

Meßtechnische Bestimmung des Gebäude-Ist-Zustandes

Weiterbildendes Studium Energie und Umwelt

WS 2001

.....
Dipl.-Ing. Monika Hall
FG Bauphysik
Universität Gh Kassel
.....

Inhaltsverzeichnis

1 Blower Door	1
1.1 Luftdichtheitsmessung	1
1.2 Grenzwerte	1
1.3 Anwendung	2
2 Thermographie	3
2.1 Grundlagen	3
2.2 Messung	4
2.3 Anwendung	5
3 Endoskopie	5
3.1 Anwendung	6
4 U-Wert Bestimmung	6
4.1 Methode "Dichte"	7
4.2 Methode "Temperatur-in situ" [1]	7
4.2.1 Infrarot-Temperaturmessgerät [1]	8
4.3 Methode "Wärmestrom-in situ"	11
4.3.1 Fehler durch instationäres Verhalten [1]	12
5 Laser-Entfernungsmessgerät [1]	17
6 Feuchte im Bauteil	19
6.1 Gravimetrie	19
6.2 Holzfeuchte in situ	19
6.3 Massivbau	19
6.4 Indirektes Verfahren	19
7 Natürlicher Luftwechsel	20
8 Meßfehler	20

1 Blower Door

Der Begriff *Blower Door* steht für ein Verfahren, mit dem die Gebäudehülle auf ihre Luftdichtheit untersucht wird. Das Blower Door-System besteht aus einem Ventilator, der mit Hilfe einer luftdichten Plane und einem flexiblen Rahmen in eine Außentür eingebaut wird. Dazu gehört eine Meß- und Steuereinheit, mit der die gewünschten Druckdifferenzen eingeregelt und die geförderten Volumenströme ermittelt werden können.

1.1 Luftdichtheitsmessung

Für die *Leckageortung* wird das Gebäude auf einen Unterdruck von 50 Pa zur Umgebung gebracht. Während diese Druckdifferenz konstant gehalten wird, wird das gesamte Gebäude auf Undichtheiten untersucht. Die Undichtheiten/Leckagen werden i.d.R. mit der Hand oder mit einem Anemometer aufgespürt. Die gefundenen Leckagen werden protokolliert und anhand dieses Protokolles sollten Nachbesserungen durchgeführt bzw. Überlegungen angestellt werden, wie in Zukunft diese Details luftdicht ausgeführt werden können.

Für die eigentliche Luftdichtheitsmessung wird das gesamte Gebäude auf verschiedene Druckdifferenzen zwischen Gebäude und Umgebung eingestellt und der entsprechend geförderte Volumenstrom bestimmt. Diese Prozedur wird als Über- und Unterdruckmessung durchgeführt. Üblicherweise wird eine $(\dot{V}, \Delta p)$ -Kennlinie zwischen 10 und 60 Pa aufgenommen. Für die Kennzeichnung der Luftdichtheit des Gebäudes wird in Deutschland hauptsächlich der n_{50} -Wert herangezogen. Diese Kenngröße beschreibt den Luftwechsel, d.h. das pro Zeiteinheit ausgetauschte Luftvolumen, bezogen auf das Luftvolumen des gemessenen Raumes bzw. Gebäudes, bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Raum- bzw. Gebäudeinneren und der Umgebung [2].

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{Geb.}} \quad [\text{h}^{-1}] \quad (1)$$

\dot{V}_{50} ist der gemittelte Volumenstrom [m^3/h] bei 50 Pa aus Über- und Unterdruckmessung und $V_{Geb.}$ [m^3] ist das lichte Luftvolumen des Gebäudes, welches bei der Messung untersucht wird.

1.2 Grenzwerte

Die zahlenmäßigen Anforderungen an die Dichtheit von Gebäuden sind in DIN 4108-7 [3] enthalten. Für Gebäude mit Fensterlüftung darf der Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz (n_{50} -Wert) den Wert von $3,0 \text{ h}^{-1}$ nicht überschreiten. Bei Gebäuden mit einer mechanisch betriebenen Lüftungsanlage beträgt der Grenzwert $\leq 1,5 \text{ h}^{-1}$.

Weitere Kenngrößen werden in [3] genannt

$$NBV_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_N} \quad [\text{m}^3/(\text{h m}^2)] \quad (2)$$

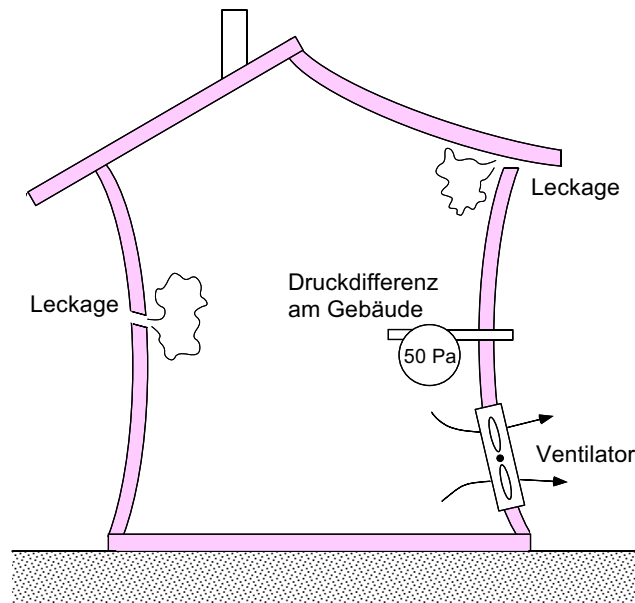


Bild 1: Schematische Darstellung einer Unterdruckmessung.

Tabelle 1: Kenngrößen der Luftdichtheit nach DIN 4108 Teil 7 [3].

Gebäude mit	n_{50} [h ⁻¹]	NBV ₅₀ [m ³ /(h m ²)]	q_{50} [m ³ /(h m ²)]
lüftungstechnischer Anlage	1,5	2,6	3,0
Fensterlüftung	3,0	7,8	3,0

$$q_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_E} \quad [\text{m}^3/(\text{h m}^2)] \quad (3)$$

Der NBV₅₀-Wert gibt das Verhältnis des gemittelten Volumenstroms bei 50 Pa bezogen auf die Netto-Grundfläche (A_N) des Gebäudes an. Diese Kenngröße kann bei Gebäuden oder Gebäudeteilen, deren lichte Geschoßhöhe 2,6 m oder weniger beträgt, alternativ zum n_{50} -Wert bestimmt werden. Der q_{50} -Wert kann zusätzlich herangezogen werden [3]. Er beschreibt das Verhältnis von gefördertem Volumenstrom zur Gebäudehüllfläche (A_E).

1.3 Anwendung

Luftdichtheitsmessungen verfolgen hauptsächlich zwei Ziele: Die Quantifizierung der Leckagen eines Gebäudes oder Gebäudebereiches sowie die Ortung von vorhandenen Leckagen. Die Quantifizierung der Gesamtleckage eines Gebäudes ist die Grundlage für die Überprüfung von Neubauten hinsichtlich der Einhaltung einer geforderten Luftdichtheit. Auch das Sanierungspotential im Gebäudebestand hinsichtlich der Luftdichtheit kann nur anhand einer Leckagequantifizierung abgeschätzt werden [4]. Daraus ergeben sich u.a folgende Anwendungsgebiete:

- Überprüfung der Luftdichtheit vom gesamten Gebäuden
- Untersuchungen bei Bauschäden, z.B. Feuchteschäden im Dachbereich
- Ortung von Leckagen
- Sanierungsmaßnahmen vorbereiten und ggf. getroffene Maßnahmen überprüfen
- Luftdichtheit von einzelnen Bauteilen oder Gebäudebereiche untersuchen
- Überprüfung von Lüftungsanlagen
- In Verbindung mit Thermographie, visuelle Dokumentation von Leckagen

2 Thermographie

Die Infrarot (IR)-Thermographie stellt derzeit das wohl wichtigste Verfahren zur Erfassung thermischer Schwachstellen von Gebäuden dar. Das Prinzip der Thermographie beruht darauf, daß jeder Körper aufgrund seiner Temperatur eine charakteristische elektromagnetische Strahlung – auch Temperatur- oder Wärmestrahlung genannt – abgibt (Gl. 4). Bei Umgebungstemperatur liegt diese Strahlung in dem für Menschen unsichtbaren, langwelligen Infrarot-Bereich (0,8 - 100 μm).

Bei dem Einsatz von IR-Meßsystemen muß der Einfluß der Atmosphäre berücksichtigt werden. Hauptsächlich Staub, CO_2 und H_2O in der Luft verursachen durch Absorption und Streuung eine Strahlungsämpfung. Selektive Strahlung überlagert zudem noch die Objektstrahlung. In bestimmten Wellenlängenbereichen (auch Bänder genannt) ist die Strahlungsämpfung der Atmosphäre sehr niedrig. Diese sogenannten *atmosphärischen Fenster* nutzt man in der Thermographie. Man unterscheidet:

- mittleres Infrarot mit einer Bandbreite von ca. 2 - 5 μm
- fernes Infrarot mit einer Bandbreite von ca. 8 - 12 μm

Man bezeichnet mittleres Infrarot auch als *kurzwellig* und fernes Infrarot als *langwellig*. Thermographiesysteme, die im kurzwelligen Bereich arbeiten, haben eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Sonneneinstrahlung. Im langwelligen Band betriebene Systeme sind anfälliger für Abstrahlung umliegender Objekte. Mögliche Fehlerquellen durch Umgebungseinflüsse werden bei modernen Kameras berücksichtigt bzw. durch Filter kompensiert.

2.1 Grundlagen

Für die thermographische Untersuchung ist das gleichartige Emissionsverhalten ϵ (Abstrahlungsverhalten) aller betrachteten Oberflächen Voraussetzung. Bei den meisten Baustoffen und auch bei Glas ist dies im hinreichenden Maße der Fall. Ausnahmen

Tabelle 2: Emissionsgrade einiger Materialien im Bereich langwelliger IR-Strahlung [5].

Material	$\epsilon[-]$
Eisen, blank	0,13
Aluminiumbronze	0,2-0,3
Eisen, stark verrostet	0,85
Papier	0,8-0,9
Wolken	0,9
Sand	0,9
Kalkstein	0,92
Mörtel, Putz	0,91-0,93
Dachpappe	0,93
Glas	0,94
Holz	0,94
Eis, Wasser	0,96-0,98

sind unlackierte, blanke Metalle, die einen wesentlich kleineren Emissionsgrad aufweisen.

Die gesamte Ausstrahlung eines *Schwarzen Körpers* in W/m^2 berechnet sich nach dem sogenannten *Stefan-Bolzmannschen Gesetz*

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad [W/(m^2)] \quad (4)$$

mit der Stefan Boltzmann Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^8 W/(m^2 K^4)$ und T der Oberflächentemperatur in [K]. In der Natur gibt es keine Schwarzen Körper, so daß das Stefan Boltzmann Gesetz so nicht angewendet werden kann. Reale Materialien geben immer nur einen bestimmten Teil der vom Stefan Boltzmann Gesetz genannten Strahlung ab. Dieser Teil wird durch den Emissionsgrad ϵ festgelegt [5].

$$q = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [W/(m^2)] \quad (5)$$

2.2 Messung

Moderne Kameras haben eine Temperaturlösung von etwa 0,1 K. Die Genauigkeit der ermittelten Oberflächentemperaturen hängt stark von den Randbedingungen der Messung und der Kenntnis der Emissionskoeffizienten der betrachteten Fläche ab. I.d.R. wird eine Genauigkeit von ca. 0,5 K erreicht. Voraussetzung für Thermographie im Bauwesen ist eine Mindesttemperaturdifferenz von 10 K zwischen Innen und Außen. Die Temperatur im Gebäude sollte gleichmäßig sein. Als Vorbereitung sollte das Gebäude mindestens 24 h vor den Aufnahmen gut beheizt werden. Aufgrund

der hohen Anforderung an die Temperaturdifferenz ist die Thermographie-Saison auf die Heizzeit beschränkt. Wegen der Störung durch direkte Sonnenstrahlung werden Thermographien i.d.R. in den frühen Morgenstunden durchgeführt.

- Hinterlüftete Außenwände können nicht thermographiert werden. Die Oberflächentemperatur ist in Folge der Hinterströmung "homogenisiert", d.h. es können keine hinter der Lüftungsebene vorhandenen konstruktiven Temperaturunterschiede ermittelt werden.
- Sollen Oberflächentemperaturen von Metallen und anderen Baustoffen verglichen werden, müssen die verschiedenen Emissionskoeffizienten beachtet werden.
- Die Interpretation von Thermogrammen setzt die detaillierte Kenntnis der Randbedingungen der Aufnahmen voraus.

2.3 Anwendung

Die Thermographie hat eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Bauwesen:

- Überprüfung wärmetechnischer Schwachstellen
- Abschätzung von Wärmedurchlaßwiderständen von Außenbauteilen
- Sichtbarmachung von Durchfeuchtung
- Sichtbarmachung von verdeckten Konstruktionen (z.B. verputztes Fachwerkhaus, Betonständer)
- Auffinden von Warmwasserleitungen bzw. Leckagen in Fußbodenheizungen
- In Verbindung mit Blower Door, Visualisierung von Leckagen (Stichwörter: Hinterströmung, Wärmebrücken)

Merkregel

Grundsätzlich muß jedes "bunte" Bild kritisch hinterfragt werden.

3 Endoskopie

Sind keine Pläne oder Zeichnungen von dem untersuchten Gebäude vorhanden, kann mit einem Endoskope die Konstruktion ermittelt werden. Dieses aus der Medizintechnik stammende Verfahren ermöglicht die visuelle Inspektion von Hohlräumen (Bild 2). Hierzu wird ein Loch in die Konstruktion gebohrt und das Endoskop nach und nach eingeführt. Anhand der gewonnenen Bilder kann die Konstruktion rekonstruiert bzw. die Bausubstanz begutachtet werden. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz sind z.B. den Bänden [6] und [7] zu entnehmen.

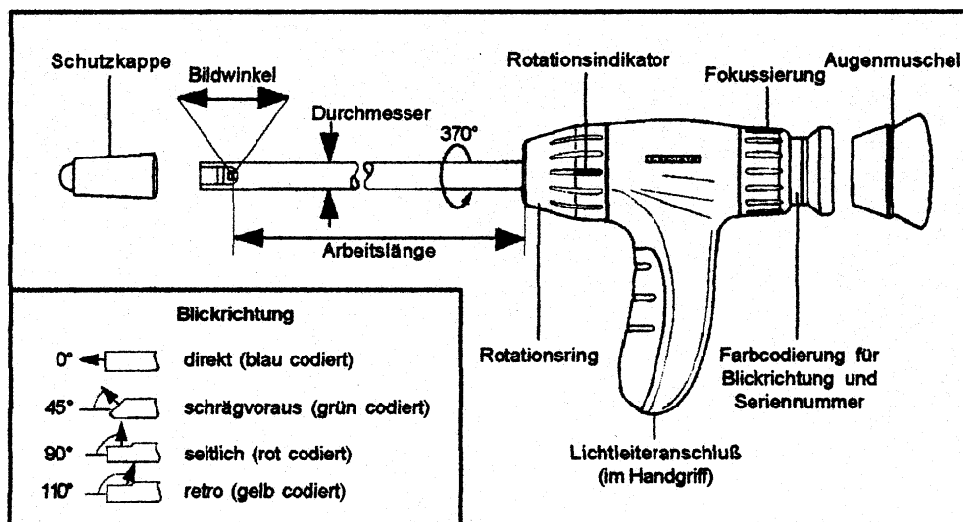


Bild 2: Endoskopie-Gerät der Firma Olympus Optical Co (Europa) GmbH, Hamburg.

3.1 Anwendung

Die Anwendungen eines Endoskops im Bauwesen sind z.B.

- Betrachtung des Konstruktionsaufbaus
- Untersuchung der Bausubstanz, z.B. Balkenköpfe
- Untersuchung von Schwachstellen in der Luftdichtheitsebene (Planungs- oder Ausführungsfehler?)

4 U-Wert Bestimmung

Bei der Sanierung von Gebäuden ist es i.d.R. notwendig, detaillierte Kenntnisse über die thermischen Eigenschaften von Außen- und Innenbauteilen zu haben. Nur gezielte Sanierungsmaßnahmen sind wirtschaftlich. Die Bewertung geplanter energetischer Sanierungsmaßnahmen der Gebäudehülle bedingt die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeiten der Außenbauteile. In DIN 4108 Teil 4 sind wärmetechnische Kenndaten einzelner Materialien tabelliert. Die Kenndaten neuer Materialien werden regelmäßig im Bundesanzeiger veröffentlicht. Kenndaten alter Materialien können aus verschiedenen Literaturstellen gewonnen werden. In zahlreichen Fällen kann aus dem Baualter und der Region, in der das Gebäude steht, in etwa auf den Aufbau des Außenbauteils geschlossen werden. Hilfreich ist z.B. die Broschüre "k-Werte alter Gebäude" [8, 9], sowie z.B. [10] und [11]. Sollten zu dem gewünschten Objekt keine Literaturdaten vorhanden sein, dann können verschiedene zerstörungsfreie Überprüfungswerkzeuge herangezogen werden.

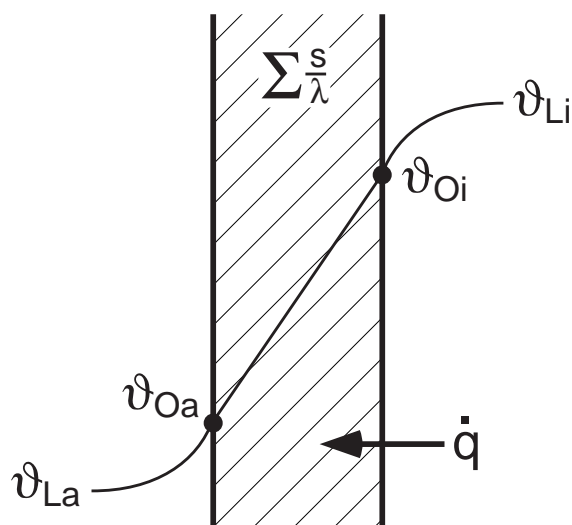


Bild 3: Wärmestrom und Temperaturen für die Betrachtung der Wärmeleitung durch eine Wand.

4.1 Methode "Dichte"

Eine preiswerte und recht einfache Lösung ist, daß der Außenwand ein Stein entnommen und die Masse des Steines durch wägen festgestellt wird. Anschließend wird ein Gefäß mit Eichstrichen mit Wasser gefüllt und der Stein in dieses Wasser getaucht. Die Volumenänderung durch Eintauchen des Steines notieren. Mit den Größen Masse und verdrängtes Volumen ist die Dichte des Steines in kg/m^3 bekannt. Mit dieser Dichte kann die Wärmeleitfähigkeit aus DIN 4108-4 entnommen oder aus einem Dichte-Wärmeleitfähigkeits-Diagramm abgeschätzt werden.

Soll der Wärmedurchgangskoeffizient anhand einer Rohdichtebestimmung erfolgen, ist zusätzlich zu der Rohdichte auch die Stoffgruppe des Baumaterials zu bestimmen. Die Wärmeleitfähigkeit kann sich zwischen zwei Stoffgruppen bei gleicher Rohdichte durchaus um bis zu 20% unterscheiden.

4.2 Methode "Temperatur-in situ" [1]

In Bild 3 ist für die Temperatur- und Wärmestrommethoden der allgemeine Ansatz skizziert. Die Auswertung beruht auf der Annahme eines stationären Temperaturprofils im Bauteil. Es gelten

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{s} (\vartheta_{Oi} - \vartheta_{Oa}) \quad (6)$$

$$\dot{q} = \alpha_i (\vartheta_{Li} - \vartheta_{Oi}) \quad (7)$$

und vereinfacht

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s_k}{\lambda_k} + \frac{1}{h_e}} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (8)$$

mit

- h_i, h_e = Wärmeübergangswiderstand innen bzw. aussen
- s_k = Schichtdicke der k-ten Schicht
- λ_k = Wärmeleitfähigkeit der k-ten Schicht.

Durch geeignete Umformung erhält man damit

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} \left(1 + \frac{\vartheta_{O_i} - \vartheta_{O_a}}{\vartheta_{L_i} - \vartheta_{O_i}} \right) + \frac{1}{h_e}} \quad (9)$$

also eine Bestimmungsgleichung für U die nur von den Wärmeübergangskoeffizienten h_i und h_e sowie drei relativ leicht meßbaren Temperaturen abhängt. Für den inneren bzw. äußeren Wärmeübergangskoeffizient wird jeweils der Norm-Wert eingesetzt. Bietet das zur Verfügung stehende Meßgerät die Funktion "Wärmestrom" an (siehe Abschnitt 4.2.1), kann der U-Wert alternativ über den Ansatz

$$U = \frac{\dot{q}}{\vartheta_{L_i} - \vartheta_{L_a}} \quad (10)$$

bestimmt werden.

4.2.1 Infrarot-Temperaturmessgerät [1]

Mit Infrarot-Temperaturmeßgeräten wird die von festen Körpern ausgehende Strahlungsenergie im infraroten Bereich (Wärmestrahlung) gemessen. Die Oberfläche des zu vermessenden Körpers darf keine Infrarotstrahlung reflektieren, die von anderen Körpern ausgesandt wird. Eine Messung an metallischen Oberflächen ist daher im allgemeinen nicht möglich. Sollen metallische Oberflächen gemessen werden, können diese mit einem schwarzen Papierstreifen beklebt werden. Mittels dieses "Tricks" ist es beispielsweise möglich, metallische Fensterrahmen oder Fassaden zu vermessen.

Je höher die Masse und damit die Wärmespeicherfähigkeit eines Bauteils ist, desto länger ist die Einstellzeit für das thermische Gleichgewicht. Für massearme Bauteile (z. B. Fenster) genügen einige Minuten, während sich in dicken Aussenwänden der Gleichgewichtszustand erst nach mehreren Stunden einstellt. Für die Messung besonders geeignet sind kalte, trübe Tage oder die Stunden vor Sonnenaufgang. Weiterhin ist darauf zu achten, dass sich innerhalb des Bauteils keine Wärmequellen oder -senken wie Heizungs- oder Kaltwasserrohre befinden. Sie würden das Messergebnis

sehr stark verfälschen. Auf der Innenseite des Bauteils darf bereits einige Zeit vor der Messung keine merkliche Luftbewegung mehr vorhanden sein. Auf keinen Fall darf in der Nähe von Heizlüftern oder Heizkörpern gemessen werden, da die von ihnen verursachte Strömung warmer Luft und die daraus resultierende Änderung der Oberflächentemperatur im überströmten Bereich die Messung ebenfalls stark verfälschen würde.

In Tabelle 3 ist ein Überblick über einige erhältliche Geräte gegeben. Bei der Zusammenstellung der Übersicht wurden nur einfache Geräte bis Max. ca. 1.500 DM berücksichtigt, die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit hinsichtlich der Hersteller bzw. Vertrieber entsprechender Geräte.

Angaben in Tabelle 3 zur Meßgenauigkeit sind den jeweiligen Hersteller- bzw. Vertrieberunterlagen entnommen. Die Angaben beziehen sich i.d.R. auf Messungen an Oberflächen mit einem Emissionsgrad ε von ungefähr eins.

Tabelle 3: Marktübersicht Infrarot-Temperaturmeßgeräte [1] (Stand 08.01.01).

Hersteller Modell	Ahlborn			Impac		Lin. Laborat. TherMonitor	Minolta / Land MINI LASER	OMEGA		Raytek Raynger MXP	Wessel TempTestr
	AMiR 7811-16	AMiR 7811-40	AMiR 7814-10	IN 14	IN 15			OS643E-LS	OS520L		
Meßbereich	-32 bis 540	-32 bis 540	-30 bis 900	-20 bis 500	-32 bis 900	0 bis 260	-30 bis 400	-20 bis 400	-18 bis 540	-30 bis 900	-18 bis 260
Spektr. Empf.	7-18	7-18	8-14	8-14	8-14	k.A.	8-14	k.A.	8-14	8-14	7-18
Emissionsgrad	0,95	einstellbar	einstellbar	einstellbar	k.A.	k.A.	einstellbar	einstellbar	einstellbar	einstellbar	0,95
Genauigkeit ¹⁾	±2%	±2%	±1%,1 K	±2%,2 K	±1%,1 K	±1% + 1 Digit	±2 K ± 1 Digit	±3%,3 K	±1%,1,6 K	±1%,1 K	±2%,3 K
Temp.-drift ²⁾	k.A.	k.A.	k.A.	0,03%/K	0,03%/K	k.A.	0,2 K / K	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Meßfeldgröße ³⁾	125/725	33/170	18/135	100/580	20/180	330/1670	30/230	k.A.	103/500	18/135	167/833
Funktionen:											
Min./Max.	nur Max.	ja	ja	ja	ja	-	-	-	ja	ja	-
Mittelwert	-	ja	-	ja	ja	-	-	-	ja	-	-
Wärmestrom	-	-	-	-	-	ja	-	-	-	-	-
Spannungsvers.	6 LR 61 (9V)	9 V	2 x AA	9 V	9 V	9 V	1 x AA	4 x AA	k.A.	2 x AA	9 V
Betriebsdauer	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	50	200	18	k.A.	k.A.	k.A.	12
Gewicht	270	270	480	270	340	420	195 + Batt.	k.A.	k.A.	480	227
Preis ca.	DM 480	850	1350	690	1300	1100	1200	290	600	1350	460

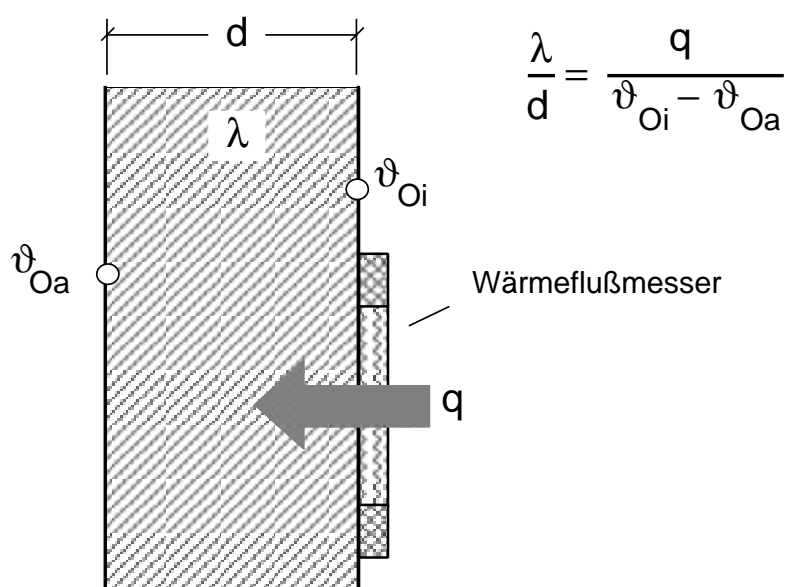
1) Bei mehreren alternativen Angaben zur Genauigkeit gilt für eine gemessene Temperatur der jeweils größere Wert.

2) bei von 23°C abweichender Geräte-Temperatur.

3) Durchmesser des Meßfeldes bei einem Objektstand von 1m/5m.

4.3 Methode "Wärmestrom-in situ"

Die einzige Methode insitu den Wärmedurchlaßwiderstand von Außenbauteilen zu bestimmen, wird in DIN EN 12494 [12] beschrieben. Das hierin beschriebene Verfahren führt zu sehr genauen Meßergebnissen mit einer Gesamtunsicherheit im Bereich von 5 bis 10 %. Danach ist eine längere Meßperiode notwendig, die wenigstens 48 Stunden beträgt. Dabei wird zwischen Datenanalysen mit dem Mittelwertverfahren oder mit einem Ermittlungsverfahren unterschieden (Bild 4). Der meßtechnische Aufwand ist relativ hoch. Die Meßmethodik wird beschränkt auf Bauteile mit einem Wärmedurchlaßwiderstand $\geq 0,5 \text{ m}^2\text{K/W}$, Konstruktionen, die homogen sind und bei denen weder ein Stofftransport in Form von Wasserdampf vorliegt, noch in Bauteilebene eine Durchströmung erfolgt.



	Prüfling	
Analysetechnik	leicht $m' \leq 5,56 \text{ Wh}/(\text{m}^2 \text{ K})$ $R \leq 1 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ Meßperiode: nur nachts	schwer Meßperiode: ganzzahliges Vielfaches von 24 h
Mittelwertverfahren	Ergebnisse aus 3 aufeinanderfolgenden Nächten weichen voneinander ab um $\leq \pm 2 \%$	Prüfdauer $\geq 72 \text{ h}$ 24 h - Differenz $\leq \pm 2 \%$
Ermittlungsverfahren	(meist 2 Nächte ausreichend) 1-Nacht-Differenz $\leq \pm 2 \%$	$\Delta Q_{\text{gespeichert}} < 2 \% Q_T$ Prüfdauer $\geq 48 \text{ h}$ Differenz aus 3 gleichen aufeinanderfolgenden Zeitspannen $\leq \pm 2 \%$

Bild 4: Bestimmung des U-Wertes insitu.

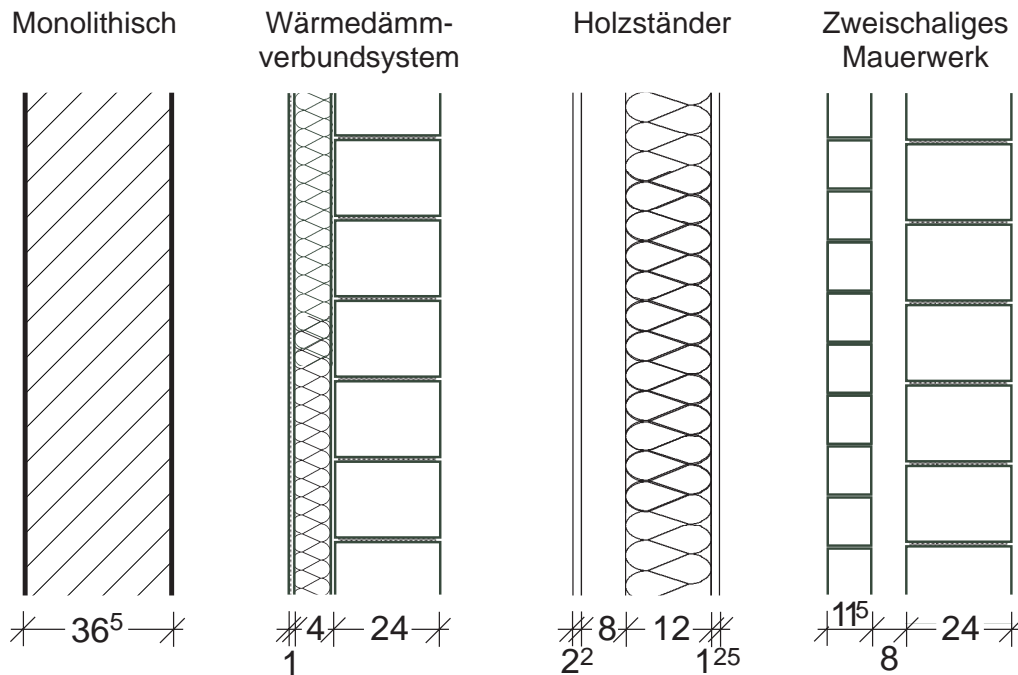


Bild 5: Wandaufbauten für die Untersuchung des Einflusses instationärer Temperaturprofile auf die Genauigkeit von einfachen Meßverfahren des Wärmedurchgangskoeffizienten.

4.3.1 Fehler durch instationäres Verhalten [1]

Für die in Bild 5 dargestellten Konstruktionen wird anhand von "rechnerischen Messungen" untersucht, welche Unsicherheit infolge instationärer Temperaturprofile in den Wandaufbauten bei der einfachen Messung des Wärmedurchgangs zu erwarten ist.

Wärmedurchgangskoeffizient über Temperaturen

Es werden drei Temperaturen ϑ_k mit den – auf die Meßtechnik zurückzuführenden – Einzelfehlern $\delta\vartheta_k$ ermittelt. D. h., die Unsicherheit im U-Wert ΔU kann durch einfache Fehlerfortpflanzung gemäß

$$\Delta U = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial U}{\partial \vartheta_k} \delta\vartheta_k \right)^2} \tag{11}$$

bestimmt werden. Hierbei ist stillschweigend angenommen worden, daß die gem. Gleichung 9 in die Auswertung eingehenden Wärmeübergangskoeffizienten tatsächlich vorliegen.

In Bild 6 sind für verschieden genaue Meßgeräte ($\delta\vartheta = 0,5$ bzw. 1 K) die bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten zu erwartenden relativen Unsicherheiten aufgetragen. Dabei ist für die äußere Oberflächentemperatur als Meßunsicherheit die Reproduzierbarkeit angesetzt ($\delta\text{Repro.} \approx 0,2 \delta\vartheta$).

Wärmedurchgangskoeffizient über den Wärmestrom

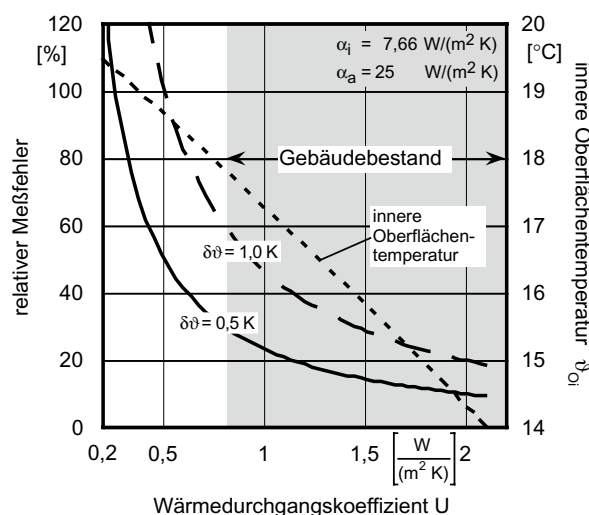


Bild 6: Meßunsicherheit infolge der Geräteungenauigkeit bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Temperaturmessungen (unter Annahme stationärer Bedingungen).

Bild 7 zeigt für U-Werte, die aus der Messung der Lufttemperaturen im Raum und in der Umgebung sowie der Messung des Wärmestroms den unter der Annahme stationärer Bedingungen zu erwartenden relativen Fehler. Dabei ist für den Wärmestrom \dot{q} die Meßunsicherheit zu $\delta\dot{q} = 0,01 \dot{q} + 1 W/(m^2 K)$ gesetzt (Herstellerangaben eines auf dem Markt erhältlichen Meßgerätes). Für die Meßunsicherheit der Lufttemperatur außen wird angenommen, daß sie in etwa der Reproduzierbarkeit des Meßgerätes entspricht.

Der Vergleich von Bild 6 und 7 zeigt sofort, daß die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten über den Wärmestrom und die Lufttemperaturen im stationären Fall eine wesentlich geringere Meßunsicherheit aufweist.

Neben der o.a. Meßunsicherheit infolge der Geräteungenauigkeit muß auch die mögliche Ungenauigkeit einer solchen Messung durch ein nicht-stationäres Temperaturprofil im Wandquerschnitt infolge von Temperaturschwankungen innen und insbesondere in der Umgebung sowie durch Strahlungseinflüsse betrachtet werden. In Bild 8 ist für einen monolithischen Wandaufbau sowie eine Holzständerwand gem. Bild 5 dargestellt, wie die Genauigkeit "rechnerischer Messungen" von der mittleren Umgebungstemperatur der letzten acht Stunden vor der Messung abhängt. Dabei ist eine konstante Temperatur im inneren ($20^\circ C$) sowie eine Standardabweichung des Mittelwertes der Umgebungstemperatur kleiner 2 K vorausgesetzt. Strahlung wird nicht berücksichtigt. Dies entspricht einer Messung z.B. einer nach Norden ausgerichteten Wand nach acht Stunden mit nur geringen Schwankungen der Lufttemperatur, beispielsweise an einem trübem Wintertag. Bild 9 gibt diesen Zusammenhang für die betrachteten Konstruktionen mit Wärmedämmverbundsystem bzw. Vormauerschale wieder.

Es ist den Bildern 8 und 9 leicht zu entnehmen, daß die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von der hier beschriebenen Methode bei massiven Konstruktionen in aller Regel mit einer Meßunsicherheit von deutlich über 20% behaftet ist. Demgegenüber kann die Methode bei leichten Konstruktionen durchaus

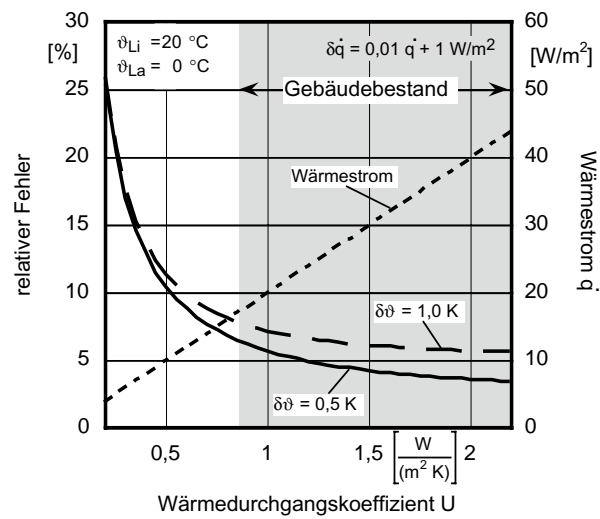


Bild 7: Meßunsicherheit infolge der Geräteungenauigkeit bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Messungen der Lufttemperaturen innen und außen sowie des Wärmestroms (unter Annahme stationärer Bedingungen).

zufriedenstellende Meßergebnisse bringen.

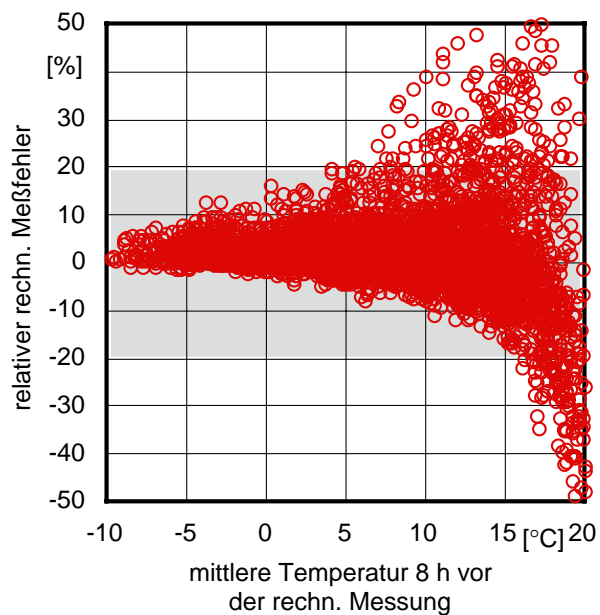
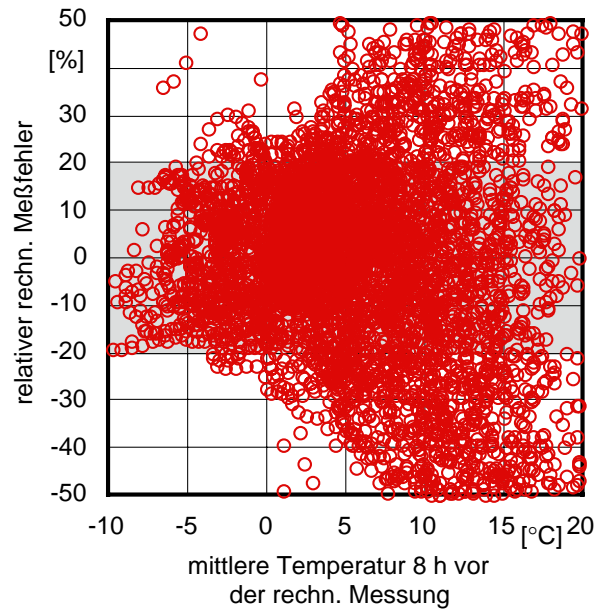


Bild 8: Meßunsicherheit infolge instationärer Bedingungen. Dargestellt ist die bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Messungen der Lufttemperaturen innen und außen sowie des Wärmestroms rechnerisch ermittelte Meßunsicherheit. Oben der monolithische Wandaufbau, unten die betrachtete Holzständerwand.

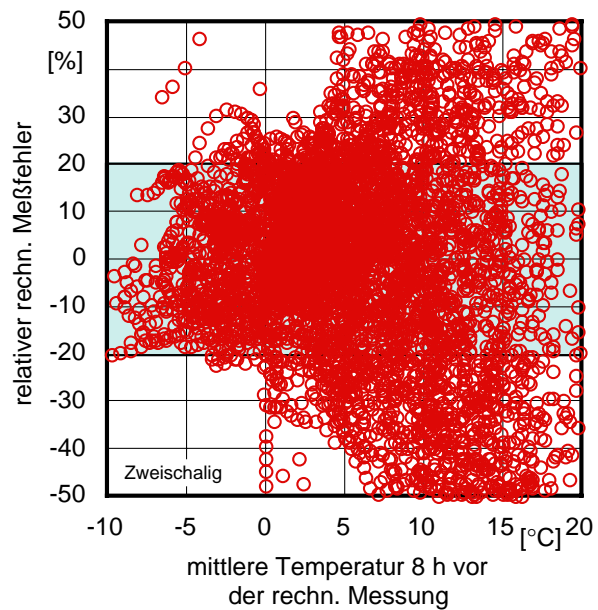
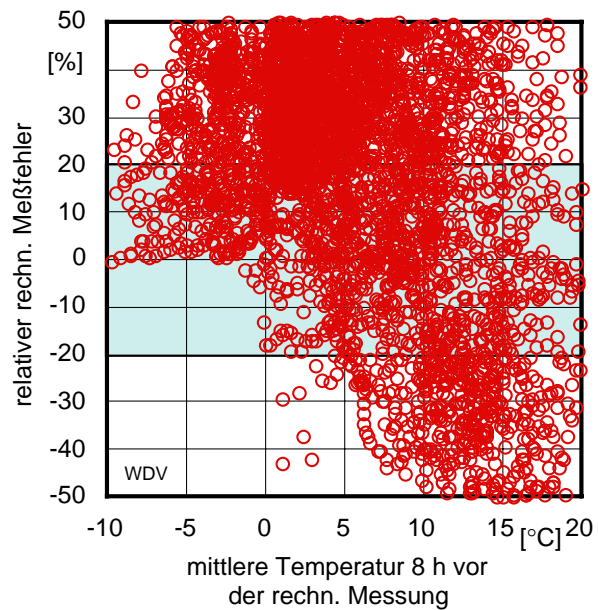


Bild 9: Meßunsicherheit infolge instationärer Bedingungen. Dargestellt ist die bei der Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten anhand von Messungen der Lufttemperaturen innen und außen sowie des Wärmestroms rechnerisch ermittelte Meßunsicherheit. Oben der Wandaufbau mit Wärmedämmverbundsystem, unten die betrachtete zweischalige Wand.

5 Laser-Entfernungsmessgerät [1]

Laser-Entfernungsmessgeräte ermöglichen es, Längenmessungen schnell und bequem durchzuführen.

Mit einem sichtbaren roten Laserpunkt wird der Messort angezielt. Durch einen Knopfdruck wird die Streckenlänge zwischen dem Laser-Entfernungsmessgerät und dem Punkt in Sekundenbruchteilen gemessen und digital angezeigt. Der Messbereich handelsüblicher Geräte liegt zwischen 0,30 m bis ca. 100 m. Zum Messen ist im Allgemeinen kein zweiter Helfer nötig.

Ausser der Streckenmessung haben derartige Ger ät häufig weitere praktische Funktionen wie

- Höhe (Breite) aus 3 Messungen
- Detailmaß aus Fassade, z.B. Stockwerkshöhe
- Dauermessung, Minimumwert (zum rechtwinkligen Messen) Höhe (Breite) aus 2 Messungen
- Mittelwert aus mehreren Messungen (höhere Übertragungsgenauigkeit) Dauermessung, Maximalwert (zum Messen einer Raumdiagonalen).
- Gruppenbildung innerhalb des zur Verfügung stehenden Speichers.

Ein Laser-Handmessgerät sollte mehrere Messwerte speichern können und über eine Schnittstelle zu einem PC verfügen. In Tabelle 4 ist ein Überblick über erhältliche Geräte, deren Funktionsumfang und Anschaffungskosten gegeben. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 4: Marktübersicht Laser-Entfernungsmessgeräte [1] (Stand 08.01.01).

Hersteller Modell	Bosch		geo-Fennel		Hilti		Jenoptik		Leica		RoboToolz		Sokkia	
	DUS 20 ¹⁾	DLE 30 PLUS	DMP ^{1),2)}	DMP ^{1),2)}	PD 20	PD 25	LEM 30	Disto Classic	Disto Memo	Disto Pro	RopoTape	MM30	MM30R	
Meßbereich von bis (reflektorlos)	0,6 m	0,3 m	0,5 18	0,3 ca. 50	0,3 ca. 50	0,3 ca. 50	0,2 30	0,3 30	0,3 30	0,3 30	90	0,2 30	0,2 30	
bis (mit Reflektorf.)	–	max. 30 ³⁾ k.A.	–	100	100	100	100	100	100	100	–	100	100	
Auflösung	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	1	1	1	k.A.	1	1	
Genauigkeit	±0,5%	±3	±0,5%	±3	±3	±3	±3	±3 - 5	±3 - 5	±1,5 - 2	±3	> ±3 ⁴⁾	> ±3 ⁴⁾	
Meßzeit	k.A.	typ. <0,5 max. 4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	<1	0,5 - 4	0,5 - 4	0,5 - 4	k.A.	1	1	
Speicher (Meßwerte)	6	–	–	–	–	1000	100	20	1000	1000	1000	–	–	
Schnittstelle	–	–	–	–	–	RS 232	RS 232	–	RS 232	RS 232	–	–	–	
Funktionen	–	Pythagoras, Flächen, Dauer	Rechner	Pythagoras, +, -, *	Pythagoras, +, -, *	Pythagoras, +, -, *	Pythagoras, Flächen, Volumen, Min, Max, Selbstaust.	Pythagoras, Flächen, Volumen, Selbstaust.	Min, Max, Flächen, Volumen, Selbstaust.	Pythagoras, Flächen, Volumen, Min, Max, Gruppen, Selbstaust.	Pythagoras, Flächen, Volumen, Min, Max, Gruppen,	Flächen, Volumen	Flächen, Volumen	
Stromversorgung	4 x AA	4 x AA	4 x AA	2 x AA	2 x AA	2 x AA	4 x AA	4 x AA	4 x AA	4 x AA	5 x AA	NiCd-Ak.	NiCd-Ak.	
Betriebsd. (Mess.)	k.A.	k.A.	k.A.	4000	4000	4000	5000	>3000	k.A.	k.A.	2000	850	850	
Gewicht	k.A.	480	170	k.A.	k.A.	k.A.	360	360	670	670	k.A.	580	580	
Preis (Liste) ca.	DM 100	900	270	1600	1100	1600	1350	995	1700	2000	1300	1400	1850	

¹⁾ Ultraschall-Entfernungsmessgerät

²⁾ "Dimension Master Plus"

³⁾ innen, außen bewölkt mind. 15 m, außen sonnig mind. 6 m

⁴⁾ ±3 + 50 ppm der gemessenen Distanz [mm]

6 Feuchte im Bauteil

6.1 Gravimetrie

Für die Gravimetrie wird eine Probe des Materials entnommen, gewogen und bei 105°C, 70°C oder 40°C je nach Material [13] bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend wird sie wieder gewogen. Die Einheit der Materialfeuchte φ ist [%].

$$\varphi = \frac{\text{Gewichtsverlust}}{\text{Trockengewicht}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (12)$$

6.2 Holzfeuchte in situ

Holzfeuchte kann nach dem Verfahren der elektrischen Widerstands- bzw. Leitfähigkeitsmessung bestimmt werden. Dieses Verfahren beruht darauf, daß der elektr. Widerstand stark von der jeweiligen Holzfeuchte abhängt. Die Leitfähigkeit von darr trockenem Holz ist sehr gering bzw. der Widerstand ist so groß, daß kein nennenswerter Strom fließen kann. Je mehr Wasser vorhanden ist, desto leitfähiger wird das Holz bzw. um so geringer wird der elektr. Widerstand.

6.3 Massivbau

Bohrmehlmethode

Mit einem Spiralbohrer wird ein Loch in das zu untersuchende Bauteil gebohrt und das Bohrmehl aufgefangen und luftdicht verpackt → Gravimetrie.

Bohrkernmethode

Es wird mit einer Bohrkrone ein Kern aus dem zu untersuchende Bauteil gebohrt, luftdicht verpackt → Gravimetrie.

Problematisch ist bei beiden Methoden die Hitzeentwicklung beim Bohren, die zur Trocknung der Probe führen. In beiden Fällen kann die bestimmte Materialfeuchte deutlich beeinflußt sein.

6.4 Indirektes Verfahren

Bei dem indirekten Verfahren zur Bestimmung der Bauteilfeuchte wird die Feuchte eines anderen Stoffes gemessen und über die Gleichgewichtsfeuchte die Feuchte des Bauteiles bestimmt. Üblicher Weise wird die Luftfeuchtigkeit, der bauteilberührenden Luft bestimmt und über die entsprechende Sorptionsisotherme die Bauteilfeuchte bestimmt.

7 Natürlicher Luftwechsel

Der Luftwechsel unter natürlichen Randbedingungen (Fugen, Leckagen, Meteorologie, Topographie) wird mit der Tracergas-Methode bestimmt. Eine bestimmte Menge Indikatorgas wird in einen Raum eingebracht und mit der Raumluft intensiv vermischt, so daß eine homogene Durchmischung gewährleistet ist. Die Konzentration wird gemessen. Durch von außen oder aus anderen Gebäudebereichen in den Meßraum eindringende Luft und Abtransport des Luft-Tracergas-Gemisches erfolgt ein Konzentrationsabfall, der in Form von Konzentrations-Zeit-Meßwertpaaren (c,t) aufgezeichnet wird. Aus dem Konzentration-Zeit-Verlauf läßt sich der Luftwechsel [h^{-1}] im Raum berechnen. Als Tracergas kommen N_2O oder SF_6 in Einsatz.

Der Hauptnachteil der Ermittlung des Luftwechsels über die Tracergas-Methode liegt darin, daß aus der Einzelmessung keine allgemein gültige Aussage über den Luftwechsel in einem Gebäude oder Gebäudeteil gemacht werden kann, da das Ergebnis zu stark von den sich verändernden und nicht vorausberechenbaren Randbedingungen abhängt, wie u.a. Windrichtung und -geschwindigkeit, Innenraum- und Umgebungstemperatur [?].

8 Meßfehler

Der Gesamtfehler einer Messung setzt sich i.a. aus *vermeidbaren*, *systematischen* und *zufälligen* Fehlern zusammen. Vermeidbare Fehler werden durch die Fehlerrechnung nicht behandelt. Der systematische Fehler beinhaltet unvollkommene Meßgeräte, zufällige Fehler werden z.B. durch nicht erkennbare und nicht beeinflussbare Änderungen von Meßgeräten und Umwelteinflüsse verursacht und schwanken bei wiederholten Messungen unter gleichen Bedingungen unregelmäßig in ihrer Größe und im Vorzeichen [15].

Der Gesamtfehler einer Messung setzt sich aus allen Einzelfehlern zusammen. Hierbei ist es wichtig, zwischen voneinander abhängigen und unabhängigen eingehenden Größen und Fehlern zu unterscheiden.

Für eine Messung mit n unabhängigen Meßgrößen x_1, x_2, \dots, x_n mit den systematischen und/oder zufälligen Fehlern δx_i der Meßgrößen x_i wird für die gesuchte abhängige Größe

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (13)$$

der Fehler zu

$$\Delta y = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (14)$$

wenn die Fehler unabhängig sind und den Charakter einer Stichprobe haben ('random').

Der *maximale* Fehler ergibt sich immer zu [15].

$$\Delta y_{max} \leq \sum \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \delta x_i \quad (15)$$

Die Bestimmung der Einzelfehler δx_i ist hierbei häufig nicht eindeutig bzw. vollständig möglich. Für Meßgeräte wird die Herstellerangabe zu Linearität und Reproduzierbarkeit herangezogen. Vielfach werden für einen Meßpunkt w N Einzelwerte w_1, w_2, \dots, w_N aufgenommen, die um den tatsächlichen Wert W streuen. Unter der Annahme einer Gauß'schen Verteilung kann für den Meßpunkt dann der Mittelwert \bar{w} der N Einzelwerte als beste Schätzung für W und für den anzunehmenden Fehler die Standardabweichung des Mittelwertes $\sigma_{\bar{w}}$ angesetzt werden [15].

$$\bar{w} = \frac{\sum_N w_i}{N} \quad \sigma_w = \sqrt{\frac{\sum (w_i - \bar{w})^2}{N - 1}} \quad \sigma_{\bar{w}} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{N}} \quad (16)$$

Literatur

- [1] Geißler, A. *Leitfaden für die Vor-Ort-Beratung bei Sanierung*. Zwischenbericht, AZ: Z6-5.4.00-11/II 13-800100-11, Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Fachgebiet Bauphysik der Universität Gh Kassel, Dezember 2000.
- [2] Hauser, G. und Geißler, A. *Kenngößen zur Beschreibung der Luftdichtheit von Gebäuden*. wksb (Sonderausgabe Dezember 1995).
- [3] *DIN 4108 "Wärmeschutz im Hochbau", Teil 7 "Luftdichtheit von Gebäuden", Schlußentwurf*, Februar 2001.
- [4] Geißler, K. J. *Meßergebnisse zur Luftdichtheit von Gebäuden und theoretische Ermittlung der in der Praxis erreichbaren Meßgenauigkeit*. Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, 1998.
- [5] Häckel, H. *Meteorologie*. Eugen Ulmer Stuttgart, 4. völlig überarb. Auflage, 1999.
- [6] Ahnert, R. und Krause, K. H., Edn. *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz – Gründungen, Wände, Decken, Dachtragwerke – Band 1*, 5. Auflage Ed. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1996.
- [7] Ahnert, R. und Krause, K. H., Edn. *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz – Stützen, Treppen, Bogen, Balkone und Erker, Fußböden, Dachdeckungen – Band 2*, 3. Auflage Ed. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1996.
- [8] Zapke, W. und Ebert, H., Edn. *k-Werte alter Bauteile - Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmetechnischer Berechnungen bei der Modernisierung*, heft 22 Ed. Schriftenreihe der RG-Bau Rationalisierungs-Gesellschaft "Bauwesen", 1983.
- [9] Böhmer, H. *k-Werte alter Bauteile – Arbeitsunterlagen zur Rationalisierung wärmetechnischer Berechnungen bei der Modernisierung*. Schriftenreihe der RG-Bau Rationalisierungs-Gesellschaft "Bauwesen", 1999. 3. völlig überarbeitete Auflage.
- [10] Hauser, G., Höttges, K., Stiegel, H. und Otto, F. *Energieeinsparung im Gebäudebestand – Bauliche und anlagentechnische Lösungen*. Gesellschaft für Rationelle Energieverwendung e.V., Januar 2001.
- [11] Eicke-Hennig, W. *Die Heizenergie-Einsparmöglichkeiten durch Verbesserung des Wärmeschutzes typischer hessischer Wohngebäude*. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 1997.
- [12] *DIN EN 12494 – Vor-Ort-Messung des Wärmedurchlaßwiderstandes von Oberfläche zu Oberfläche*, Entwurf, November 1996.
- [13] *DIN EN 12570 Baustoffe – Bestimmung des Feuchtegehaltes durch Trocknen bei erhöhter Temperatur*, August 1996.

- [14] Maas, A. *Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung*. Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, 1995.
- [15] Taylor, J. *An Introduction to Error Analysis – The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2 Ed. University Science Books, Sausalito, California, 1997.