Einfluss auf die Dielektrizitätskonstante hat.

Die Messwertanzeige steigt mit zunehmender Dichte des Baustoffes und fällt entsprechend einer geringeren Baustoffdichte.

Die vergleichenden Messungen an gleichartigen Bauteilen werden so durchgeführt, dass als erstes an einer augenscheinlich trockenen Wand- oder Bodenfläche gemessen wird und dieser Wert den Trocken-Referenzwert bildet.

Fallen die Messwerte dann an den nachfolgenden Messpositionen deutlich höher aus, dann kann dort von einer höheren Durchfeuchtung im oberflächennahen Bereich ausgegangen werden.

Die aufgeführten Diagramme in Kapitel 4.3.4 können dementsprechend nur zur Orientierung herangezogen werden. Die dort aufgeführten Messergebnisse wurden unter klar definierten Randbedingungen und bekannten Material-Bestandteilen ermittelt.

### Praxistipp:

*Im Vorfeld einer CM-Messung lassen sich mit der kapazitiven Methode oberflächennahe Feuchtezonen schnell und einfach lokalisieren. Somit können, je nach Aufgabenstellung, repräsentative Proben für die CM-Messung entnommen werden.*



Falsch



Falsch

### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

1. Der Haupteinsatz liegt in vergleichenden Messungen am selben Baustoff oder gleichen Bauteilen. Je nach Anzeigewert können oberflächennahe feuchte Zonen eingegrenzt werden.

Die Messung eignet sich auch für die Begutachtung von Wasserschäden und zur Leckageortung.

Dies gilt insbesondere bei Fliesenbelägen, an denen augenscheinlich keine direkte Durchfeuchtung erkannt werden kann. Fliesen durchfeuchten an der Oberfläche nicht, auch dann nicht, wenn diese sich schon von der Wand lösen.

2. Die Einwirktiefe des Messfeldes beträgt je nach Rohdichte und Baustofffeuchte 2 bis 4 cm.
3. Der Sensor darf beim Einsatz weder im Arretierschlitz des Messgerätes befestigt sein, noch darf der Sensorgriff zu weit oben angefasst werden (siehe Abbildung „Falsch/Richtig“). In beiden Fällen würde ein zu hoher Messwert angezeigt.
4. Den Sensor möglichst senkrecht zum Messgut aufsetzen. Um Messfehler zu vermeiden, muss ein Mindestabstand von 8 bis 10 cm zu Eckbereichen eingehalten werden.

### Praxistipp:

*Mit dem TS 300 SDI kann zusätzlich auch die Alarmfunktion des T2000 eingesetzt werden.*

**Vorteil:** *Mit dem Alarmgrenzwertsensor können auch große Flächen schnell und effektiv vermessen werden. Der Anwender kann sich auf das Messobjekt konzentrieren, ohne die Messergebnisse permanent auf dem Display beobachten zu müssen:*

*Sobald der voreingestellte Grenzwert überschritten wird, alarmiert der TS 300 SDI-Sensor den Anwender durch ein akustisches Signal!*



*Die Alarmfunktion ermöglicht eine unkonventionelle und äußerst effektive Einsatzmöglichkeit der Flächenmessung:*

*Dabei wird das Messgerät so gehalten, dass der TS 300 SDI-Sensor am angeschlossenen TC 30 SDI-Kabel möglichst senkrecht den Boden berührt.*

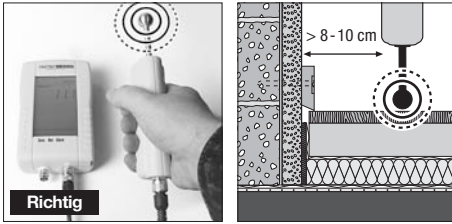
*Nun kann der Sensor beim Abschreiten der Messzone neben dem Anwender hergezogen werden. Wird der definierte Grenzwert überschritten, alarmiert der Sensor den Anwender.*

*Noch schneller kann man eine Flächenmessung wahrscheinlich nicht durchführen!*

### Messvorgang

Wenn die oberflächennahe Feuchteverteilung an mineralischen Baustoffen ermittelt werden soll, müssen grundsätzlich folgende Arbeitsschritte durchgeführt werden:

1. Den Sensor TS 300 SDI mit dem Verbindungskabel TC 30 SDI an das Messgerät anschließen.
2. Gerät einschalten.
3. Messmethode durch Wahl der Sens-Nummer 200 überprüfen und gegebenenfalls einstellen.
4. Funktionskontrolle durchführen. Sensor an der Grifffläche anfassen und in die Luft halten. Der Sensor kalibriert sich nun selbst, was durch ein mehrfaches akustisches Signal bestätigt wird. Der Anzeigewert sollte danach zwischen 0 und 5 Digits betragen, anderenfalls ist der Sensor nicht bestimmungsgemäß kalibriert (siehe Bedienungsanleitung Kapitel 6.8).
5. Den Kugelkopf des Sensors fest auf die Oberfläche des Baustoffs aufdrücken und den Schaft senkrecht zur Oberfläche ausrichten.
6. Im Display des Messgerätes wird im Anzeigefeld des Sensor 1 der aktuelle Messwert ohne Einheit angezeigt. Zum besseren Verständnis wird dieser Anzeigewert als Digit (Digitaler Zahlenwert) verstanden.
7. Messwert im Display ablesen und den Vergleichswert aus den dargestellten Diagrammen (siehe Kapitel 4.3.4) ermitteln.



### 4.3.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise bei der kapazitiven Messmethode

Aus dem oben beschriebenen Messprinzip ergeben sich wichtige Hinweise für den Einsatzbereich des Baufeuchtesensors TS 300 SDI:

- Die Messergebnisse sollten ausschließlich zu orientierenden Feuchtemessungen herangezogen werden. Ein Rückschluss auf absolute Feuchte-Werte in M.-% ist nur bei den Messungen möglich, die unter den selben Randbedingungen und Baustoff-Zusammensetzungen ermittelt wurden. **Die Bestimmung der Belegreife ist deshalb im Praxiseinsatz nicht möglich.**
- Beim Einschalten des Sensors muss sich, wenn dieser in die Luft gehalten wird, ein Anzeigewert von 0 einstellen. Andernfalls ist der Sensor nicht bestimmungsgemäß kalibriert. Eine Einpunktkalibrierung muss dann gemäß Kap. 6.8 der Bedienungsanleitung durchgeführt werden.
- Vor der Messung muss die Oberfläche des mineralischen Baustoffs von Verunreinigungen befreit werden (z. B. Farbreste, Staub).
- Wenn im Prüfgut Metall enthalten ist (z. B. Leitungen, Rohre, Bewehrung, Putzträger), steigt der Messwert sprunghaft an. Bei trockenen Baustoffen kann ein Messwert über 90 Digits als Metallindikation eingestuft werden.
- Wenn der Kugelkopf Kondensator in Ecken gehalten wird, fällt der Messwert grundsätzlich höher aus, da sich mehr Substanz im Streufeld des Messkopfes befindet. Es sollte von der Ecke ein Abstand von mehr als 8 bis 10 cm eingehalten werden.
- Den Kugelkopf während der Messung immer senkrecht zum Messgut halten und nicht abkippen.

- Messkopf immer fest an die zu messende Oberfläche andrücken.
- Raue Oberflächen werden immer einen zu niedrigen Messwert anzeigen. Bei einem Probekörper aus gebräuchlichem Rüttelbeton C30/37 konnte durch das Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, eine Messdifferenz von 10 Digit ermittelt werden. [18]
- Die Einwirktiefe beim TS 300 SDI Sensor liegt je nach Rohdichte und Baustofffeuchte bei 2 bis 4 cm. Aussagen zu tiefer gelegenen Zonen sind nicht möglich.

### 4.3.4 Zusammenstellung der wichtigsten Vergleichswerte zur Messergebnisbeurteilung

Damit die kapazitiven Messwerte **tendenziell** den tatsächlichen Feuchtegehalten eines Baustoffs zugeordnet werden können, wurden an ausgesuchten Baustoffen Kalibriermessungen durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Bauforschung der RWTH Aachen sind Tabellen und Diagramme erstellt worden, die den Zusammenhang zwischen Messwert und dem massebezogenen Feuchtegehalt (M.-%) des untersuchten Baustoffs wiedergeben.

Zur gezielten Einstellung von Feuchtegehalten sind als erstes Prüfkörper hergestellt worden, die anschließend mit einem berechneten Wasservolumen beaufschlagt wurden. Im zweiten Arbeitsschritt lagerten die Probekörper dann zwei Wochen in speziellen Verpackungen, um eine homogene Feuchteverteilung zu gewährleisten. Nach diesen zwei Wochen konnten dann die kapazitiven Messungen (zusammen mit den Widerstandsmessungen) durchgeführt werden, bevor sich dann das Darrverfahren anschloss.

Bei baustoffspezifischen Temperaturen sind die Probekörper so lange getrocknet worden, bis sich eine Gewichtskonstanz einstellte. Der sich ergebende Feuchtegehalt (in M.-%) konnte dann dem kapazitiven Messwert gegenübergestellt werden.

Zu beachten ist, dass die **Streubreite** der erzielten Messergebnisse beim **kapazitiven Verfahren** ungleich **größer** ist, als beim Widerstandsverfahren.

Die Probekörper bestanden u.a. aus einer glatten Oberseite und einer rauen Unterseite. Obwohl die Probekörper eine homogene Feuchteverteilung aufwiesen, konnten an der rauen Seite Messwerte ermittelt werden, die bis zu zehn Digits geringer ausfielen, als die auf der glatten Seite.

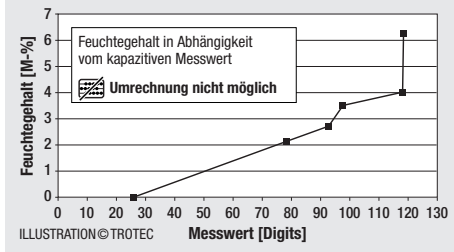


Abbildung 33: Beton C30/37;

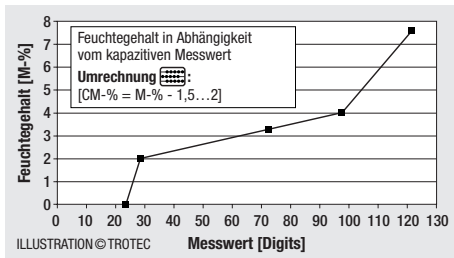


Abbildung 34: Zement-Estrich

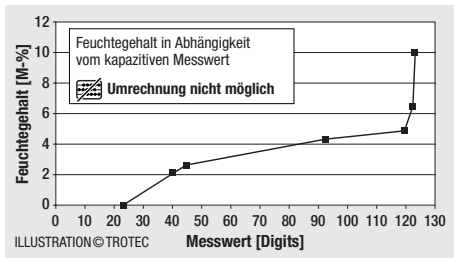


Abbildung 35: Zementfließ-Estrich

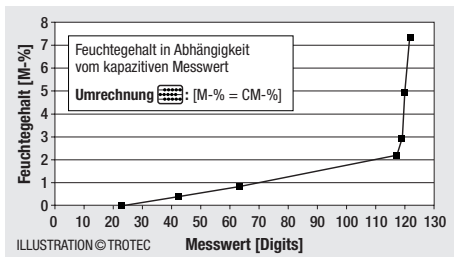
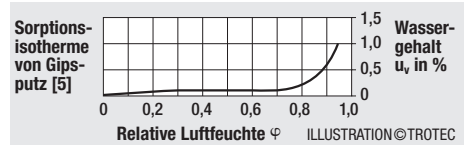


Abbildung 36: Anhydritfließ-Estrich

Die Abbildungen 33 bis 36 zeigen die messtechnischen Ergebnisse in Diagrammform. Diese Diagramme lassen nun den Vergleich zwischen kapazitivem Messwert und tatsächlichem Feuchtegehalt zu. Die Auswahl der Diagramme ist auf die gebräuchlichsten, mineralischen Baustoffe beschränkt.

Gipsputz

Gesondert zu betrachten ist die Ermittlung des Feuchtegehalts bei einem Gipsputz. Wie man dem nachfolgend dargestellten Diagramm entnehmen kann, ändert sich der volumenbezogene Feuchtegehalt von Gipsputz bei Luftfeuchtwerten von 0 bis 80 % wenig:



Oberhalb von 80 % ändert sich der Feuchtegehalt sprunghaft. Dies wurde auch durch die Kalibriermessungen des Institutes für Bauforschung bestätigt [18].

Dementsprechend sind wir der Meinung, dass eine direkte Zuordnung zwischen Messwert und massebezogenem Feuchtegehalt nicht möglich ist. Als hinreichendes Kriterium zur Einordnung der Messwerte lässt sich jedoch festhalten, dass ein Gipsputz als „trocken“ bezeichnet werden kann, wenn der **dielektrische Messwert** beim kapazitiven Verfahren kleiner als 40 Digit ist.

Bei der Beurteilung der Messwerte muss unbedingt darauf geachtet werden, dass bei jeder Messung unterschiedliche Randbedingungen vorherrschen (siehe Kapitel 4.3.3).

Wichtige Einflussgrößen, welche die Höhe des Messwertes beeinflussen, sind die Oberflächenbeschaffenheit, die Baustoffzusammensetzung und die Rohdichte.

Bei nicht aufgeführten Baustoffen lassen sich in der Regel hinreichende Aussagen über örtliche Vergleichswerte treffen. So kann bei einem Wasserschaden das betroffene

Anzeige T2000	Baustofffeuchtebereich
< 40 Digit	Trocken
40 - 80 Digit	Feucht
> 80 Digit	Nass

Tabelle 17: Messwertindikation der Baustofffeuchte

Feuchtigkeitsfeld derart eingegrenzt werden, dass als Beurteilungsgrundlage eine Vergleichsmessung an einer augenscheinlich trockenen Wand- bzw. Bodenfläche durchgeführt wird. Als trocken/nass können die Baustoffe ge-

mäß Tabelle 17 tendenziell eingestuft werden. Über die höheren Messwerte des zu beurteilenden Bereiches lässt sich dann die Ausdehnung des Feuchtigkeitsfeldes gut festlegen.

## 4.4 Baustofffeuchte-Messung – hygrometrisches Verfahren

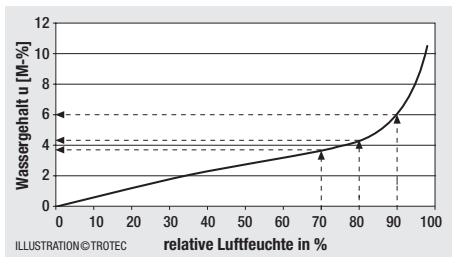
### 4.4.1 Messprinzip

Die hygrometrische Feuchtemessung ist ein zerstörungsarmes, indirektes Messverfahren, welches auch als **Luftfeuchte-Ausgleichverfahren** bezeichnet wird.

Grundlage des Verfahrens ist die Eigenschaft, dass mineralische Baustoffe in Wechselwirkung mit der Umgebungsluft stehen. Steigt die relative Luftfeuchte der Umgebungsluft, dann steigt auch der Feuchtegehalt des Baustoffs. Nach einem gewissen Zeitraum stellt sich ein Gleichgewichtsfeuchtezustand ein, bei dem der poröse Baustoff eine bestimmte Menge an Wasser aufweist.

Über die Sorptionsisotherme lässt sich nun der Wassergehalt „u“ (M.-%) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte  $\varphi$  (% r.H.) darstellen. Da die Sorptionsisotherme stark von der Porengrößenverteilung des Baustoffs abhängt, ist sie auch von der Zusammensetzung des Baustoffs abhängig. Für den zu beurteilenden Baustoff muss es demnach eine bekannte Sorptionsisotherme geben.

Bei der indirekten Messtechnik lässt sich somit der Feuchtegehalt des Baustoffs über die Messung der relativen Luftfeuchte im Gefüge ermitteln. Dazu wird die Sorptionsisotherme ausgewählt, aus der dann mit der Eingangsgröße „Luftfeuchte“ der massebezogene Feuchtegehalt des Baustoffs bestimmt wird (Abbildung 37).



**Abbildung 37: Beispiel für die Bestimmung des Wassergehaltes nach dem hygrometrischen Verfahren über die Sorptionsisotherme**

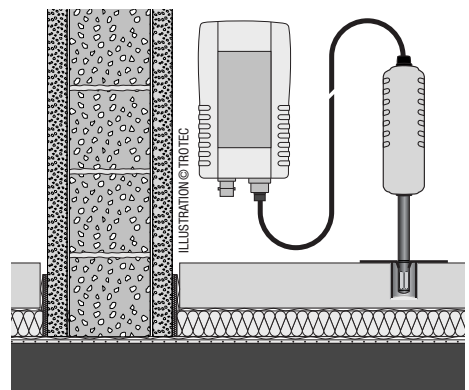
### 4.4.2 Hygrometrische Baustofffeuchte-Messung im Bohrloch

Bevor die hygrometrische Feuchte-Messung angewendet wird, sollte die Zielrichtung bekannt sein.

Zum einen lässt sich mit dem Verfahren indirekt der tatsächliche Feuchtegehalt des Baustoffs in M.-% bestimmen. Grundvoraussetzung hierfür ist das Vorhandensein geeigneter Sorptionsisotherme, mit deren Hilfe auf den tatsächlichen Wassergehalt des zu bemessenden Baustoffs zurückgeschlossen werden kann. Dabei sollte bedacht werden, dass es für die mineralischen Baustoffe eine große Bandbreite möglicher Sorptionsisotherme gibt, die u.a. auch von der Rohdichte abhängen.

Zum anderen lässt sich bei richtiger Anwendung die Belegreife von Betonen feststellen. Bei Estrichen ist dieses in der Praxis aufgrund unterschiedlicher Rohdichten und Verarbeitungstechniken (Verdichtung) auch bei gleichen Estricharten, geringen Schichtdicken etc. nur bedingt möglich.

#### 4.4.2.1 Feuchtemessung im Estrich



In den Räumen, in denen sich die Messstellen befinden, sollte sich das Raumklima mindestens 48 Stunden vor der Messung nicht signifikant ändern, um ein Gleichge-

wicht mit der Baustoffschicht herzustellen. Für Folge-messungen ist entsprechend zu verfahren.

**Durchführung der Messung**

1. In das Messgut muss ein ausreichend großes Loch bis in die gewünschte Tiefe gebohrt werden. Für die Boh-rung sollte ein scharfer Bohrer mit niedriger Drehzahl eingesetzt werden.

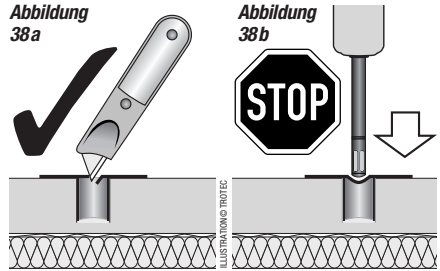
2. Das Bohrloch vom Staub befreien (z. B. Ausblasen) und dann eine allseits geschlossene, nur unten offene Hülse in das Bohrloch einsetzen.

Bei Feuchtemessungen in Estrich muss immer eine solche Hülse verwendet werden, damit nur diejenige Feuchte in den Hohlraum gelangt, welche aus der ge-wünschten Schichttiefe (am Hülsenboden) kommt. Feuchtemessungen ohne Hülse würden ein falsches „Mikrofeuchteprofil“ bilden und fehlerhafte Messwerte erzeugen.

3. Das Bohrloch nach Einsetzen der Hülse durch Verwen-dung eines Klebbandes oder anderer geeigneter Hilfs-mittel luftdicht abdichten.

4. Wegen der Erwärmung des Bohrlochs sollte zur Stabi-lisierung der Luftfeuchtigkeit eine Wartezeit von min-destens 15 Minuten eingehalten werden.

5. Das zur Versiegelung des Bohrlochs verwendete Kle-beband so einschneiden (Abbildung 38a), dass der Klimasensor TS 200 SDI oder TS 240 SDI in das Bohr-loch eingeführt werden kann.

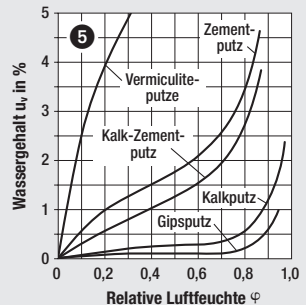
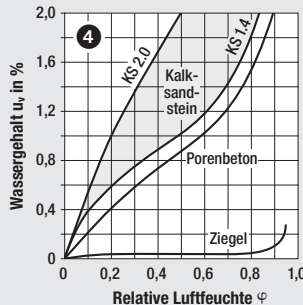
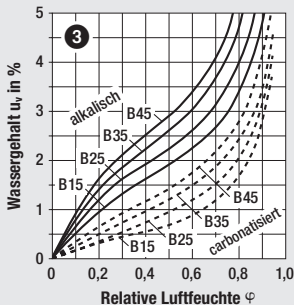
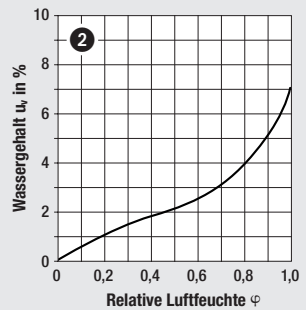
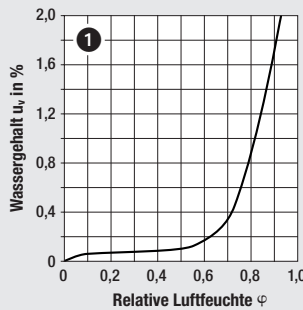


**Wichtig:** Die bestimmungsgemäße Verwendung der Sen-soren ist ausschließlich auf den Messeinsatz beschränkt. **Durchstoßen Sie deshalb das Klebeband niemals mit dem Sensorkopf (Abb. 38b), sondern stechen es mit dafür geeigneten Hilfsmitteln (Messer etc.) ein!**

**Abbildung 39:**  
Sorptionisotherme ver-schiedener Materialien:

- 1 Anhydritestrich
- 2 Zementestrich
- 3 Zementbetone
- 4 Künstliche Steine
- 5 Putze

[15]





6. Nachdem sich die Gleichgewichtsfeuchte in dem Hohlraum eingestellt hat (in der Regel nach 30 Minuten), kann die rel. Luftfeuchte am Messgerät abgelesen werden. Anhand der passenden Estrich-Sorptionsisotherme kann nun über die relative Feuchte der Wassergehalt aus dem Diagramm abgelesen werden (Abbildung 39, 1 und 2). Beachtet werden muss, dass der ermittelte Wert lediglich ein Einzelwert des Wassergehaltes in dieser Schichttiefe darstellt. Dieser entspricht nicht dem mittels des Darr-Verfahren gemessenen Wert, welcher dem Wassergehalt der Gesamtprobe entspricht.

**Achtung:** Sensor- und Gefügetemperatur müssen annähernd gleich sein, um Messfehler zu vermeiden. Wenn der Sensor kälter ist, als die Temperatur im Bohrloch, kann die Feuchte am Sensor kondensieren, was zu falschen Messergebnissen führt. Dieser Sachverhalt ist insbesondere bei Heizstrichen von Bedeutung.

Sollen über diese **Einmalmessung** hinaus **Dauermessungen zur Kontrolle des Trocknungsverlaufs** vorgenommen werden, so kann das Bohrloch nach durchgeführter Messung wieder mit einem unbeschädigten Klebandstreifen luftdicht versiegelt werden.

#### 4.4.2.2 Feuchtemessung im Beton

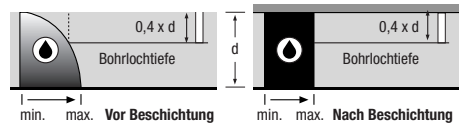
Im Gegensatz zu Feuchtemessungen im Estrich oder Wänden wird die hygrometrische Feuchtemessung in Betonkonstruktionen von anderen Parametern beeinflusst, was auch den Messvorgang dementsprechend bestimmt. Das hängt einerseits von den größeren Schichtstärken ab und andererseits davon, ob der Beton einseitig oder beidseitig trocknen kann.

In der Praxis wird jedoch meist die Anforderung gestellt, möglichst früh abschätzen zu können ob bzw. wann der Beton für Folgegewerke wie Beschichtungen verlegereif ist. Hierzu muss man wissen, welcher Feuchtgehalt bzw. Feuchteprofil sich nach aufbringen einer dampfdiffusionsdichten Sperrschicht im Gefüge einstellt, um eine Dauerhaftigkeit zu gewährleisten.

#### Einseitig austrocknende Betonkonstruktionen

In Betonkonstruktionen, die nur einseitig trocknen können (Abbildung 40), ist der Feuchtegehalt in der Seite, die der offenen Fläche gegenüberliegt, am höchsten. Erfahrungsgemäß stellt sich nach dem Aufbringen einer dampf-

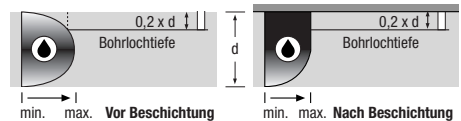
dichten Beschichtung der Feuchtegehalt ein, welcher in einer Tiefe von 40 % des Schichtaufbaus, ausgehend von der offenen Seite, vorliegt (Abbildung 40) [17].



**Abbildung 40:** Feuchteprofile einer einseitig austrocknenden Betonkonstruktion vor und nach der Beschichtung

#### Zweiseitig austrocknende Betonkonstruktionen

In Konstruktionen, bei denen der Beton beidseitig trocknen kann (Abbildung 41), ist der Feuchtegehalt während der Trocknungsdauer in der Gefügemitte am höchsten. Erfahrungsgemäß stellt sich nach dem Aufbringen einer dampfdichten Beschichtung der Feuchtegehalt ein, welcher in der Tiefe von 20 % des Schichtaufbaus vorliegt (Abbildung 41). [17]



**Abbildung 41:** Feuchteprofile einer zweiseitig austrocknenden Betonkonstruktion vor und nach der Beschichtung

Das Austrocknungsverhalten kann jedoch von mehreren Faktoren beeinflusst werden, welche auch Einfluss auf das Feuchteprofil im Gefügebau haben.

Bedingt dadurch können sich auch andere Feuchteprofile als oben dargestellt bilden. Deshalb sollte die Feuchtemessung immer an mehreren verschiedenen Messstellen erfolgen.

#### Durchführung der Messung

In den Räumen, in denen sich die Messstellen befinden, sollte sich das Raumklima mindestens 48 Stunden vor der Messung nicht signifikant ändern, um ein Gleichgewicht mit der Baustoffschicht herzustellen. Für Folgemessungen ist entsprechend zu verfahren.

1. In das Messgut muss ein ausreichend großes Loch bis in die gewünschte Tiefe gebohrt werden. Für die Bohrung sollte ein scharfer Bohrer mit niedriger Drehzahl eingesetzt werden.



2. Das Bohrloch vom Staub befreien (z. B. Ausblasen) und dann eine allseits geschlossene, nur unten offene Hülse in das Bohrloch einsetzen. Bei Feuchtemessungen in Beton muss immer eine solche Hülse verwendet werden, damit nur diejenige Feuchte in den Hohlraum gelangt, welche aus der gewünschten Schichttiefe (am Hülseboden) kommt. Feuchtemessungen ohne Hülse würden ein falsches „Mikrofeuchteprofil“ bilden und fehlerhafte Messwerte erzeugen.
3. Das Bohrloch nach Einsetzen der Hülse durch Verwendung eines Klebebandes oder anderer geeigneter Hilfsmittel luftdicht abdichten.
4. Bei Betonkonstruktionen wird die Ausgleichsfeuchte im Bohrloch nach 72 Stunden erreicht, dann erst dürfen Feuchtemessungen vorgenommen werden. [17]
5. Nach Ablauf der 72 Stunden ist das zur Versiegelung des Bohrlochs verwendete Klebeband einzuschneiden und der Klimasensor TS 200 SDI in das Bohrloch einzuführen. 10 bis 20 Minuten warten. Danach kann die

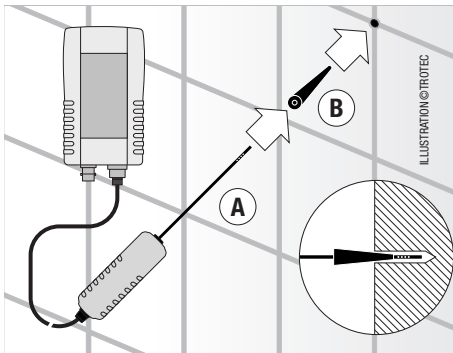
relative Luftfeuchte am Messgerät abgelesen werden.

Anhand der passenden Beton-Sorptionsisotherme kann nun über die relative Feuchte der Wassergehalt aus dem Diagramm abgelesen werden (Abbildung 39). Beachtet werden muss, dass der ermittelte Wert lediglich ein Einzelwert des Wassergehaltes in genau dieser Schichttiefe darstellt. Dieser entspricht nicht dem mittels des Darr-Verfahren gemessenen Wert, welcher dem Wassergehalt der Gesamtprobe entspricht.

**Achtung:** Sensor- und Gefügetemperatur müssen annähernd gleich sein, um Messfehler zu vermeiden. Wenn der Sensor kälter ist, als die Temperatur im Bohrloch, kann die Feuchte am Sensor kondensieren, was zu falschen Messergebnissen führt.

Sollen über diese **Einmalmessung** hinaus **Dauermessungen zur Kontrolle des Trocknungsverlaufs** vorgenommen werden, so kann das Bohrloch nach durchgeführter Messung wieder mit einem unbeschädigten Klebebandstreifen luftdicht versiegelt werden.

#### 4.4.2.3 Feuchtemessung in gefliesten Wand- oder Bodenbereichen



1. Im Fugenkreuz muss ein ausreichend großes Loch bis in die gewünschte Tiefe gebohrt werden. Für die Bohrung sollte ein scharfer Bohrer mit niedriger Drehzahl eingesetzt werden. Wenn in den betroffenen Wand- oder Bodenbereichen bereits Bohrlöcher vorhanden sind, z. B. Duscharmaturen, Handtuchhalter etc.), können diese alternativ verwendet werden. Vorhandene, jedoch zu kleine Bohrlöcher sind entsprechend aufzubohren.
2. Das Bohrloch vom Staub befreien (z. B. Ausblasen) und durch den Einsatz eines Klebebandes oder anderer geeigneter Hilfsmittel luftdicht abdichten.

3. Wegen der Erwärmung des Bohrlochs sollte zur Stabilisierung der Luftfeuchtigkeit eine Wartezeit von mindestens 15 Minuten eingehalten werden.

4. Da bei Fugenkreuzmessungen durch den verwendeten Zylinder nur Sensoren mit entsprechend schmalen Sensorkopfdurchmesser verwendet werden können, ist hier der Einsatz des TS 240 SDI-Klimasensors (A) zu empfehlen. Den Dichtungszylinder (B) auf den Sensorkopf stecken.

5. Das zur Versiegelung des Bohrlochs verwendete Klebeband entfernen und den Zylinder mit Sensorkopf in das Bohrloch einführen. Der Sensorkopf muss sich mindestens vier Zentimeter in der Konstruktion befinden.

**Wichtig:** Die bestimmungsgemäße Verwendung des Klimasensor TS 240 SDI ist ausschließlich auf den Messeinsatz beschränkt. **Nie den Sensorkopf biegen oder bei Wandmessungen im Bohrloch belasten!**

6. Nachdem sich die Gleichgewichtsfeuchte in dem Hohlraum eingestellt hat (in der Regel nach 20 bis 40 Minuten), kann die relative Luftfeuchte am Messgerät abgelesen werden. **Achtung:** Sensor- und Gefügetemperatur müssen annähernd gleich sein, um Messfehler zu vermei-

den. Wenn der Sensor kälter ist, als die Temperatur im Bohrloch, kann die Feuchte am Sensor kondensieren, was zu falschen Messergebnissen führt.

Sollen über diese **Einmalmessung** hinaus **Dauermessungen zur Kontrolle des Trocknungsverlaufs** vorgenommen werden, so kann das Bohrloch nach durchgeführter Messung wieder mit einem unbeschädigten Klebandstreifen luftdicht versiegelt werden.

#### 4.4.2.4 Feuchtemessung in Kombination mit der CM-Messung (Pat. angem.)

*Die nachfolgenden Ausführungen sind aus einer Patentanmeldung der Firma Dr. Radtke CPM Chemisch-Physikalische Messtechnik AG, Hasenbühlweg 9, CH-6300 Zug/Schweiz entnommen. Zwischen den Firmen „Trotec“ und „Dr. Radtke CPM Chemisch-Physikalische Messtechnik AG“ besteht eine Patenlizenzvereinbarung.*

Die Kombifeuchtemessung wendet zwei grundlegend verschiedene Feuchtigkeitsmessmethoden auf die selbe Materialprobe an. Zum einen die Methode der korrespondierenden Ausgleichsfeuchtemessung und zum anderen die Carbid-Methode.



Beide Materialmessungen erfolgen dabei in **einem einzigen geschlossenen System**, der auch bei der CM-Messung eingesetzten Druckflasche.

Im ersten Schritt wird das Feuchtegleichgewicht in der Druckflasche erreicht und die Luftfeuchtigkeit im Flascheninnern mit dem Luftfeuchtesensor TS 200 SDI ermittelt.

Im zweiten Schritt wird die Carbidampulle eingeführt und mit der selben Materialprobe eine CM-Messung durchgeführt.

Da beide Messergebnisse von der selben Materialprobe ermittelt wurden, führt diese neue Methode der Kombifeuchtemessung zu einer größeren Sicherheit beim Bodenleger. Der zusätzliche Zeitaufwand gegenüber einer

CM-Messung beträgt weniger als 10 Minuten. Durch die zusätzliche Zerkleinerung der Materialprobe kann die nachfolgende CM-Messung schneller erfolgen.

Zur Bestimmung der beiden Messergebnisse wird eine vorgängig abgewogene Materialprobe, wie sie für die nachfolgende CM-Messung notwendig ist, zusammen mit den Stahlkugeln in die Druckflasche eingebracht und mit einem Spezialdeckel verschlossen.

Die Materialprobe wird von den Stahlkugeln in der Druckflasche zerkleinert. Die Zerkleinerung bewirkt eine größere Oberfläche der Materialprobe, wodurch sich das Feuchte-Gleichgewicht „Innenluft-Materialprobe“ schneller einstellen kann.

Die Druckflasche wird dazu senkrecht gehalten und während einer Minute möglichst kräftig geschüttelt. Jeweils nach dem Schütteln wird die Druckflasche einige Male zwischen den Handflächen hin und her gerollt. Dadurch wird ein intensiver Kontakt zwischen der Materialprobe und der Innenluft erreicht. Die Prozedur „Zerkleinern – Rollen“ wird ein zweites Mal wiederholt.

Nach Erreichen des Feuchtegleichgewichtes wird der Luftfeuchtesensor TS 200 SDI durch eine genau für diesen Sensor konzipierte, verschleißbare Öffnung im Spezialdeckel in das geschlossene System eingebracht, ohne dass es dadurch zu einem wesentlichen Feuchtigkeitsverlust kommt. Die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur werden abgelesen und protokolliert.

Nach der Ermittlung der korrespondierenden Ausgleichsfeuchte wird dann die CM-Messung durchgeführt. Dazu wird der Spezialdeckel abgenommen, eine Carbidampulle in die schräg gehaltene Druckflasche eingebracht und diese anschließend ohne Zeitverzug mit dem Manometerdeckel wiederum verschlossen. Die Druckflasche wird wiederum senkrecht während zwei mal einer Minute möglichst stark geschüttelt. Danach wird gemäß der in der Bedienungsanleitung des CM-Gerätes beschriebenen Vorgehensweise gemessen.

Durch die Kombination beider Verfahren ist eine Korrelation der Ausgleichsfeuchte möglich. Weitere Informationen zur Kombifeuchtemessung sind beim Hersteller der CM-Geräte erhältlich.

#### 4.4.3 Erfahrungswerte bei der Beurteilung von Baustoffeuchte hinsichtlich der Belegreife

Da sich das hygrometrische Messverfahren insbesondere für die schnelle, zerstörungsarme Beurteilung von Estrichen und Betonen eignet, werden in der Tabelle 18a einige Erfahrungswerte angegeben.

Das Messverfahren wird in Skandinavien, den USA und in den angelsächsischen Ländern bereits seit längerer Zeit zur schnellen und zerstörungsarmen Beurteilung von Feuchtwerten eingesetzt. Es ist anerkannt und hat sich in der Praxis bewährt [17]. Hier gelten jeweils andere Luftfeuchtigkeitsgrenzwerte der Luftfeuchtigkeit, als in Tabelle 18a angegeben.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, an der selben Stelle ohne weiteren Aufwand Wiederholungs- und Kontrollmessungen durchführen zu können.

Auch die Bestimmung von Feuchteprofilen ist durch unterschiedliche Bohrlochtiefen einfach und schnell möglich. Damit kann der Austrocknungsverlauf überwacht und der Feuchtezustand früher, zeitsparender und ohne weitere Materialentnahmen bestimmt werden.

Außerdem entfällt bei diesem Verfahren die Notwendigkeit des zusätzlichen Erwerbs von entsprechenden Speziale Sensoren, da für die Messung der herkömmliche Feuchtefühler der MultiMeasure-Serie verwendet werden kann.

Wenn in den zu prüfenden Materialien die Grundeigenschaften wie w/z-Wert, Porösität und Dichte annähernd übereinstimmen, können zur Bestimmung auch nicht speziell auf dieses Material angefertigte Sorptionsisotherme Anwendung finden. Vor allem bei Beton ist eine gute Anwendbarkeit der in der Literatur vorhandenen Sorptionsisotherme gegeben.

In Feuchtebereichen zwischen 30 und 80 % r.H. ist die Validität der Messergebnisse bei vorhandener Sorptionsisotherme als ausreichend genau anzusehen [15]. Oberhalb von 80 % kann aufgrund des stärkeren Anstiegs der Sorptionsisotherme keine genaue Berechnung der Baustoffeuchte vorgenommen werden.

Die Wassergehalte sind in der Genauigkeit nicht mit dem Darr-Verfahren vergleichbar, was aber durch den Vorteil der schnelleren Vor-Ort-Aussage über den Feuchtezustand des Bauteils wieder relativiert wird.

Es besteht aufgrund der unterschiedlichen Lehrmeinungen erhöhter Forschungsbedarf zum Einsatz des hygrometrischen Verfahrens, insbesondere bei der Bestimmung der Belegreife von Estrichen. Zum jetzigen Zeitpunkt vertreten wir die Auffassung, dass sich das Verfahren unter Praxisbedingungen als Orientierungshilfe (trocken/feucht) anbietet, nicht aber zur genauen Bestimmung der Belegreife von Estrichen eignet.

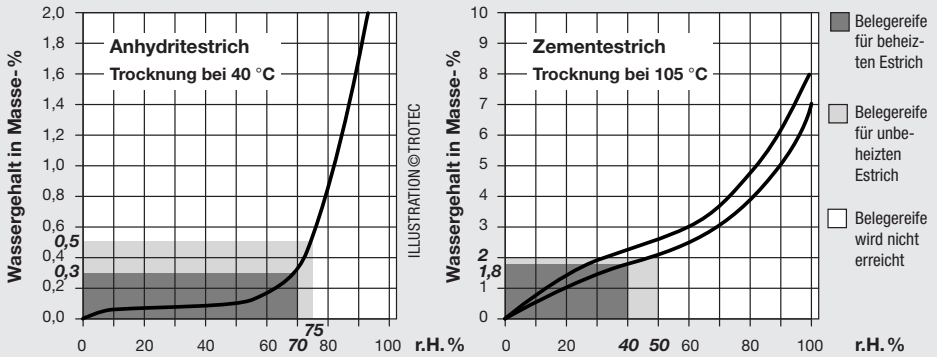
Jedoch können im Zusammenhang mit den raumklimatischen Bedingungen und der sich dadurch einstellenden Baustoff-Ausgleichsfeuchte zumeist **hinreichende Aussagen über die Erreichbarkeit der Belegreife** getroffen werden.

Anhand der Tabelle 18b kann man erkennen, dass sich bei einer relativen Raumluftfeuchte oberhalb von 70 bis 75 % bei Anhydritestrichen bzw. über 40 bis 50 % bei Zementestrichen die geforderten Wassergehalte zur Erreichung der Belegreife überhaupt nicht einstellen können.

Die relativen Luftfeuchtigkeitswerte in Neubauten liegen aufgrund der klimatischen und räumlichen Gegebenheiten erfahrungsgemäß weit darüber und bewegen sich zwischen 80 und 95 %. Die erforderlichen Luftfeuchtwerte können somit ohne künstliche Trocknungsmaßnahmen überhaupt nicht erreicht werden.

Baustoff	Oberboden	Grenzwert Luftfeuchte
Wasserdichter Estrich/Beton	Diffusionsdichte Beläge/Beschichtungen	75 % r.H.
Magnesiaestrich/Anhydritestrich	Beläge/ Beschichtungen mit Diffusionswiderstand ( $S_d$ ) > 2 m	65 % r.H.
Estrich/Beton	Parkett	55 % r.H.

Tabelle 18a: Möglicher Grenzwert der rel. Luftfeuchte in Abhängigkeit vom Baustoff und des Oberbodens (nach Rieche [14])



Maximaler Feuchtigkeitsgehalt für die Belegereife von unbeheiztem / beheiztem Estrich\*:

Anhydritestrich		Bodenbelag	Zementestrich	
unbeheizt	beheizt		unbeheizt	beheizt
0,5 %	0,3 %	elastische und textile Beläge	2,0 %	1,8 %
0,5 %	0,3 %	Parkett und Holzpflaster	2,0 %	1,8 %
0,5 %	0,3 %	Laminatboden	2,0 %	1,8 %
0,5 %	0,3 %	Stein- und keramische Böden im Dick- und Dünnbett	2,0 %	1,8 %

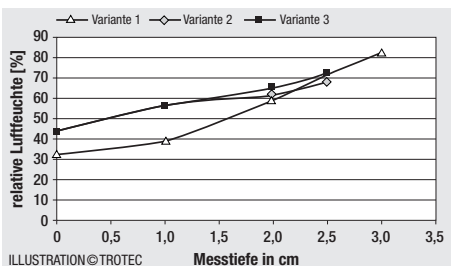
Die oben angegebenen Feuchtigkeitsgehalte sind Gewichtsprozent, die mit der CM-Methode ermittelt worden sind.

\* Magnesiaestrich: 1,0 bis 3,5 – je nach Aufbau der organischen Bestandteile; Erfahrungswerte sind beim Hersteller zu erfragen.

Tabelle 18b: Sorptionsisotherme von Anhydrit- und Zementestrich

Geeignet ist das Verfahren bei Messungen von **Feuchteänderungen in Boden- und Wandaufbauten**. Hier sind die Messergebnisse unabhängig vom jeweiligen Baustoff. Rohdichte oder Inhomogenitäten beeinflussen die relativen, zeitbezogenen Messwerte nicht.

#### 4.4.4 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise beim hygrometrischen Verfahren



Variante 1: Messung ohne Abdichtungshülse im Bohrloch  
 Variante 2: Messung mit Abdichtungshülse im Bohrloch  
 Variante 3: Messung in einer bestimmten Tiefe mit jeweils 0,5 cm freier Höhe der Bohrlochwandung

Abbildung 42: Messung der rel. Luftfeuchte in einem Bohrloch in unterschiedlichen Tiefen und mit unterschiedlichen Varianten an Proben des Typs A. [15]

Fehlerquellen liegen aber nicht nur in der Bezugnahme auf fehlerhafte oder falsche Sorptionsisotherme, sondern auch bei einem erhöhten Salzgehalt im Baustoff. Die sich im Bohrloch einstellende relative Feuchtigkeit ändert sich bei erhöhtem Salzgehalt. Ebenso führen zu große Temperaturdifferenzen zwischen Baustoff und umgebender Luft zu Fehlinterpretationen [16].

Eine weitere Fehlerquelle resultiert aus der Nichtverwendung einer Messhülse. Ohne allseits geschlossene Messhülse stellt sich die Luftfeuchtigkeit im Bohrloch über das gesamte Gefüge ein, was je nach Bohrlochtiefe zu niedrigeren Luftfeuchtwerten führt. Dieser Umstand tritt insbesondere bei Bohrlochtiefen < 2 cm auf. Bei größerer Tiefe ist der Fehler kleiner (siehe Abbildung 42) [15].

## 4.5 Baustofffeuchte-Messung – Mikrowellenverfahren

Das Mikrowellenverfahren gehört zur Kategorie der dielektrischen Feuchtemessverfahren. Dielektrische Messverfahren basieren auf den dielektrischen Eigenschaften des Wassers. Wasser ist ein polares Molekül, d.h. die Ladungsschwerpunkte fallen innerhalb des Moleküls örtlich nicht zusammen.

Deswegen richtet sich das Wassermolekül in einem von außen angelegten Feld in einer Vorzugsrichtung aus, es ist polarisierbar. Wird ein elektromagnetisches Wechselfeld angelegt, dann beginnen die Moleküle mit der Frequenz des Feldes zu rotieren (Orientierungspolarisation). Dieser Effekt wird makroskopisch durch die physikalische Größe Dielektrizitätskonstante (Abkürzung DK) gekennzeichnet.

Der dielektrische Effekt ist bei Wasser so stark ausgeprägt, dass die DK von Wasser etwa 80 beträgt. Die DK der meisten Feststoffe, darunter auch der Baustoffe, ist wesentlich kleiner, sie liegt im Bereich 2 ...10 und vorzugsweise zwischen 3 und 6. Gemessen wird daher der Unterschied zwischen der DK von Wasser und der DK der Baustoffe. Wegen des großen Unterschiedes zwischen diesen Werten lassen sich auch kleine Wassermengen schon gut detektieren.



### 4.5.1 Messprinzip

Bei zunehmenden Frequenzen kann das Wassermolekül einem von außen angelegten elektromagnetischen Wechselfeld wegen stoffinterner Bindungskräfte (das Wassermolekül „schwimmt“ im Wasser und ist an die anderen Moleküle gebunden) immer schlechter folgen.

Es entsteht eine Art stoffinterne Reibung oder anders gesagt dielektrische Verluste. Bei genügend hoher eingestrahlter Leistung führt dies zur Erwärmung. Dieser Effekt wird z. B. in der Küchenmikrowelle für die Erwärmung von Speisen genutzt.

Mit speziellen Mikrowellen-Anordnungen lassen sich die dielektrischen Verluste messen. Die hierfür einzustrahlenden Leistungen sind viele Größenordnungen kleiner als für Erwärmungszwecke notwendig, sie können unter 1 mW liegen. Damit wird jede Art gesundheitlicher Gefährdung durch elektromagnetische Strahlung (Elektromog) ausgeschlossen.

Das Maximum der dielektrischen Verluste von Wasser liegt bei einer Frequenz um die 20 GHz. Allerdings ist die zugehörige Wellenlänge der elektromagnetischen Welle so klein, dass eine Messung bei dieser Frequenz nicht sinnvoll ist. Außerdem sind auch bei niedrigeren Frequenzen die dielektrischen Verluste schon hoch genug, um Wasser gut nachweisen zu können.

Im Mikrowellenbereich stehen also neben der hohen DK des Wassers (genauer: Realteil der DK) auch die dielektrischen Verluste (genauer: Imaginärteil der DK) als Messgröße zur Verfügung. Die Kopplung an die physikalischen Eigenschaften des Wassers ist sehr eng.

Darüberhinaus weist der Mikrowellen-Bereich noch eine Reihe weiterer Vorteile auf. Wie sich von den grundlegenden Gleichungen der Elektrotechnik ausgehend leicht zeigen lässt, sinkt bei zunehmenden Frequenzen der Einfluss der ohmschen Verluste (ionische Leitfähigkeiten, z. B. Versalzung des Mauerwerks) stark ab. Ab etwa 1 GHz sind diese Verluste gegenüber den dielektrischen Verlusten nahezu vernachlässigbar. **Mikrowellenverfahren sind also von der Versalzung nahezu unabhängig.**

## 4.5.2 Feuchtemessung mit dem Mikrowellensensor TS 350

Der Mikrowellensensor TS 350 enthält eine Antennen-Anordnung, die **zerstörungsfrei Eindringtiefen bis zu etwa 30 cm ermöglicht**.

Er ist dafür geeignet, die Feuchte im Volumen des Messguts zu ermitteln (Abbildung 43). Die Messung erfolgt nach einem Reflexionsprinzip, d. h. gemessen wird der feuchteabhängige Anteil der Welle, der vom Messgut reflektiert wird.

Zum Messen wird der Messkopf **eben** auf eine möglichst glatte Oberfläche des Messguts aufgesetzt. **Generell ist zu beachten, dass sich unter dem Messgut keine Metallflächen befinden dürfen.**

Die Antennen-Anordnung formt aus der im Messkopf erzeugten elektromagnetischen Schwingung eine elektromagnetische Welle, die sich ins Material hinein ausbreitet.

Zur Reflexion dieser Welle tragen dabei nicht nur die oberflächennahen Volumenelemente des Messguts bei, sondern auch die tieferliegenden. Die Gewichtung des Beitrags der einzelnen Volumenelemente nimmt mit zunehmender Tiefe ab. Das heißt, dass tieferliegende Feuchte zonen den Anzeigewert anteilig geringer beeinflussen, als oberflächennahe Durchfeuchtungen.

### Bei der Handhabung sind folgende Punkte zu beachten:

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit ist wegen der hohen Eindringtiefe nicht so groß. Eine Messung an Materialien mit kleinteiligen Oberflächenrauigkeiten mit Rautiefen > 10 mm muss jedoch als kritisch betrachtet werden.

Bei der Messung ist außerdem darauf zu achten, dass der Sensor nicht kippelt.

### Mindestdicke des Materials

Das Feld dringt in das Messgut material- und feuchteabhängig 20 bis 30 cm ein. Die in ihrer Feuchte zu bestimmenden Messgüter müssen daher auch wenigstens diese Stärke aufweisen (siehe Abbildung 44).

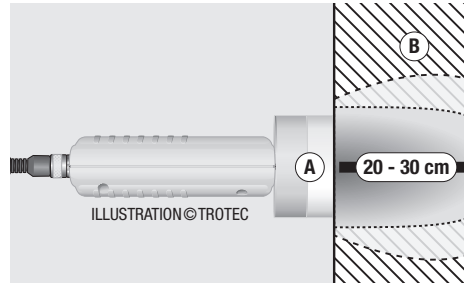


Abbildung 43: Zur Messung den Messkopf (A) des Mikrowellensensor TS 350 im rechten Winkel auf das Messgut (B) aufsetzen.

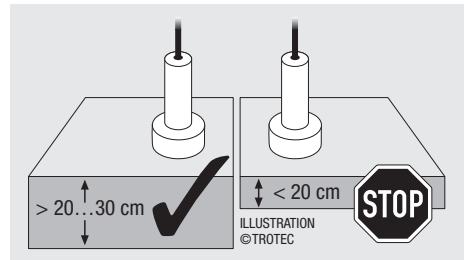
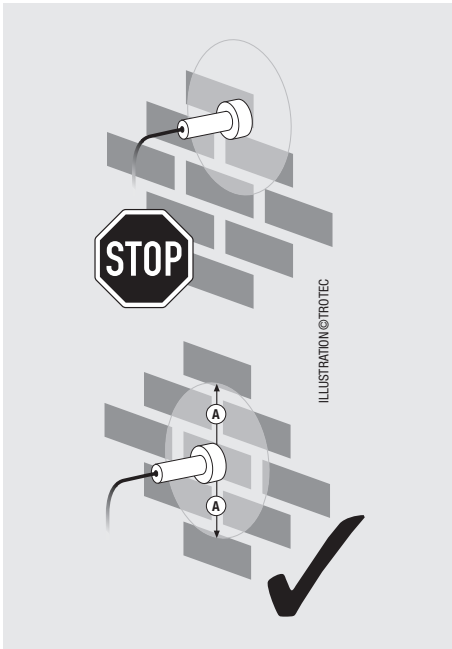


Abbildung 44: Die zu bestimmenden Messgüter müssen mindestens 20 bis 30 cm dick sein.

Weist das Messgut – z. B. eine Wand – eine geringere Stärke auf, so werden Anteile der vom TS 350-Sensor abgestrahlten elektromagnetischen Welle an der Messgutrückseite reflektiert und überlagern sich an der Messkopfantenne mit den feuchteabhängigen Reflexionen. Je nach Feuchte und Material kann dieser Effekt zu teilweise starken Verfälschungen des gemessenen Wertes führen. So kann zum Beispiel bei geringen Feuchtwerten ein hoher Messwert angezeigt werden, oder umgekehrt!

Entgegen früheren Angaben wird deshalb darauf hingewiesen, dass so genannte „Platzhalter“ (z. B. Messunterlagen aus extrudiertem Polystyrol oder Vollgummi) für den Einsatz bei zu geringen Materialstärken das Ergebnis nachteilig beeinflussen können und deshalb nicht zu empfehlen sind!

Stattdessen sollte stets eine möglichst dichte Rastermessung (bzw. Clustermessung, siehe Kapitel 4.5.3) der zu prüfenden Gesamtfläche durchgeführt werden (siehe Abbildungen 46, 47). Auf diese Weise werden durch wechselnde Materialstärken bzw. -inhomogenitäten verursachte



**Abbildung 45:** Der Mindestabstand zur Messgutberandung (A) muss mindestens 10 cm betragen.

Messfehler minimiert. Es empfiehlt sich, von der zu prüfenden Fläche eine Skizze anzufertigen, in welche die Messwerte eingetragen werden. Diese können später, z. B. mit einem Tabellenkalkulationsprogramm, als farbige Feuchteverteilung dargestellt werden (siehe Kapitel 4.5.4).

#### Mindestabstand von seitlichen Begrenzungen

Das Mikrowellenfeld des TS 350-Sensor weist eine ausgeprägte seitliche Ausdehnung auf (Abbildung 43). Daher muss zu den seitlichen Begrenzungen des Messguts ein Mindestabstand eingehalten werden, da es sonst zu Verfälschungen des Messwertes kommen kann.

Das Messvolumen kann grob vereinfacht als Zylinder mit einem Radius von 10...15 cm angesehen werden. Der seitliche Mindestabstand zur Messgutberandung wird daher mit 10 cm vorgegeben (Abbildung 45).

Eine Feuchtemessung mit geringerem Abstand zum seitlichen Rand des Messguts kann zu einer Verfälschung des Messwertes führen.

Für eine aussagefähige und genaue Messung mit dem TS 350-Mikrowellensensor muss daher immer sichergestellt werden, dass das betrachtete Messvolumen ausreichend groß ist.

#### Messvorgang

Wenn die Feuchteverteilung an mineralischen Baustoffen ermittelt werden soll, müssen grundsätzlich folgende Arbeitsschritte durchgeführt werden:

1. Den Sensor TS 350 SDI mit dem Verbindungskabel TC 30 SDI an das Messgerät anschließen.
2. Gerät einschalten.
3. Messmethode durch Wahl der Sens-Nummer 200 überprüfen und gegebenenfalls einstellen.
4. Zur Funktionskontrolle den Sensor nach dem Einschalten in die Luft halten. Beachten Sie einen Mindestabstand von 50 cm zu festen Stoffen. Der Anzeigewert muss sich nun auf Null stellen, anderenfalls ist der Sensor nicht bestimmungsgemäß abgeglichen (siehe Bedienungsanleitung, Kapitel 6.8).
5. Den Sensorkopf fest auf die Oberfläche des Baustoffs aufdrücken und den Schaft senkrecht zur Oberfläche ausrichten.
6. Im Display wird im Anzeigefeld des Sensor 1 der aktuelle Messwert ohne Einheit angezeigt. Zum besseren Verständnis wird dieser Anzeigewert als Digit (Digitaler Zahlenwert) verstanden.

Vor der Messung muss die Oberfläche des mineralischen Baustoffs von Verunreinigungen befreit werden (z. B. Farbreste, Staub).

#### 4.5.3 Störeinflüsse und zu beachtende Hinweise beim Mikrowellenverfahren

Die Messwerte sind als relative Werte zu interpretieren, da über die oben beschriebene Messmethode ausschließlich eine Unterscheidung zwischen trockenen und feuchten Baustoffen getroffen werden kann.

Dies liegt darin begründet, dass die Rohdichte des Baustoffes einen unmittelbaren Einfluss auf die Dielektrizitätskonstante hat.



Die vergleichenden Messungen an gleichartigen Bauteilen werden so durchgeführt, dass als erstes an einer augenscheinlich trockenen Wand- oder Bodenfläche gemessen wird und dieser Wert den Trocken-Referenzwert bildet.

Der Haupteinsatz liegt in vergleichenden Messungen am selben Baustoff oder gleichen Bauteilen. Je nach Anzeigewert können feuchte Zonen bestimmt und eingegrenzt werden.

Prinzipiell sollten keine Einzelmessungen, sondern stets vergleichende Rastermessungen durchgeführt werden. Hierzu ist ein Rasterfeld der Messflächen anzulegen und für jeden einzelnen Quadranten dieses Feldes ein Messwert zu ermitteln (siehe Kapitel 4.5.4).

Die Messung mit dem Mikrowellenverfahren eignet sich auch zur Begutachtung von Wasserschäden und zur Leckageortung.

Wenn im Prüfgut Metall enthalten ist (z. B. Rohre, Leitungen, Bewehrung, Putzträger), steigt der Messwert sprunghaft an. Wegen der Tiefenwirkung eignet sich der Sensor deshalb auch zur Lokalisation von metallischen Gegenständen sowie zur Bewährungsortung.

Aufgrund des oben beschriebenen Zusammenhangs zwischen der Material-Rohdichte und der Dielektrizitätskonstanten bei Baustoffen kann es bei mehrschaligen Aufbauten und unterschiedlichen Materialdichten innerhalb der Boden- und Wandbereiche zu unterschiedlichen Anzeigewerten kommen. Um hieraus resultierende Fehlinterpretationen zu minimieren, **sollten deshalb Clustermessungen durchgeführt werden.**

Dabei werden im Umkreis von 20 cm mindestens fünf verschiedene Tiefenmessungen ausgeführt und von diesen Einzelergebnissen der Durchschnittswert gebildet. Dieser Wert bildet dann den Vergleichswert zu anderen Clustermessstellen.

Bei homogenen Materialien (Mauerwerke dicker als 30 cm) muss eine Clustermessung nicht zwingend vorgenommen werden. Zur genaueren Analyse empfiehlt sich jedoch auch hier eine Clustermessung. Dabei sind drei Messungen im Umkreis von 15 cm als Beurteilungsgrundlage im Allgemeinen ausreichend.

#### 4.5.4 *Kombinierter Einsatz von TS 300 SDI und TS 350 SDI in der Bauwerksdiagnostik*

Der kombinierte Einsatz von Oberflächen-Feuchtemesssensor TS 300 SDI und Tiefen-Feuchtemesssensor TS 350 SDI hat sich in der Praxis zur zerstörungsfreien Diagnose von Feuchteerscheinungen bewährt.

Insbesondere bei den Themenstellungen

- **Ursachenanalyse von Schimmelbildung durch Kondensatfeuchte in Wohngebäuden**
- **Aufsteigende Mauerwerksfeuchte**
- **Hygroskopische Feuchteerscheinungen durch Versalzungen**
- **Ortung von Undichtigkeiten und Leckagen**

lassen sich mit dem kombinierten Einsatz der Sensoren auch komplexe Zusammenhänge charakterisieren, eingrenzen und klassifizieren.

Der zentrale Ansatz dieser Methode liegt in der Möglichkeit der Feuchtemessung in verschiedenen Tiefen. Der Sensor TS 300 SDI erfasst die oberen 2 bis 4 cm des Baustoffes. Mit dem Tiefensensor TS 350 SDI werden die Volumen-Feuchtwerte bis zu 30 cm Tiefe gemessen. Hohe Feuchtwerte in oberflächennahen Bereichen bis 1 cm werden von diesem Sensor weniger berücksichtigt.

Werden beide Messverfahren nun kombiniert eingesetzt, vorzugsweise mittels Rastermessung, erhält man valide Aussagen über eine mehrdimensionale Feuchteverteilung. Dabei können die Messwerte der Sensoren in jeweils einer Tabelle eingetragen und miteinander verglichen werden. Anhand der Oberflächen- und Tiefenmesswerte können aussagefähige Ergebnisse erzielt werden.

Im Praxiseinsatz hat sich auch die Eingabe der Messwerte in ein **Tabellenkalkulationsprogramm** bewährt (siehe auch: [www.trotec.de](http://www.trotec.de) – Bereich eTraining). Nach Umwandlung der Zahlenwerte in eine Grafik ergeben sich visuell erkennbare Feuchteverteilungen der Oberflächen- sowie der Tiefenfeuchteverteilungen (siehe Abbildungen 46 bis 48).



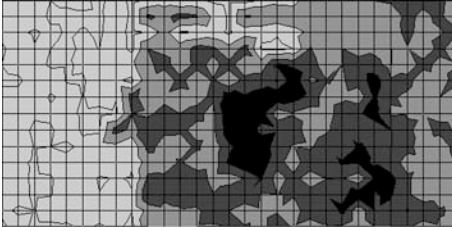


Abbildung 46a: Feuchteverteilung an der Oberfläche



Abbildung 47a:  
Die Oberflächenmessung zeigt niedrigere Feuchtwerte

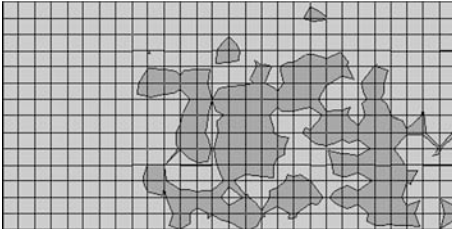


Abbildung 46b: Tiefefeuchteverteilung

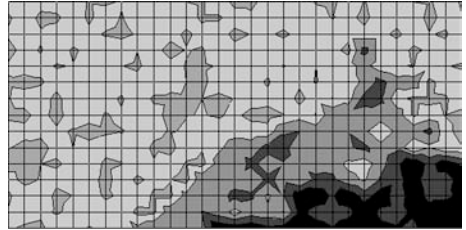


Abbildung 47b:  
Die Tiefefeuchtemessung zeigt höhere Werte

#### 4.5.4.1 Ursachenanalyse von Schimmelbildung durch Kondensatfeuchte

Die Problematik der Kondensatfechtebildung in Wohngebäuden lässt sich mit dem kombinierten Einsatz der beiden Sensoren meist einfach und sicher diagnostizieren. Kondensatfeuchte manifestiert sich in vielen Fällen in einem erhöhten Feuchtegehalt in oberflächennahen Bereichen, während tiefere Mauerwerksschichten trocken sind.

Ein Beispiel, wie ein solcher Sachverhalt visuell darstellbar ist, erkennt man in Abbildung 46. Während in Abbildung 46a oberflächlich starke Feuchteerscheinungen (dunkle Flächen) erkennbar sind, zeigt Abbildung 46b, dass das Gefüge im Inneren weitgehend trocken ist (helle Flächen). Wenn nun mittels raumklimatischer Messungen (relative Luftfeuchte, Raum- und Taupunkttemperatur) noch zusätzlich belegt werden kann, dass die Temperatur- und Luftverhältnisse in den betroffenen Bereichen die Ergebnisse der Messungen z. B. im Wandbereich bestätigen, ist die Ursache (falsches Lüftungsverhalten) eindeutig belegt.

##### **Praxistipp:**

Zur Langzeitmessung von Lufttemperatur- und Luftfeuchtwerten hat sich der Einsatz von Trotec Klima-Datenloggern bewährt.

Die Ursachen liegen zumeist in der zu geringen Luftzirkulation in Verbindung mit niedrigen Raumtemperaturen aufgrund unzureichender Beheizung.

Ergeben sich jedoch bei der Tiefenmessung mit dem TS 350 SDI ebenfalls erhöhte Feuchtwerte, können noch weitere Ursachen für einen Feuchteschaden (undichte Steigrohre, Dachrinnen, Fallrohre etc.) vorliegen.

#### 4.5.4.2 Aufsteigende Mauerwerksfeuchte / Hygroskopische Feuchteerscheinungen durch Versalzungen

Aufsteigende Feuchte lässt sich mit der kombinierten Anwendung der beiden Sensoren ebenfalls diagnostizieren.

Aufgrund der Rastermessung ist anhand der Feuchteprofile in Abbildung 47 erkennbar, dass es sich um aufsteigende Mauerwerksfeuchte handelt: Bei der Tiefefeuchtemessung (47b) wurden im Mauerwerk deutlich höhere Werte als bei der Oberflächenmessung (47a) festgestellt.

#### Hygroskopische Feuchteerscheinungen

Bei hygroskopischen Feuchteerscheinungen aufgrund von Versalzungen ergeben sich je nach Ursache zum Teil an-

dere Messergebnisse. Aufgrund der Unabhängigkeit des Mikrowellenverfahrens von Versalzungseinflüssen können jedoch auch diese Aufgabenstellungen analysiert werden.

Nach der Verdunstung der Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk verbleiben die Salze an der Oberfläche. In Verbindung mit einer erhöhten Raumluftfeuchte führt dies wiederum zu einer erneuten Feuchteanreicherung.

Diese hygroskopische Feuchte stellt sich nun entgegen den in Abbildung 47 dargestellten Messbildern genau umgekehrt dar. Während jetzt die höchsten Messwerte bei der Messung mit dem Oberflächensensor liegen, fallen die Feuchtwerte bei der Tiefenmessung deutlich niedriger aus.

Von der Kondensatfeuchte lässt sich die hygroskopische Feuchte durch die Analyse der klimatischen Parameter (Temperatur, relative Feuchte, Taupunkt etc.) sicher abgrenzen.

#### 4.5.4.3 Ortung von Undichtigkeiten und Leckagen

Bei der Ortung von Undichtigkeiten und Leckagen wird erst mit der Tiefenmessung begonnen. Auch hier ist die Rastermessung zur besseren Darstellung und zur Vermeidung von Fehlaussagen zu empfehlen.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass die Tiefenmessungen immer als Relativmessungen im Vergleich zu einer trockenen Fläche am gleichen Bauteil oder Baustoff durchgeführt werden.

Einzelne ‚Ausreißer‘ im Messwert sollten dabei nicht berücksichtigt werden, da diese auch durch metallische Gegenstände oder Inhomogenitäten im Materialaufbau bedingt sein können. Wird dies nicht beachtet, ist die Gefahr von Fehlinterpretationen groß.

Falls keine tabellarische oder grafische Auswertung vorgenommen wird, müssen bei der Ortung von Undichtigkeiten in mehrschichtigen Aufbauten (schwimmende Estriche, Ständerwände etc.) Clustermessungen durchgeführt werden.

Dabei werden im Umkreis von 20 cm mindestens 5 verschiedene Tiefenmessungen ausgeführt und von diesen

Einzelergebnissen der Durchschnittswert gebildet. Dieser Wert bildet dann den Vergleichswert zu anderen Cluster-Messstellen.

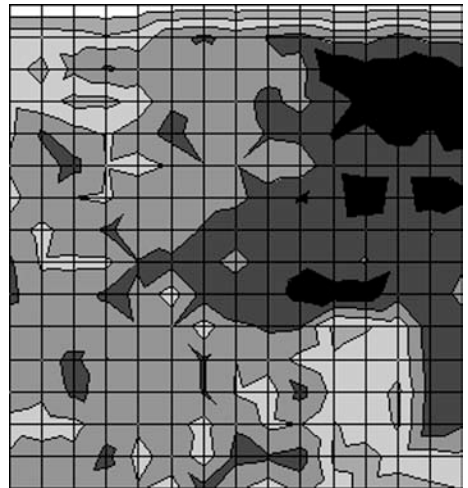
Bei homogenen Materialien (Mauerwerke dicker als 30 cm) muss eine Clustermessung nicht zwingend vorgenommen werden. Zur genaueren Analyse empfiehlt sich hier jedoch auch eine Clustermessung. Dabei sind drei Messungen im Umkreis von 15 cm als Beurteilungsgrundlage im Allgemeinen ausreichend.

Die Schadensursachen bzw. Schadstellen sind an Zonen mit stark erhöhten Feuchtwerten erkennbar (Abb. 48).

Durch Folgemessungen mit dem Oberflächen-Feuchtesensor kann nun auch ermittelt werden, ob auch der Estrich oder die Oberbeläge in Mitleidenschaft gezogen wurden.

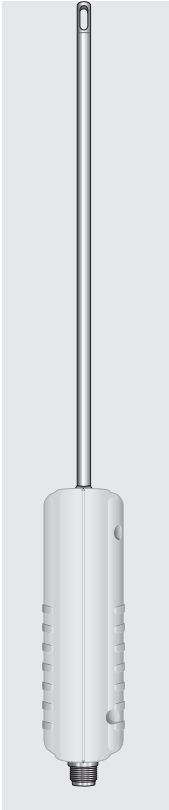
Undichtigkeiten und Leckagen können bei Einhaltung der oben aufgeführten Determinanten je nach Schadensart und -ausmaß ermittelt werden.

Jedoch wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass insbesondere die Suche nach Leckagen in Rohrleitungssystemen meist ein komplexes Messinstrumentarium voraussetzt und dass die Schadstellen oftmals nicht alleine mit dem Feuchtemessverfahren zu lokalisieren sind.



**Abbildung 48: Dunklere Zonen im Messbild kennzeichnen stark erhöhte Feuchtwerte.**

## 5. Messen der Strömungsgeschwindigkeit von Luft



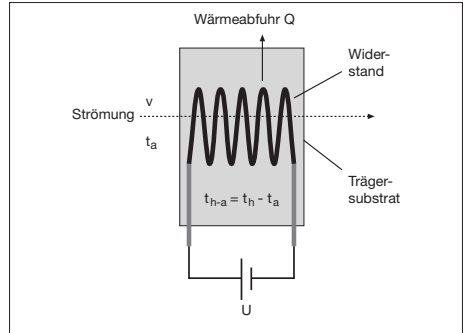
Beim Heißfilm-Anemometer (HFA, „Hot Film Anemometer“) wird ein elektrischer Widerstand auf eine definierte Temperatur erhitzt. Ein Luftstrom kühlt den Widerstand ab, bis sich ein Gleichgewicht zwischen der zugeführten und abgeführten Wärme einstellt.

Je größer die Geschwindigkeit des Luftstroms ist, desto stärker ist die Wärmeabfuhr. Der Einfluss der Umgebungstemperatur wird schaltungstechnisch kompensiert.

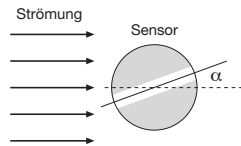
### Messprinzip TS 400 SDI

Der TS 400 SDI-Sensor ist ein CTA-Anemometer (CTA, „Constant-Temperature-Anemometer“). Bei diesem Typ wird der elektrische Widerstand so mit Leistung versorgt, dass die Temperatur des Widerstands konstant ist.

Die notwendige Leistung ist hierbei ein Maß für die Luftgeschwindigkeit. Mit dieser Methode lassen sich höhere Empfindlichkeiten erzielen.



### Einfluss der Richtungsabhängigkeit



Die richtige Ausrichtung des Sensorkopfes zur Ausströmung beeinflusst maßgeblich die Genauigkeit der Messung.

Der TS 400 SDI hat diesbezüglich eine relativ geringe Winkelabhängigkeit. In grober Näherung kann der Messfehler E in Abhängigkeit vom Anströmwinkel  $\alpha$  durch die Gleichung:

$$E [\%] = \alpha / 5 \quad (0 < \alpha < 25^\circ)$$

beschrieben werden. Beispiel: Ein Anströmwinkel von  $25^\circ$  ergibt einen Messfehler von ca.  $25 / 5 = 5 \%$

h / [m]	0	50	100	200	300	500	800	1.000	1.500	2.000	3.000	4.000	5.000
p [hPa = mbar]	1.013,25	1.006,94	1.000,67	988,25	975,98	951,9	916,88	894,26	840,11	789,24	696,56	614,76	542,57
Korrekturfaktor	1,000	1,006	1,013	1,025	1,038	1,064	1,105	1,133	1,206	1,284	1,455	1,648	1,868

Tabelle 19: Korrekturfaktor als Funktion der Orts-Höhe

### Einfluss des Luftdrucks

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem thermischen Anemometer ist abhängig vom vorherrschenden Luftdruck p. Der Sensor wird werksseitig auf Normaldruck  $p_0 = 1013,25$  mbar kalibriert. Für eine Geschwindigkeitsmessung auf der Meereshöhe h muss der Messwert mit der barometrischen Höhenformel korrigiert werden. In der

Praxis braucht man dazu nur den vom Sensor gemessenen Geschwindigkeitswert  $v_T$  mit einem Korrekturfaktor für die jeweilige Höhe h (aus Tabelle 19) multiplizieren. Der Korrekturfaktor ist der Quotient aus mittlerem Luftdruck (1013,25 hPa) und aktuellem Luftdruck, bezogen auf die Meereshöhe.

## 6. Kalibrierservice

Sie haben die Möglichkeit, Ihr Messgerät kalibrieren zu lassen und bei Problemen Kontakt aufzunehmen.

Eine Kalibrierung ist nur selten notwendig. Werden jedoch hohe Anforderungen an die Präzision von Messwerten gestellt, sollten die Sensoren im jährlichen Rhythmus kalibriert werden.

Grundsätzlich können Einpunktkalibrierungen selbst durchgeführt werden, wovon wir aber abraten, da professionelle Referenzwerte meistens nicht verfügbar sind.

Professionelle Kalibrierungen werden in einer zertifizierten DKD (Deutscher Kalibrier-Dienst) Kalibrierstelle angeboten. Dort werden die Sensoren nach DKD oder ISO

durch eine Einpunkt- und/oder Mehrpunktkalibrierung vorgenommen. Der Unterschied zwischen DKD- und ISO-Kalibrierung ist, dass bei der Kalibrierung nach DKD-Richtlinien jeder Prüfpunkt zweimal angefahren werden muss, bei ISO dagegen nur einmal.

Das DKD-Zertifikat bietet folgende Vorteile:

- internationale Gültigkeit
- verbindlich auch vor Gericht
- regelmäßige Überwachung des Kalibrierlabors
- Kalibrierung nach vorgegebenen Richtlinien

Nachfolgend ist eine Liste aufgeführt, in der die Messgrößen bzw. Kalibriergegenstände aufgeführt sind.

Messgröße bzw. Kalibriergegenstand	Messbereich	Messbedingungen	Messsicherheit	Bemerkungen
<b>Temperatur</b>				
Widerstandsthermometer	0,01 °C	Wassertripelpunkt	10 mK	Kalibrierung an Temperaturfixpunkten
	0,0 °C	Eispunkt	15 mK	
Widerstandsthermometer, direkt anzeigende Thermometer, mechanische Thermometer	-40 °C bis 200 °C	gerührte Flüssigkeitsbäder	30 mK	Vergleich mit Referenzthermometern in thermostatierten Bädern $U_{TH}$ ist der Unsicherheitsbeitrag vom Kalibriergegenstand
Thermoelemente	-40 °C bis 200 °C		0,2 K	
Elektrische Thermometer mit angeschlossener Auswertelektronik	-40 °C bis 200 °C		$U_{TH} + 0,05$ K	
Widerstandsthermometer, direkt anzeigende Thermometer, mechanische Thermometer	-40 °C bis 100 °C	Klimaprüfschrank	0,1 K	Vergleich mit Referenztaupunktspiegel im Klimaprüfschrank $U_{TH}$ ist der Unsicherheitsbeitrag vom Kalibriergegenstand
Thermo-Hygrographen	-40 °C bis 100 °C		0,5 K	
Elektrische Thermometer mit angeschlossener Auswertelektronik	-40 °C bis 100 °C		$U_{TH} + 0,05$ K	
<b>Taupunkttemperatur</b>				
Hygrometer mit direkter Erfassung der Temperatur	-18 °C bis 25 °C	Klimaprüfschrank	0,1 K	Vergleich mit Referenztaupunktspiegel im Klimaprüfschrank
<b>relative Feuchte</b>				
Hygrometer zur direkten Erfassung der relativen Feuchte	5 bis 30 %	Klimaprüfschrank Lufttemperatur 5 °C bis 95 °C	0,4 %	Vergleich mit Referenztaupunktspiegel im Klimaprüfschrank
	30 bis 60 %		0,6 %	
	60 bis 95 %		0,8 %	
Thermo-Hygrographen	5 bis 95 %	Klimaprüfschrank Lufttemperatur 5 °C bis 60 °C	1,5 %	
<b>Absolutdruck</b>				
mechanische und elektronische Barometer	700 mbar bis 1.200 mbar	Druckmedium: Gas	0,15 mbar	Vergleich mit Präzisionsdruckmesssystem

## 7. Seminare und Know-how für die Praxis

Ob Qualitäts- und Ausführungskontrolle, Bauwerksdiagnostik, Schadensanalyse, Gewährleistungsfragen, Gutachtenstellung, Wartungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen, in vielen Bereichen von Handwerk und Industrie führt am Einsatz zerstörungsfreier Messtechnik kein Weg vorbei, um ursächliche Zusammenhänge, mögliche Folgen und entsprechende Maßnahmen herleiten zu können.

Das T2000 ist für diese Aufgaben ein vielseitiges und effektives Hilfsmittel. Jedoch ist auch dieses Messgerät immer nur so gut, wie sein Anwender.

Optimieren Sie Ihr Know-how, aktualisieren Sie Ihre Kenntnisse und profitieren Sie von dem Wissen anerkannter Ex-

perten auf ihrem Gebiet – mit dem TROTEC® Seminar-Service. Im Rahmen unserer Messtechnik-Seminare erläutern wir an praxisnahen Fallbeispielen Vor- und Nachteile ausgewählter Messverfahren, die richtige Verfahrensauswahl und wertvolle Tipps zur zielsicheren Auswertung.

Mehr Infos zu unserem Seminarservice und unseren aktuellen Seminarakalender finden Sie im Internet unter [www.trotec.de](http://www.trotec.de). Bei Interesse können Sie sich dort direkt online anmelden!

Haben Sie Fragen zu unserem Seminarangebot? Wir beraten Sie auch gerne telefonisch unter +49 2452 962-333.

## 8. Schlusswort

Die im Praxis-Handbuch enthaltenen allgemeinen Angaben, Begriffsdefinitionen, Tabellen und zulässigen Grenzwerte wurden aus der Fachliteratur übernommen. Eine Gewähr für die Richtigkeit wird vom Hersteller des Gerätes nicht übernommen. Die Schlussfolgerungen der Messergebnisse unterliegt der Eigenverantwortung des Anwenders, da jegliche Messung von den Randbedingungen abhängig ist. Des Weiteren ändern sich im Laufe der Zeit die anerkannten Regeln der Technik, deren Kenntnis der Eigenverantwortung des Anwenders unterliegen.

## 9. Literatur

- [1] Kupfer, K.: Materialfeuchtemessungen: Grundlagen, Messverfahren, Applikationen, Normen; Expert-Verlag; Renningen-Malmsheim 1997
- [2] Weiß, S.; Ungerer, K.: Feuchtemessverfahren bei Gebäudeschäden; Lauth & Partner GmbH; Waiblingen 1995
- [3] Lohmann, U.: Holz-Handbuch, 5. Auflage; DRW-Verlag; Rosenheim 1998
- [4] Kühnen, R.; Wagenführ, R.: Werkstoffkunde Holz für Restauratoren; Seemann-Verlag; Leipzig 2002
- [5] Lutz, Jenisch, Klopfer, Freymuth, Krampf, Petzold: Lehrbuch der Bauphysik – Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima, 5. Auflage; Teubner-Verlag; Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden 2002
- [6] Schneider, K.-J.: Bautabellen für Ingenieure mit europäischen und nationalen Vorschriften, 12. Auflage; Werner-Verlag; Düsseldorf 1996
- [7] Frey, Herrmann, Krausewitz, Kuhn, Lillich, Nestle, Nutsch, Schulz, Traub, Waibel, Werner: Bautechnik – Fachkunde Bau, 10. Auflage; Verlag Europa-Lehrmittel; Haan-Gruiten 2003
- [8] Fischer, H.: Schadensanalyse und bauphysikalisches Messen – Einführung in die elektrische Messtechnik von Feuchte – Temperatur – Schall; Expert-Verlag; Ehningen 1993
- [9] William L. James: Electric moisture meters for wood. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-6. Madison, WI; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1988
- [10] Simpson, William T.: Resistance moisture meter correction factors for four tropical wood species Res. Note FPL-RN-0260. Madison, WI; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory; 1994
- [11] Cziesielski E.: Bauphysik-Kalender; Verlag Ernst & Sohn; Berlin 2004
- [12] Kohl A., Bastian, Neizel: Baufachkunde Teil 1 – Grundlagen, 17. Auflage; Teubner-Verlag; 1981
- [13] Kober A.; Plinke B.: Feuchtemessung an Holz, Holzwerkstoffen und Baustoffen – Eine Literaturübersicht; Fraunhofer-Arbeitsgruppe für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI); WKI-Bericht Nr. 21; Braunschweig 1989
- [14] Rieche, G.: Neue Wege der Feuchtemessung und Beurteilung von Estrichen und Betonen; Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004) Heft 10; Ernst & Sohn Verlag; Berlin 2004
- [15] Bluhm, Stefanie: Entwicklung und Untersuchung einer Methode für die hygrometrische Bestimmung der Feuchte in Zementestrichen; Diplomarbeit im Studiengang Bauphysik; Fachhochschule Stuttgart; 2002
- [16] Rieche, G.: Sachstandsbericht zur Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen (State of the art Report); Schriftenreihe Heft 74; 2002
- [17] ASTM International: Standard Test Method for Determining Relative Humidity in Concrete Floor Slabs Using in situ Probes; Designation F 2170-02; 2004
- [18] Raupach, M.; Dauberschmidt, C.; Harnisch, G.: Bestimmung des Wassergehaltes ausgewählter Baustoffe mit Hilfe von Widerstands- bzw. kapazitiven Messungen; IBAC Institut für Bauforschung, Aachen 2004
- [19] Zimmermann, G.; Jenisch, R.: Schadensfreies Bauen, Tauwasserschäden, Band 16, Fraunhofer IRB-Verlag, Stuttgart 1996

**TROTEC GmbH & Co. KG**

Grebbener Straße 7 · D-52525 Heinsberg

Tel. +49 2452 962-400 · Fax +49 2452 962-200

[www.trotec.de](http://www.trotec.de) · E-Mail: [info@trotec.de](mailto:info@trotec.de)

---

TRO-TR-HBT2000-06-D · Diese Veröffentlichung ersetzt alle vorhergehenden. Kein Teil dieser Veröffentlichung darf in irgendeiner Form ohne unsere schriftliche Genehmigung reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden. Technische Änderungen vorbehalten. Alle Rechte vorbehalten. Warennamen werden ohne Gewährleistung der freien Verwendbarkeit und im Wesentlichen der Schreibweise der Hersteller folgend benutzt. Die verwendeten Warennamen sind eingetragene und sollten als solche betrachtet werden. Konstruktionsveränderungen im Interesse einer laufenden Produktverbesserung sowie Form-/ Farbveränderungen bleiben vorbehalten. Lieferumfang kann von den Produktabbildungen abweichen. Die vorliegende Veröffentlichung wurde mit der gebotenen Sorgfalt erarbeitet. Wir übernehmen keinerlei Haftung für Fehler oder Auslassungen. © TROTEC®