

# Entwicklung eines Meßsystems zur Bestimmung der Luftdichtigkeit von Bauteilen in situ\*

Achim Geißler und Gerd Hauser

Dipl.-Ing. Achim Geißler ist wissenschaftliche Mitarbeiter im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel

Dr.-Ing. Gerd Hauser ist Professor für Bauphysik der Universität Kassel

**Schlüsselwörter:** Luftdichtigkeit; Meßtechnik; in situ

## Zusammenfassung

Der prinzipielle Aufbau eines Meßsystems zur Bestimmung der Luftdichtigkeit von Bauteilen in situ wird vorgestellt. Testmessungen zeigen gute Übereinstimmung der Meßwerte mit den anhand eines Laborprüfstandes zum Vergleich ermittelten Werte. Das zugrundeliegende Meßprinzip "Schutzzonenmethode" ("Guardzone Technique") scheint für diese Anwendung geeignet. Kernprobleme sind die Abdichtung der Zonen gegeneinander, die Ausregelung der Druckdifferenz zwischen der Schutz- und der Meßzone sowie die zerstörungsfreie Befestigung des Meßsystems.

## 1 Einführung

Die Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen wird im allgemeinen im Labor durchgeführt. Dies hat zur Folge, daß der Kenntnisstand über die Auswirkungen der realen Gegebenheiten im eingebauten Zustand auf die Dichtigkeit von Bauteilen sehr niedrig ist. Gerade diese Information ist aber für die Einschätzung von Bauteilen ausschlaggebend. Ein Bauteil kann für sich genommen beliebig luftdicht sein, solange es sich nicht auch dauerhaft luftdicht in ein Gebäude einbauen läßt, ist im Hinblick auf die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle nichts gewonnen.

In größerem Umfang sind auch im Labor lediglich Fenster und Türen auf ihre Luftdichtigkeit hin untersucht worden [1]. Von Knublauch/Schaefer/Sidon [2] wurden, ebenfalls im Labor, Steildachkonstruktionen in verschiedenen Kombinationen von Dämmstoff und Raumabschluß auf ihre Luftdichtigkeit untersucht. Bei allen diesen Untersuchungen, wie auch bei der Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Holzverschalungen [3] wurden Differenzdruckmethoden eingesetzt. Diese Methoden werden ebenso für gesamte Gebäude angewendet. Im folgenden wird die Konzeption und Konstruktion eines in situ-Meßsystems zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen beschrieben.

Um einzelne Bauteile im eingebauten Zustand auf ihre Luftdurchlässigkeit hin untersuchen zu können, muß es möglich sei, diese Bauteile einem Druckgefälle auszusetzen. Das bedingt die Zugänglichkeit zum interessierenden Bauteil. Eine abgehangene Decke beispielsweise verhindert die Dichtigkeitsmessung an der darüberliegenden, eigentlichen Decke.

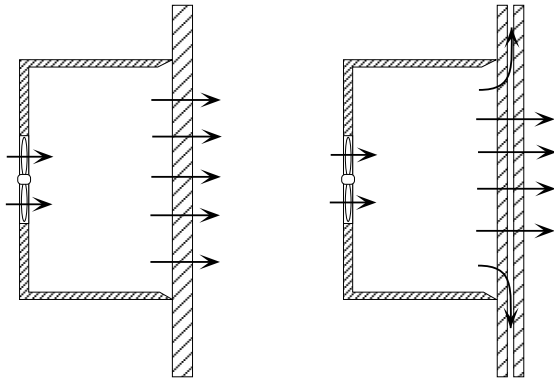
Ein weiteres Problem bei der Messung der

Luftdurchlässigkeit von Bauteilen in situ ist die Möglichkeit der Strömung in der Bauteilebene (vgl. Bild 1). Diese Strömung kann sowohl im Bauteil selbst erfolgen als auch, in mehrschichtigen Bauteilen, zwischen zwei Schichten. Soll die Luftdichtigkeit des gesamten Bauteilquerschnittes gemessen werden, führt diese Strömung zu falschen Ergebnissen. Läßt sich diese Strömung nicht verhindern, ist eine Messung der Luftdurchlässigkeit des gesamten Querschnittes nicht durchführbar [4]. Es kann in einem solchen Fall lediglich die Luftdurchlässigkeit der zugänglichen Schicht bis zu der Ebene, in der diese Querströmung stattfindet, gemessen werden.

## 2 Aufbau des Meßsystems

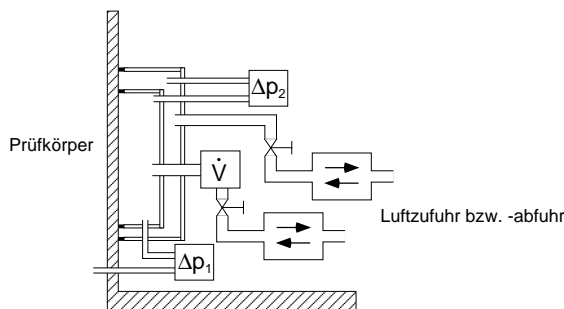
Ausgeführt wird ein nach der "Schutzzonen Methode" (guardzone technique [4]) funktionierendes Zweikammersystem. Die Realisierung dieses Meßsystems erfordert zwar ein aufwendiges Regelsystem, da die Druckdifferenz zwischen der Meßkammer und der Ausgleichskammer so gering wie möglich sein muß um Strömungen im Bauteil gering zu halten. Die Einsatzgrenzen in Bezug auf mögliche Meßobjekte eines solchen Systems sind jedoch weniger eingeschränkt.

Zwei ineinander passende Kammern bilden das Grundgerüst des Meßsystems. Beide Kammern haben eine voneinander unabhängige Luftzufuhr und Volumenstromregelung. Die innere Kammer ist zusätzlich mit einer Vorrichtung zur Volumenstrombestimmung ausgestattet. Die Druckdifferenz zwischen der inneren (der Meßkammer) und der äußeren Kammer (der Ausgleichskammer) sowie der zwischen der inneren Kammer und der



**Bild 1:** Durchströmung eines Bauteiles, Querströmung im Bauteil nach Roulet/Vandaele.

Umgebung werden gemessen. In Bild 2 ist der prinzipielle Aufbau skizziert. Das Volumen zwischen den beiden Kammern dient als Schutzzone, d.h. der Druck in diesem Zwischenraum wird regelungstechnisch stets auf demselben Niveau gehalten wie derjenige in der inneren Kammer. Anders ausgedrückt,  $\Delta p_2$  soll stets gleich null sein. Damit ist der Volumenstrom, welcher der inneren Kammer zugeführt werden muß, um die gewünschte Druckdifferenz zur Umgebung aufrechtzuerhalten derjenige, der durch das Bauteil im Bereich der inneren Kammer hindurchströmt.

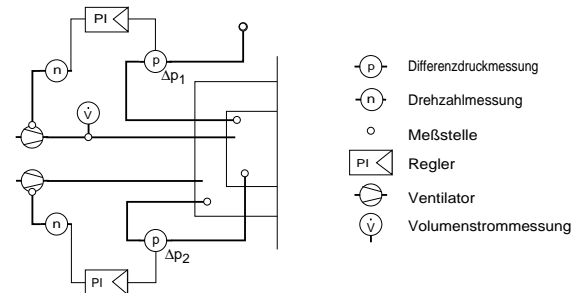


**Bild 2:** Prinzipieller Aufbau des 2-Kammer in situ Meßsystems mit Meß- und Regelgrößen

## 2.1 Meß- und Regeleinrichtung

In Bild 3 ist der prinzipielle Meß- und Regelaufbau für das in situ-Meßsystem aufgezeigt. Zentrales Problem ist die Ausregelung der Druckdifferenz  $\Delta p_2$  zwischen der Meßkammer und der Ausgleichskammer. Erreicht wird dies indirekt durch die Drehzahlregelung der Ventilatoren. Die mögliche 'Güte' dieser Ausregelung zeigte sich als stark abhängig von der Abdichtung der Kammern gegeneinander sowie als absolut maßgeblich für die Meßgenauigkeit.

Der für die Erfassung der Meßwerte und der Regelung der Ventilatoren notwendige PC ist in 19" Technik aufgebaut. In dem 19" Einschubgehäuse mit Transportkoffer haben neben dem eigentlichen Rechner alle weiteren Peripheriegeräte wie Differenzdrucksensoren mit Spannungsversorgung und elektronische Drehzahlregler Platz. Durch diesen Aufbau ist die Meß- und Regeleinheit kompakt und relativ gut gegen mechanische Belastungen, die beispielsweise beim Transport vorkommen können, geschützt.



**Bild 3:** Prinzipskizze des Meß- und Regelaufbaus

Die Regelung erfolgt über zwei Software PI-Regler. Der Sollwert ist die gewünschte Druckdifferenz, für die Druckdifferenz zwischen Kontrollkammer und Meßkammer stets null, für die Druckdifferenz zwischen Meßkammer und Umgebung ein Wert zwischen einem und zehn Dekapascal. Der Istwert ist entsprechend die aktuelle Druckdifferenz und die Stellgröße ist die Regelspannung für den elektronischen Drehzahlregler des jeweiligen Ventilators.

## 2.2 Die zerstörungsfreie Befestigung des Meßsystems

Die Befestigung des Meßsystems erfolgt durch ein Vakuumsystem mit sechs Saugnäpfen. Diese haben bei Holz als Unterlage und bei dem Nennunterdruck von 0,85 bar bei Belastung normal zur Holzoberfläche eine Haltekraft von je ca. 650 N. Bei dem Prototypen des in situ-Meßsystems ergibt das mit der Gewichtskraft des Systems von ca. 450 N und der theoretisch aufzubringenden Preßkraft für die Kompression des hochkompressiblen Dichtungsbandes auf den Sollwert von 5:1, die einer Gewichtskraft von ungefähr 500 N entspricht, eine Sicherheit von ca. vier. Vorläufig ist in dem Vakuumsystem noch kein Puffervolumen vorhanden, so daß bei Störungen der Vakuumpumpe, Stromausfall oder bei Leckage eines Vakuumschlauches das System praktisch sofort herunterfällt.

Bei Messungen, die mit dem Prototypen an einer Versuchsdachschräge durchgeführt werden, erweist sich nicht die Haltekraft der Saugnäpfe als begrenzender Faktor der Aufhängung und Abdichtung durch Kompression der Dichtungsbander,

sondern die Festigkeit der mit Krallen befestigten Nut- und Federbretter der Versuchsdachschräge. Bei zu großen Kräften reißen die Nuten teilweise aus. Es ist nicht möglich, die angestrebte Kompressionsrate der hochkompressiblen Bänder von 5:1 zu erreichen.

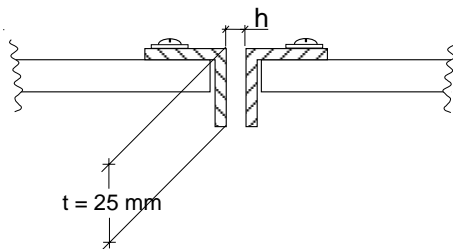
### 3 Testmessungen

#### 3.1 Vergleichsmessungen anhand eines einfachen Spaltes

Anhand eines Spaltes einfacher Geometrie, der sowohl mit dem zur Verfügung stehenden Laborprüfstand [3] als auch mit dem in situ-Meßsystem erfaßt werden kann, werden vergleichende Messungen durchgeführt, um das Prinzip des in situ-Meßsystems zu verifizieren.

Der Spalt veränderbarer Höhe  $h$ , mit der konstanten Tiefe  $t$  von 25 mm, besteht aus zwei Aluminium L-Winkeln, die verschiebbar auf einer Sperrholzplatte montiert werden (vgl. Bild 4). Aufgrund des sehr einfachen Aufbaus ist es nicht möglich, die Spalthöhe exakt einzustellen. Die Unsicherheit in der Einstellung der Spalthöhe ist größer als  $\pm 0,05$  mm.

Für den Vergleich zwischen dem Laborprüfstand und dem in situ-Meßsystem ist der Absolutwert der Spalthöhe nicht bedeutsam. Es sollte jedoch sichergestellt werden können, daß sich die Spalthöhe zwischen den Messungen mit den unterschiedlichen Meßsystemen und dem damit verbundenen Umbau nicht verändert. Eine Veränderung der Spalthöhe kann bei den durchgeführten Messungen nicht völlig ausgeschlossen werden.



**Bild 4:** Einfacher Spalt für Vergleichsmessungen zwischen dem Laborprüfstand und theoretischen Werten nach [5].

können Vergleichsmessungen ohne die zusätzliche Komplikation der Überkopfbefestigung durchgeführt werden. In Bild 5 sind die Ergebnisse dieser ersten Vergleichsmessungen dargestellt. Die Übereinstimmung der hierbei mit dem in situ-Meßsystem gemessenen Werte und den Werten der Messungen mit dem Laborprüfstand kann für Spaltgrößen über 0,5 mm als gut bezeichnet werden. Die mittleren Abweichungen sind für die Messung mit der Spalthöhe 0,5 mm ca. 12% und bei der Spalthöhe 2,0 mm ca. 2%. Die relativ große Abweichung bei der Spalthöhe 0,5 mm ist im wesentlichen auf mögliche Veränderungen der eingestellten Spalthöhe bei dem nicht vermeidbaren Umbau der Platte mit dem Spalt zwischen den Meßgeräten zurückzuführen. Unter der Annahme, daß die absolute Änderung bei dem Umbauvorgang in etwa konstant bleibt, ist die relative Änderung bei einem kleineren Spalt natürlich größer.

Es ist zu erkennen, daß die mit dem in situ-Meßsystem ermittelte Werte für die Luftdurchlässigkeit des Spaltes tendenziell etwas zu hoch liegen.

##### 3.1.2 Messungen mit dem in situ-Meßsystem überkopf befestigt

Da die Abdichtung der Kammern voneinander ein zentrales Element des in situ-Meßsystems darstellt, werden die Messungen an dem einfachen Spalt überkopf wiederholt. Bei der Überkopfmontage ist die Abdichtung der Kammern voneinander, die bei der Ausführung des Prototypen von der Kompression eines hochkompressiblen Dichtungsbandes abhängt, nicht so gut wie im Falle des einfachen Aufstellens, bei dem das Gewicht des Prototypen für eine ausreichende Kompression der Bänder sorgt.

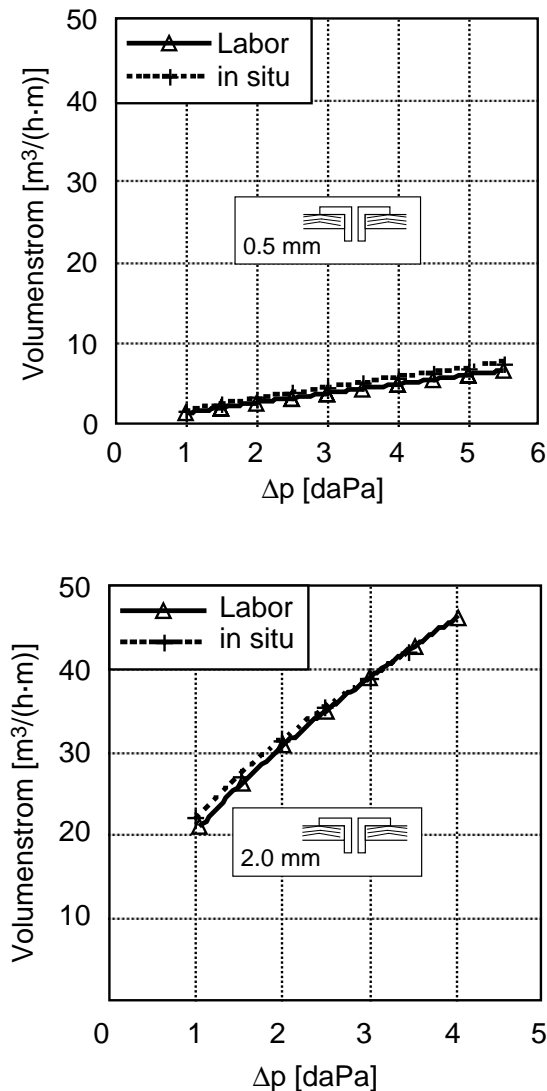
Bild 6 zeigt das Ergebnis einer Überkopf-Vergleichsmessung. Die mittlere prozentuale Abweichung der mit dem in situ-Meßsystem gemessenen Volumenströme von den Werten, die mit dem Laborprüfstand ermittelt werden, liegt in dem abgebildeten Bereich bei 15% für die Überdruckmessung bzw. bei 25% für die Unterdruckmessung, wenn alle Werte berücksichtigt werden. Für die Betrachtung der Druckdifferenz über dem Spalt zwischen 40 und 60 Pa wird die mittlere Abweichung für die Überdruckmessung zu 8% bzw. zu 18% für die Unterdruckmessung. Auch im Betrieb 'überkopf' liegen die mit dem in situ-Meßsystem ermittelten Werte jeweils über den anhand des Laborprüfstandes gemessenen.

##### 3.1.1 Messungen mit dem in situ-Meßsystem auf dem Boden liegend

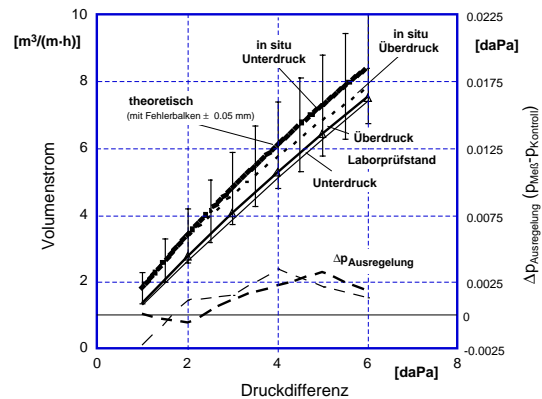
Zunächst wird das in situ-Meßsystem einfach auf die Probe mit dem Spalt gestellt. Hierdurch

##### 3.2 Messungen an einem Versuchsdachaufbau

Die zerstörungsfreie Befestigung und der Betrieb 'überkopf' wird an einem zu diesem Zweck er-



**Bild 5:** Vergleichsmessungen zwischen in situ-Meßsystem und Laborprüfstand anhand eines einfachen Spaltes unterschiedlicher Höhe. Das in situ-Meßsystem wurde hierbei nicht überkopf befestigt.



**Bild 6:** Vergleichsmessungen anhand eines einfachen Spaltes der Höhe  $h = 0,5$  mm mit Befestigung des in situ-Meßsystems überkopf.

richteten 'Dachsegment' mit Nut- und Federbrettverschalung probeweise durchgeführt. Hierbei können wertvolle Erkenntnisse über das Verhalten des Systems gewonnen werden. Die größten Schwierigkeiten ergeben sich bei diesen Versuchsmessungen zunächst hinsichtlich der Abdichtung der Kammern untereinander und der Abdichtung der äußeren Kammer zur Umgebung. Sind diese Bereiche im liegenden Testbetrieb durch das relativ hohe Eigengewicht des Meßsystems kein Problem, wird nun durch die geneigte Aufhängung überkopf die Kompression des hochkompressiblen Dichtungsbandes problematisch. Das sich aus dem Eigengewicht des Systems und der für die hochkompressiblen Bänder aufzubringenden Kompressionskraft zusammenfindende 'Gesamtgewicht' des Systems erweist sich als deutlich zu hoch. Bei den ersten Befestigungsversuchen reißen die mit Krallen befestigten Profilbretter teilweise an den Nuten aus, bevor eine ausreichende Kompression der verwendeten Dichtungsbänder erreicht werden kann. Erst nach der Verringerung der benötigten Kompressionskraft durch Vorabprofilierung des Dichtungsbandes im Muster der Profilbretter und der damit erzielten besseren Abdichtung der beiden Kammern gegeneinander können die ersten Messwerte mit dem System überkopf an dem Dachversuchsaufbau mit Nut- und Federbrettern ermittelt werden. Hierbei ist jedoch die Abdichtung der Kammern gegeneinander noch nicht gut genug, um die Meßwerte vergleichen zu können.

## 4 Schlußbemerkung

Ein fertiggestellter Prototyp des Meßsystems zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen

in situ nach der Schutzzonenmethode wird in Vergleichsmessungen mit einem vorhandenen Laborprüfstand erprobt. Hierbei können wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, in welchen Bereichen bei einem derartigen System Probleme zu erwarten sind.

Das gewählte Meßprinzip "Schutzzonenmethode" (Guardzone) scheint für ein solches Meßsystem geeignet. Die vergleichenden Messungen anhand eines einfachen Spaltes ergeben Abweichungen zwischen dem Laborprüfstand und dem Prototypen des Meßsystems zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen in situ von ca. 10 bis 20%.

Die Behebung der im Laufe der durchgeführten Testmessungen erkannten Schwierigkeiten sowie die Erfüllung der bislang noch nicht berücksichtigten Forderung, das Messen von Kanten mit bis zu  $90^\circ$  zu ermöglichen, sind bei der Konzeptionierung einer zweiten, verbesserten Version des Meßsystems zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen in situ konstruktionsweisend.

Die Forderungen an eine weiterentwickelte Version des Meßsystems im Überblick:

- Das am Bauteil zu befestigende System muß leichter werden
- Auch das Messen von Kanten ( $180^\circ$  bis  $90^\circ$ ) soll möglich sein
- Die Kammern sollen in gewissen Grenzen seitlich gegeneinander verschiebbar sein
- Die 'Saugebene' für die Befestigung des Meßsystems soll möglichst dicht an der 'Dichteebene' liegen, um Hebelwirkungen zu verhindern und die Abdichtung der Kammern gegeneinander und gegenüber der Umgebung zu verbessern

Die konstruktive Ausführung eines verbesserten Meßsystems zur Bestimmung der Luftdichtigkeit von Bauteilen in situ ist derzeit in Arbeit.

\* Die Untersuchung wurde im Auftrag des AIF, AZ.: 8795, über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. durchgeführt.

[4] Roulet, C. und Vandaele, L. *Air flow patterns within buildings measurement techniques*. Techn. Ber. 34, AIVC, Dec 1991.

[5] Esdorn, H. und Rheinländer, J. *Zur rechnerischen Ermittlung von Fugendurchlaßkoeffizienten und Druckexponenten für Bauteilfugen*. Heizung Lüftung Haustechnik 29 (März 1978), 3.

## Literatur

- [1] Schüle, W. *Untersuchungen über die Luft- und Wärmedurchlässigkeit von Fenstern*. Gesundheits Ingenieur 83 (1962), 6.
- [2] Knublauch, E., Schäfer, H. und Sidon, S. *Über die Luftdurchlässigkeit geneigter Dächer*. Gesundheits Ingenieur 108 (1987), 1.
- [3] Hauser, G. und Geißler, A. *Untersuchung der Luftdichtheit von Holzverschalungen*. Bauphysik 17 (1995), H. 6, S. 189–193.