

k-Wert-Messung an Aussenwänden (Wärmeflussmessungen)

P. Szabo

Professor für Bauphysik, Fachhochschule Dortmund

1. Einleitung.

Im Mittelpunkt der baulichen Wärmeschutzmassnahmen steht die Einschränkung des Transmissionsverbrauches durch die thermische Optimierung der Gebäudehülle. Diese Optimierung erfolgt in erster Linie durch die Verminderung des Wärmedurchganges der Aussenbauteile mittels effektivere Wärmedämmung. Deshalb gewinnt der Kennwert des Wärmedurchganges, der k-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) in den Wärmeschutzregelungen eine besondere Bedeutung.

Die Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Werte) werden für die bauliche Planung mit den Rechenwerten der Wärmeleitfähigkeit (λ -Wert) der Baustoffe berechnet. Diese Rechenwerte wurden nach umfangreichen Untersuchungen aus Labor-Messwerten ermittelt und mit Berücksichtigung der bauüblichen Feuchtigkeit und der Streuung der Materialeigenschaften festgelegt.

Das Problem der Ueberprüfung der so errechneten Wärmedurchgangskoeffizienten durch Messung am Bauobjekt ist gegeben.

Die Messung des k-Wertes wird im bauphysikalischen Laboratorium mit verschiedenen Methoden praktiziert. Für alle diese Methoden ist charakteristisch, dass für die Messung in den Prüfständen stationäre Klimabedingungen hergestellt werden.

Die Prüfung des k-Wertes durch Messung am erstellten Bauwerk muss dagegen unter instationären Verhältnissen erfolgen, weshalb hier die Parameter zahlreicher und komplizierter sind. Damit ist eine messtechnische Kontrolle der thermischen Dimensionierung einer Aussenkonstruktion mit erheblichen Problemen verbunden.

Im nachfolgenden Referat werden aufgrund eigener Untersuchungen die Grenzen und die Regel der Anwendung der k-Wert-Messung am Bau dargestellt. Auf die grundsätzliche Fragen der Messmethode wird nur so weit eingegangen, wie das Verständnis der Problematik es verlangt.

2. Problemstellung.

Die vorliegende Untersuchung sollte die Frage beantworten, ob die Wärmeflussmessung für die Kontrolle der thermischen Auslegung am Bauobjekt eingesetzt werden kann. Sie sollte die Grenzen, Einflüsse, Fehlerquellen konkretisieren und auch quantifizieren.

Die Kriterien einer am Bauobjekt praktikablen Prüfmethode können wie folgt definiert werden:

a. Grundbedingung:

gute, mit Labormessungen vergleichbare Messgenauigkeit (inkl. der Reproduzierbarkeit der Messwerte in annehmbaren Toleranzen).

b. Apparative Bedingungen:

- möglichst kleiner apparativer Aufwand,
- einfache, leicht überschaubare und damit gut kontrollierbare Messanordnung,
- einfache Bedienung der Geräte,
- einfache und möglichst rasche Auswertung der gemessenen Daten,
- Mobilität.

c. Bedingungen der Praktikizierbarkeit:

- zerstörungsfreie Messung,
- möglichst geringe Beeinträchtigung der Nutzung des Objektes während der Messung,
- angemessener Kostenaufwand (niedrig).

Werden diese Kriterien weitgehend erfüllt, so eignet sich die Prüfmethode für Routinekontrollen der Qualität der Gebäudeteile bzw. der Einhaltung der Normwerte. Muss man im Bereich der apparativen Bedingungen und der Praktikizierbarkeit grössere Kompromisse eingehen, so wird man auf die Routineanwendung der Messung verzichten müssen.

3. Messmethode (zusammenfassende Grundlagendarstellung).

Die durch eine Konstruktionsfläche transportierte Wärmemenge ist proportional zum Wärmedurchlasskoeffizienten, der mittleren Temperaturdifferenz der Oppositseiten, der Grösse der Fläche und der Zeit unter stationären Verhältnissen. Dieser Zusammenhang hat auch bei instationären Verhältnissen Gültig-

keit, wenn die Integrationsperiode (die Zeit) genügend lang ist. Der Wärmedurchlasskoeffizient bzw. der daraus abgeleitete Wärmedurchlasswiderstand ist je nach verwendetem Baustoff, Aufbau und Qualität der Konstruktion eine variable Grösse.

$$Q_{\text{tot}} = \lambda \cdot A \cdot \Delta \bar{T} \cdot \Delta t \quad \text{in Wh}$$

λ Wärmedurchlasskoeffizient in $\text{W/m}^2\text{K}$

A Fläche in m^2

$\Delta \bar{T}$ mittlere Temperaturdifferenz in K

Δt Messzeit (Integrationsperiode) in h

$$\text{weil} \quad \frac{Q_{\text{tot}}}{A \cdot \Delta t} = q \quad (\text{Wärmestromdichte})$$

$$R_w = \frac{1}{\lambda} = \frac{\Delta \bar{T}}{q} \quad (\text{Wärmedurchlasswiderstand})$$

Durch die Messung wird in der Regel die mittlere Wärmestromdichte bestimmt und daraus der Wärmedurchlasskoeffizient bzw. der Wärmedurchlasswiderstand ermittelt.

Die Messung kann grundsätzlich mit zwei Methoden erfolgen:

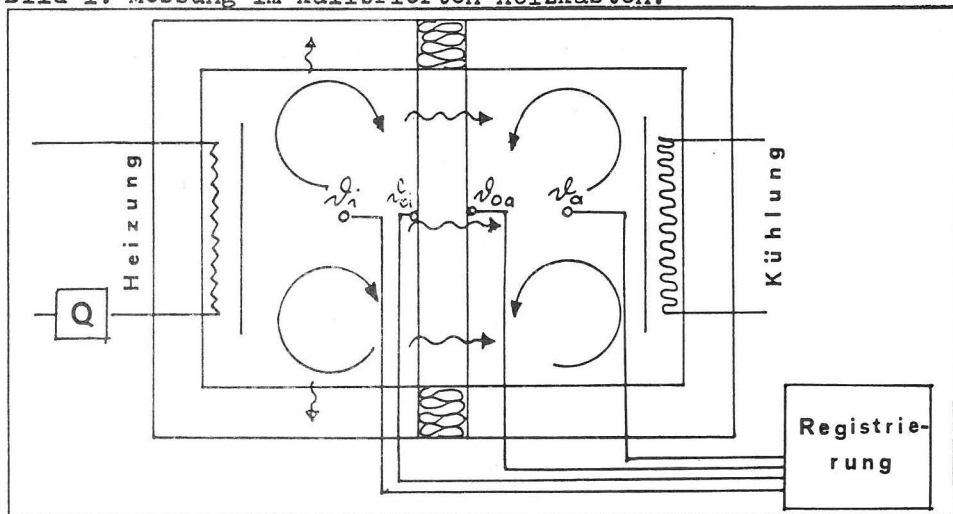
- direkte Messung der Energiemenge, die bei einem durchschnittlichen und gleichgerichteten Temperaturgefälle durch einen bestimmten Abschnitt der Konstruktion transportiert wird (Heizenergiemessung),
- indirekte Erfassung der Wärmestromdichte durch die messung der Intensität des Wärmeflusses unter Berücksichtigung der Temperaturverhältnisse (Wärmeflussmessung).

Beide Methoden haben mehrere Ausführungsvarianten ohne Aenderung der methodischen Prinzipien.

Bei der Heizenergiemessung (die klassische Form der k-Wertmessung im Laboratorium) wird in einem geschlossenen System (Kammer) ein Bereich mit einer höheren Temperatur von einem Bereich mit einer niedrigeren Temperatur durch den Prüfkörper getrennt. Die Temperaturverhältnisse d. h. Lufttemperaturen, Oberflächentemperaturen des Prüflings, Temperaturgefälle und Temperaturverteilung werden während der Messung durch Heizung und Kühlung konstant gehalten. Gemessen wird die Heizenergie-

menge, die für die Erhaltung der Temperaturen der Warmseite bei konstanten Temperaturen der Kaltseite (für die Erhaltung des stationären Wärmestromes) notwendig ist. Das folgende Bild zeigt schematisch die häufigste Variante dieser Messmethode (Messung im kalibrierten Heizkasten).

Bild 1. Messung im kalibrierten Heizkasten.



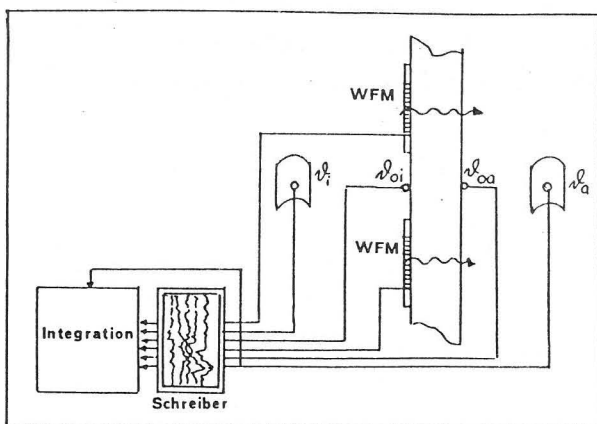
Die Messung der Heizenergie kann nur unter stationären Verhältnissen im Laboratorium erfolgen.

Die Messung der Wärmeflussintensität erfolgt an der Oberfläche des Messobjektes mit Wärmeflussmessern. Die Hauptrichtung des Wärmestromes ist während der Messung gleichbleibend. Während die Heizenergiemessung einen stationären Wärmestrom voraussetzt, besteht diese Forderung für die Wärmeflussmessung nicht.

Die Wärmestromdichte wird ermittelt in dem man die gemessene Wärmeflussintensitäten auf die Fläche bezieht und über die Zeit integriert. Je stärker die Schwankungen vom gemessenen Wärmestrom sind, umso länger ist die notwendige Messzeit. Dieses gilt auch, wenn das Integrationsverfahren der Auswertung durch ein Rechenprogramm ersetzt wird.

Diese Methode ist nur im Winter praktikabel, da nur in dieser Jahreszeit die Forderung nach gleichbleibender Hauptrichtung des Wärmestromes durch eine ausreichend lange Integrationsperiode zu erfüllen ist. Das folgende Bild zeigt schematisch diese Messanordnung.

Bild 2. Wärmeflussmessung mit Auswertung im Integrationsverfahren



3. Messgeanauigkeit.

3.1. Allgemeines.

Die Messgenauigkeit kann aus drei Bereichen beeinflusst werden:

- Messapparatur,
- Messobjekt und
- äussere Messbedingungen.

Der Faktor des menschlichen Versagens bleibt bei dieser Betrachtung ausser Acht.

3.2. Messapparatur.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Eichgenauigkeit und Gerätekonstanz als Fehlerquellen bei den meisten Apparaturen ausgeklammert werden können. Die tatsächlichen Abweichungen der Eichwerte von den Lieferantenangaben sind in der Regel so klein, dass sie von den übrigen Einwirkungen bei der praktischen Messung vollkommen überdeckt werden und nur unter Laborbedingungen quantifizierbar sind.

Da die gebräuchlichen Wärmeflussmesser in der Regel mechanischer Beanspruchung gegenüber anfällig sind, ist eine periodische Kontrolle der Eichung in jedem Fall geboten.

Grösse und Aufbau der Messfühler haben keinen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit. Sie spielen eher eine Rolle

bei der Anpassung der Messung an die äusseren Messbedingungen.

Für die Registrierung sollten bei der Wärmeflussmessung Schreiber verwendet werden. Die Erfahrung zeigt, dass auf das kontinuierliche Aufzeichnen der Messwerte nicht verzichtet werden kann.

3.3. Messobjekt.

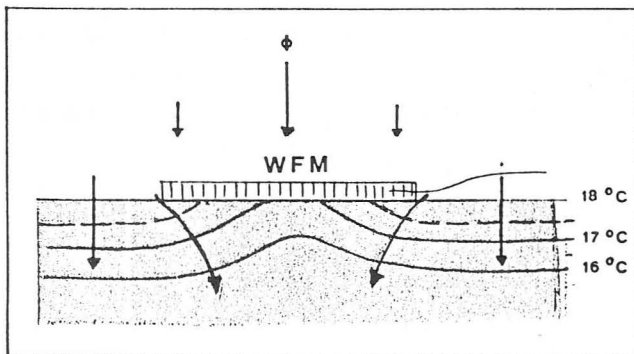
Das Messobjekt ist ein Teil vom Gebäude, in unserem Fall eine Aussenwand. Seine Qualität ist den bauüblichen Toleranzen unterworfen. Die Schwankungen dieser Qualitätsmerkmale, die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe und der Aufbau der Konstruktion können die Messgenauigkeit erheblich beeinflussen. Folgende Faktoren sind zu beachten:

- Oberflächenbeschaffenheit der Wand,
- Wärmespeicherfähigkeit der Konstruktion,
- Inhomogenitäten und
- Gliederung des Gebäudeteiles.

Die Oberfläche des Messobjektes kann durch ihre Wärmeleitfähigkeit und durch ihre Glätte die Messung beeinträchtigen.

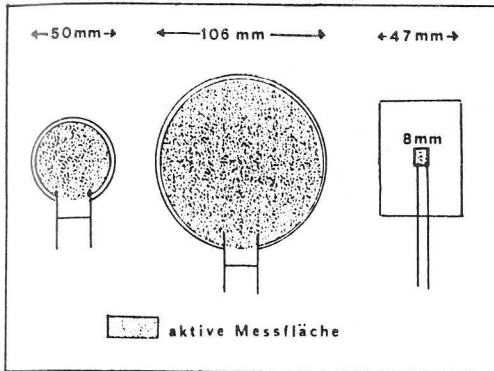
Wenn die Wärmeleitfähigkeit der Messobjektfläche im Verhältnis zu der Wärmeleitfähigkeit des Wärmeflussmessers zu hoch ist, tritt ein sog. Randeffect auf. Der Fühler bedeckt eine gewisse Fläche und bildet ein zusätzliches Hinderniss für den Wärmefluss. Der so entstandener Temperaturunterschied wird durch die gute Wärmeleitfähigkeit der Objektfläche ausgeglichen. Die Wärme "unterläuft" die Mess-Scheiben, weshalb sie zu wenig anzeigen.

Bild 3. Randeffect bei stark wärmeleitender Oberfläche.



Die Empfindlichkeit des Messfühlers auf den Randeffect kann je nach seiner Art und seinem Aufbau unterschiedlich sein. Fühler mit einer kleinen aktiven Fläche und mit einer breiten Umrandung sind von diesen Störungen weitgehend verschont.

Bild 4. Wärmeflussmessertypen (schematische Darstellung)



Fühler mit voller Aktivfläche müssen bei gut wärmeleitenden Flächen mit einer zusätzlichen Umrandung versehen werden. Für stark leitende Metalloberflächen sind auch die Umrandungen nicht ausreichend.

Bei unebenen, rauhen Oberflächen ist die Herstellung eines bündigen Kontaktes mit dem Messfühler wichtig. Lufträume zwischen dem Wärmeflussmesser und dem Objekt können den Wärmedurchlasswiderstand merkbar verändern (beobachtete Abweichungen 5 - 8 %). Die Anwendung von Kontaktmassen kann Abhilfe schaffen.

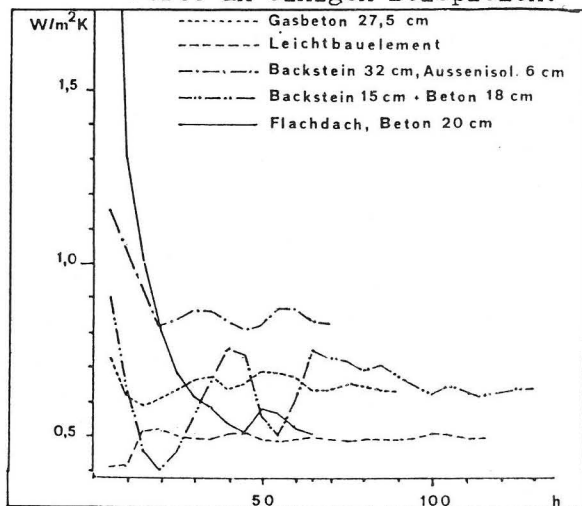
Sehr stark tritt die Wärmespeicherfähigkeit des Bauteiles unter den instationären Bedingungen einer Baumessung in den Vordergrund. Nur bei einer genügend langen Integrationsdauer hat eine Änderung der Speicherwärme keinen wesentlichen Einfluss auf den ermittelten k-Wert.

Eine Messung der meistens massiven Bauteilen (z. B. einschalige und zweischalige Aussenwände) ist in praktikabler Frist nur dann möglich, wenn die Temperaturverhältnisse raumseitig (warmseitig) nahezu stationär bleiben, womit starke Veränderungen der mittleren Konstruktionstemperatur verhindert

werden.

Die statistische Untersuchung der Ablesungen zeigt, wie der ermittelte Wärmedurchlasskoeffizient sich auf den Endwert einpendelt. Das "Einpendeln" der gemessenen Wärmedurchlasswerte auf einen quasi konstanten Messwert dauert bei den bauüblichen massiven Mauerwerkskonstruktionen immer mehrere Tage.

Bild 5. Einpendelung der durchschnittlichen Wärmedurchlasswerte an einigen Beispielen.



Inhomogenitäten in der Konstruktion verändern die Wärmestromdichte partiell. Starke örtliche Differenzen zwischen den Messpunkten können bei Mauerwerken entstehen, wo die Fugen als Wärmebrücken wirken (noch viel gravierender bei Leichtbauelementen, wo die Montageanschlüsse oft gut wärmeleitfähig sind). Die statistische Auswertungen zeigen, dass eine symmetrische Verteilung der Messwerte erst ab 5 Messpunkten angenommen werden kann.

Alle örtlichen Unterschiede der Messwerte sind nicht allein auf die Inhomogenitäten der Messobjekte zurückzuführen. Auch äussere Bedingungen, wie lokale Konvektionen oder wärmestrahlende Objekte in der Nähe der Messstelle können ähnliche Streuungen hervorrufen.

Die Nähe von Fenstern, Decken, herausragenden Ornamenten, Wärmebrücken und Aussenecken kann die Messresultate deformieren. Ein Abstand von 0,5 m von solchen kritischen Stellen

sollte eingehalten werden.

3.4. Aeussere Messbedingungen.

3.4.1. Allgemeines.

In der Regel ist der Einfluss der äusseren Randbedingungen auf die Messgenauigkeit schwerwiegender als alle andere Faktoren. Sie entscheiden vom Anfang an über die Durchführbarkeit einer Prüfung.

Die äusseren Messbedingungen werden durch das Aussenklima und das Raumklima an der Messtelle bestimmt.

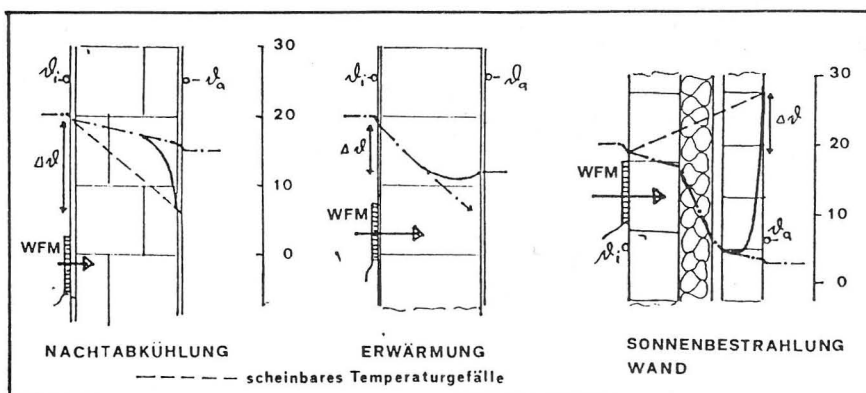
3.4.2. Aussenklima.

Wärmeflussmessungen können nur dann durchgeführt werden, wenn ein dauerhaftes Temperaturgefälle besteht. Die Erfahrungen zeigen, dass die mittlere Temperaturdifferenz mindestens 10 K betragen muss. Kurzfristige Aussentemperturschwankungen sind bei ausreichender Messdauer nur von geringer Bedeutung. Stetige Veränderungen der mittleren Aussentemperaturen (z. B. in Uebergangszeiten) beeinflussen die Messgenauigkeit erheblich. In Wetterperioden mit ansteigenden mittleren Tagestemperaturen werden höhere und bei fallenden Tagestemperaturen niedrigere k-Werte gemessen. Aus diesen Erfahrungen geht hervor, dass solche Messungen auch im Winter nur gemacht werden können, wenn eine relativ konstante Temperaturdifferenz gesichert ist.

Neben der Temperaturdifferenz und der Temperaturschwankung ist die direkte Sonnenstrahlung von besonderer Bedeutung für die Brauchbarkeit der Messresultate. Die durch die Strahlung verursachte Temperaturinversion im Querschnitt des Aussenbauteiles führt zu sinnlosen Negativ-Werten. Eine künstliche Beschattung der Messtelle, wenn eine Prüfung in dieser Position unbedingt verlangt wird, kann Abhilfe schaffen. Die Beschattung muss ausreichend gross (ca. $0,5 \text{ m}^2$) und mindestens einige Tage vor der Messung schon wirksam sein.

Oberflächennässe, Wind aber auch mikroklimatische Einflüsse (z. B. Strassenverkehr, Nähe von Maschinen etc.) können die Messungen verfälschen. Die beschriebenen Einflüsse verlangen nach ruhigem Winterwetter und nach geschützten nördlichen oder beschatteten Messpositionen.

Bild 6. Wärmefluss bei verschiedenen Aussenklima-Situationen

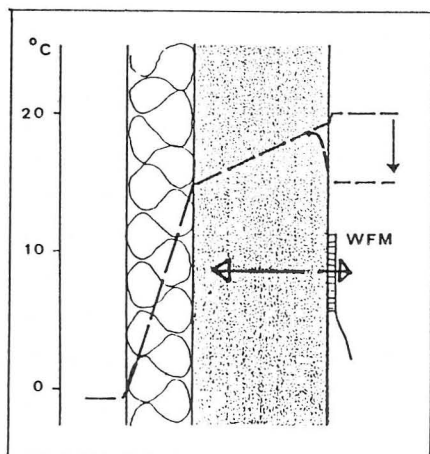


3.4.3. Raumklima.

Bereits wurde darauf hingewiesen, dass die Wärmeflussmessung am Bau nur dann zuverlässige Resultate liefern kann, wenn die Warmseite nahezu stationär ist. Grundsätzlich ist eine Benützung des Raumes während der Messung zu vermeiden. Veränderung der Raumkommunikationen, intensive Sonneneinstrahlung, Lüftung und vor allem die Nähe des menschlichen Körpers führen zu Fehlmessungen.

Heizung mit periodischer Unterbrechung oder mit Nachtabsenkung erschwert oder verunmöglicht die Messung. Besonders stark wirken solche Absenkungen auf die Wärmeflussrichtung bei gut isolierten Konstruktionen.

Bild 7. Wärmefluss bei Nachtabsenkung.



4. Berechnete und gemessene k-Werte.

Der Vergleich der gemessenen und berechneten k-Werte ist sowohl für das Messverfahren als auch für die Rechenwerte aufschlussreich. Sind die Abweichungen aus konstruktions- und objektspezifischen Gründen nicht erklärbar, so müssen die Ursachen in der Messmethode oder in einem nicht richtigen Rechenwert gesucht werden.

KONSTRUKTION	k_f in W/m^2K		k_m in W/m^2K
	nach SIA	nach DIN	
EINSCHALIGE WÄNDE			
Backstein 25 cm (BI)	1,07	1,33	1,06
Backstein 30 cm (Verbandmauerwerk)	0,99	1,14	1,04
Backstein 32,5 cm	0,91	1,10	0,90
Backstein 32,5 cm (durchnässt)	0,91	1,10	1,16
Gasbeton 27,5 cm	0,57	0,68	0,57
Blicktonbeton 30 cm	1,30	1,30	1,21
MEHRSCICHTIGE WÄNDE			
Backstein 18 cm + Aussenisolation 6 cm	0,50	0,56	0,46
Zweischalige Backsteinwände			
15 cm + Polystyrol 5 cm + 12,5 cm	0,47	0,50	0,47
15 cm + Mineralw. 5 cm + 12,5 cm	0,48	0,50	0,46
15 cm + Mineralw. 4 cm + 12,5 cm (nass)	0,55	0,58	0,73
15 cm + Polystyrol 5 cm + 12 cm	0,47	0,47	0,44
15 cm + Polystyrol 5 cm + 6 cm	0,54	0,55	0,50
Backstein 12 cm + Mineralw. 5 cm + Beton 18 cm	0,55	0,56	0,58
Backstein 12 cm + Mineralw. 5 cm + Beton 18 cm	0,55	0,56	0,55
Kalksandstein 12 cm + Mineralw. 6 cm + Kalks. 12 cm	0,51	0,51	0,53
Leichtfassadenelement	0,82	0,88	0,79

Die Messresultate zeigen eine gute Uebereinstimmung mit den SIA-Rechenwerten (abgesehen von zwei stark durchnässten Objekten). Die Abweichung von den DIN-Werten ist eindeutig grösser. Die Ursache dieser auch in anderen Messprogrammen festgestellten Tendenz liegt darin, dass die SIA-Rechenwerte klar als Richtwerte ermittelt und festgesetzt sind, während die DIN-Werte einen eher Grenzwert-Charakter haben und besonders im Bereich der Hochlochziegel zu ungünstig ausgelegt sind.

5. Folgerungen.

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass mit der Methode der

Wärmeflussmessung der Wärmedurchlasskoeffizient am Bauwerk ermittelt werden kann. Die Messung des k-Wertes am Bau ist jedoch mit stark einschränkenden Bedingungen verbunden.

Die einschränkenden Vorbedingungen sind solcher Art, dass diese Methode nicht als einfache Routinekontrolle der Wärmedämmfähigkeit der Bauteile eingesetzt werden kann. Deshalb muss der k-Wert der Aussenkonstruktionen grundsätzlich rechnerisch bestimmt und auch rechnerisch nach den Plänen kontrolliert werden.

Wird jedoch aus wichtigem Grund eine Prüfung des k-Wertes am Bau notwendig, so kann die Wärmeflussmessung angewendet werden, wobei die Prüfung nur unter bestimmten Auflagen durchgeführt werden kann. Die Lösung der Schwierigkeiten in diesem Messverfahren bedarf noch eines langen Optimierungsprozesses.

6. Literatur.

- Aittomäki, A. Determination of the overall heat transfer coefficient of multilayer structures under non-steady conditions. CIB W 40 Holzkirchen 1972.
- DIN 52611 Teil 1 + 2. Wärmeschutztechnische Prüfungen...
- Dreyfus, J. Transmission de la chaleur en régime périodique à travers les murs des habitations. Revue Générale de Thermique 22/1963.
- Douglas, J. B. Selecting unsteady heat flux sensors. Instruments and Control Systems, 45. 5/1972.
- Jenisch, R. Messverfahren zur Ermittlung des Wärmedurchlasswiderstandes von Mauerwerkswänden. ZI International, April 1980.
- Marechal, J. C. et Devisme J. M. Contribution aux mesures thermiques dans le bâtiment. Annales de l'institut du bâtiment et des travaux publics. 369/1979. Paris.
- Sagelsdorff, R. Die neue k-Wert-Kammer an der EMPA. Schweizerische Bauzeitung. 49/1968. Zürich.
- Szabo, P. k-Wert-Messungen am Bau. 1. Schweiz. Status-Seminar Wärmeschutzforschung im Hochbau. Oktober 1980.
- Szabo, P. k-Wert-Messung am Bau. Dokumentation des SIA. Forschungsprogramm NEFF. 1982.