

Blower Door-Messungen – erweiterte Meßmethoden

Achim Geißler, Torsten Bolender
und Gerd Hauser

Dipl.-Ing. Achim Geißler und Dipl.-Ing. Torsten Bolender sind wissenschaftliche Mitarbeiter im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel
Dr.-Ing. Gerd Hauser ist Professor für Bauphysik der Universität Kassel

Schlüsselwörter: Luftdichtheit; Blower Door; Meßmethoden; Gebäudebereiche

Zusammenfassung

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle gewinnt mit steigendem Dämmniveau für den Heizenergieverbrauch von Gebäuden zunehmend an Bedeutung. Im Hinblick auf die Vermeidung von Bauschäden ist eine hohe Luftdichtheit seit jeher wichtig.

Zur Bestimmung der Luftdichtheit der Gebäudehülle werden im allgemeinen Blower Door-Messungen durchgeführt. Der hierbei bestimmte integrale Wert für das gesamte Gebäude stellt für das Ergreifen von gezielten Abdichtungsmaßnahmen im Gebäudebestand eine zu geringe Basis dar. Weiterführende Meßmethoden erlauben, im Rahmen von Luftdichtheitsmessungen mit der Blower Door zusätzliche Informationen über die Leckageverteilung und über Leckagewege zu bestimmen.

Die aus der Literatur bekannten erweiterten Meßmethoden 'Opening A Door' und 'Adding A Hole' sowie die neue Methode 'Adding A Hole Plus' werden erläutert, anhand von exemplarischen Messungen verglichen und im Feldeinsatz auf ihre Anwendbarkeit hin betrachtet.

1 Einführung

Die dringende Notwendigkeit, den Heizenergieverbrauch und den damit verbundenen CO₂-Ausstoß bei Gebäuden in den Industriestaaten zu senken, ist allgemein bekannt [1]. Das aufgrund der Beheizung von Gebäuden emittierte CO₂ ist in Deutschland mit ca. 37 % der größte Einzelfaktor des Endenergieverbrauchs. Dem gegenüber steht ein technisches Minderungspotential, das ca. 70-90 Prozent im Gebäudebestand und ca. 80-90 Prozent im Bereich der Neubauten ausmacht [2].

Bislang lag der Schwerpunkt der Forschungstätigkeit in dem Bereich der Optimierung von Gebäuden hinsichtlich der Transmissionswärmeverluste. Die Verbesserung der Luftdichtheit von Gebäuden und die damit verbundene Reduzierung der Lüftungswärmeverluste gewinnt erst in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Dies ist auch daraus ersichtlich, daß es mittlerweile einen Teil 7 zur DIN 4108 gibt, der die Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen bei Gebäuden zum Inhalt hat [3].

Eine luftdichte Gebäudehülle ist aber nicht nur unter energetischen Gesichtspunkten, sondern auch für den Wohnkomfort (Vermeidung von Zugerscheinungen, Schallschutz) sowie für den Betrieb von Lüftungsanlagen von großer Bedeutung. Nicht

zuletzt dient eine luftdicht ausgeführte Konstruktion der Vermeidung von Durchfeuchtungsschäden z.B. im Bereich von zweischaligen Konstruktionen im Holzbau. [1, 4].

Als Werkzeug zur Überprüfung der Luftdichtheit der Gebäudehülle hat sich das Blower Door-Verfahren bewährt. Es handelt sich um ein statisches Differenzdruckverfahren, anhand dessen zunächst nur ein integraler Wert der Luftdichtheit für das gesamte Gebäude bestimmt werden kann. Bei Unterdruck im Gebäude kann zusätzlich festgestellt werden, an welchen Stellen der Konstruktion Luft eintritt. Der Einsatz von Theater- bzw. Disconebel bei Überdruck im Gebäude ermöglicht in manchen Fällen die Bestimmung derjenigen Stellen, an denen Luft aus der Konstruktion austritt. All diese Informationen helfen, das qualitative Leckageverhalten eines Gebäudes zu analysieren.

In Deutschland ist die Überprüfung der Luftdichtheit der Gebäudehülle, insbesondere im Gebäudebestand, nicht zuletzt aufgrund bislang fehlender gesetzlicher Bestimmungen, noch in der Aufbau-phase.

Um die hochgesteckten Ziele der Bundesregierung zur CO₂-Emissionsminderung erreichen zu können, ist es notwendig, auch im Gebäudebestand deutliche Verbesserungen hinsichtlich des Heiz- und Lüftungswärmeverbrauchs zu erzielen.

2 Problemstellung

Die Verbesserung der Luftdichtheit von bestehenden Gebäuden ist in mehrfacher Hinsicht eine interessante und schwierige Aufgabe. Vor dem Ergreifen von Verbesserungsmaßnahmen muß sehr genau bekannt sein, an welchen Gebäudebereichen bzw. -details Abdichtungsmaßnahmen den größten Erfolg versprechen. Gerade im Holzbau bzw. im Dachbereich von Massivbauten mit Holzdächern ist nicht immer sofort ersichtlich, auf welchem Wege die Luft in bzw. aus dem Gebäude gelangt [5]. Hier können im Rahmen von Blower Door-Messungen erweiterte Meßmethoden weiterhelfen, die benötigten Informationen über ein Gebäude zu erhalten.

Im folgenden werden kurz bekannte Methoden angesprochen, welche es erlauben, mit zwei (oder mehr) Blower Door-Systemen einzelne Leckagen bzw. Leckagewege zu quantifizieren. Anschließend werden aus der Literatur bekannte Meßmethoden zur Quantifizierung einzelner Leckagewege mit nur einem Blower Door-System [6, 7] beschrieben. Die mit diesen Methoden erreichbare Genauigkeit wird aufgezeigt und die Erweiterung einer Methode diskutiert. Es werden Vorschläge gemacht, in welchen Gebäudebereichen die beschriebenen Methoden mit Erfolg eingesetzt werden können. Die vorgestellten Meßmethoden beruhen alle auf der Tatsache, daß Leckagen an Gebäuden i.A. aus mehreren einzelnen Leckagen in aufeinanderfolgenden Schichten bestehen. Hierfür wird der Begriff 'serielle Leckagen' verwendet.

Ziel dieses Beitrages ist es, dem Anwender von Luftdichtheitsmessungen diese Meßmethoden näher zu bringen und Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, welches es ihm ermöglicht, quantitative Aussagen über die Leckageverteilung innerhalb eines Gebäudes zu treffen.

Insbesondere im Falle einer Sanierung oder Nachbesserung von Gebäuden sind diese Daten von Bedeutung. In vielen Fällen wird es nur aufgrund derartiger Informationen möglich sein, zuverlässig die Bereiche eines Gebäudes mit den größten Leckagen und dem damit verbundenen größten Verbesserungspotential zu finden.

3 Schutzzonen- und Deduktionsmethode

Die Schutzzonen- oder Guard Zone-Methode eignet sich insbesondere dafür, die Außenbauteile einzelner Räume bzw. Gebäudebereiche auf ihre Luftdichtheit hin zu untersuchen. Bei dieser Methode benötigt man zwei Ventilatoren die so eingerichtet werden, daß über Gebäudeteile, die nicht untersucht werden sollen, keine Druckdifferenz besteht.

Stehen zwei komplette Blower Door-Systeme zur Verfügung, kann mit dieser Methode die Leckage des Gesamtgebäudes und die Leckage des interessierenden Bereichs gleichzeitig bestimmt werden.

Schutzzonen- bzw. Guard Zone-Messungen sind i.d.R. die genaueste, aber auch gerätetechnisch aufwendigste Methode, die Luftdichtheit der Außenbauteile einzelner Bereiche eines Gebäudes zu bestimmen. Anders sieht die Sache aus, wenn 'interne Leckagen' interessieren. In diesem Fall muß für eine Guard Zone-Messung eine Volumenströmbilanz gem. Gl. 1 durchgeführt werden. Hierin bedeuten $\dot{V}_{1,1}$ der von Ventilator 1 (Gebäudeventilator), $\dot{V}_{2,1}$ der von Ventilator 2 (Zonenventilator) bei $\Delta p_{HZ} = 0$ geförderte Volumenstrom. $\dot{V}_{1,2}$ ist der von Ventilator 1 geförderte Volumenstrom, wenn Ventilator 2 nicht eingebaut ist, die Verbindung zur untersuchten Zone geschlossen und in der Zone eine große Öffnung zur Umgebung vorhanden ist (offenes Fenster). D.h., in $\dot{V}_{2,1}$ ist der gesuchte Volumenstrom $\dot{V}_{HZ,50}$ enthalten.

Da aber für jeden eingehenden Volumenstrom meist ein im Vergleich zu dem gesuchten Volumenstrom relativ großer Unsicherheitsbereich vorhanden ist, kann der Gesamtfehler der Methode sehr groß werden.

$$\dot{V}_{HZ,50} = (\dot{V}_{1,2} - (\dot{V}_{1,1} - \dot{V}_{2,1})) \quad (1)$$

Für Innenbauteile wie Wände und Decken einzelner Räume eignet sich daher die ebenfalls mit zwei Blower Door-Systemen durchzuführende Deduktionsmethode etwas besser [8, 9]. Bei dieser Methode wird der Bereich, dessen innere Trennbauteile interessieren, konstant auf 50 Pa geregelt; für das Restgebäude wird eine Kennlinie mit Druckdifferenzen von ca. 5 bis 45 oder 50 Pa zwischen Gebäude und Umgebung erstellt. Aus den gewonnenen Daten kann für die Innenbauteile die Volumenstrom-Druckdifferenz-Kennlinie ermittelt werden. In Abbildung 1 ist beispielhaft ein Meßdatensatz und die Auswertung dargestellt.

Wesentlicher Nachteil dieser Methode ist wiederum die Verrechnung von mehreren Volumenströmen zu dem Ergebnisvolumenstrom. Sind die Fehlerbereiche der Ausgangsvolumenströme noch relativ klein, so sind sie im Verhältnis zu dem gesuchten Volumenstrom i.d.R. groß, d.h. die Genauigkeit der Methode ist gering [9].

Vorgehensweise:

1. Meßdaten plotten und Power-Fit (frei oder mit vorgegebenem Exponenten, Kurve 1) bzw. Polynom 2. Grades (Kurve 2) ermitteln.
2. Mit dem Polynom den vom Zonenventilator für $\Delta p_{ZU} - \Delta p_{HU} = 0$ geförderten Volumenstrom bestimmen (entspricht Volumenstrom durch Außenwand der Zone bei Δp_{ZU}).

3. Von dem Volumenstrom 'Zone' (Kurve 2, Polynom) diesen abziehen.
4. Druckdifferenz $\Delta p_{HZ} = (\Delta p_{ZU} - \Delta p_{HU})$ bilden.
5. Den Volumenstrom aus Schritt 3 über der Druckdifferenz aus Schritt 4 auftragen.
6. Power-Fit ermitteln (Kurve 3) und aus diesem den Volumenstrom für 50 Pa berechnen \Rightarrow Leakage durch Innenwand bei 50 Pa Druckdifferenz.

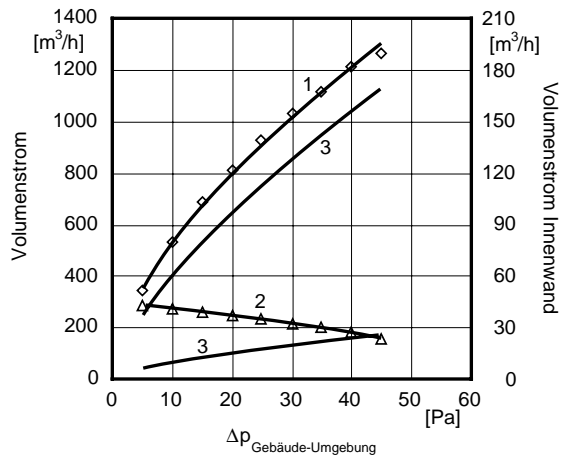


Bild 1: Auswertung einer Messung nach der Deduktions-Methode [8].

4 Quantifizierung serieller Leckagen

Unter seriellen Leckagen sind Leckagen zu verstehen, bei denen die Luft durch mindestens zwei voneinander unabhängige Schichten strömt. Als Beispiel sei die serielle Leckage 'Umgebung-Spitzboden-Beheiztes Volumen' genannt. Also eine Leckage durch das Dach sowie die Kehlbalkenlage. Derartige Leckagen weisen einige Eigenschaften auf, die es erlauben, anhand von Blower Door-Messungen in Verbindungen mit wenigen Zusatzdaten eine Vielzahl von Informationen über die Verbindung der Zonen und die Größe der Leckage zwischen den Zonen zu erhalten [6].

Die im folgenden beschriebenen Meßmethoden beruhen auf der Messung von Druckdifferenzen und Volumenströmen bzw. deren Änderung infolge zusätzlich geschaffener oder erweiterter Verbindungen zwischen zwei Zonen eines Gebäudes bzw. in einer der beiden durchströmten Schichten. Jede der vorgestellten Methoden erfordert also (mindestens) zwei Messungen.

4.1 Grundlagen

Ausgehend von der üblichen Näherungsgleichung für den Volumenstrom durch eine Leckage bzw. ein Bauteil

$$\dot{V} = C \Delta p^n \quad (2)$$

beruhen die im weiteren diskutierten Meßmethoden 'Opening A Door' ('OAD'), 'Adding A Hole' ('AAH') sowie die auf 'Adding A Hole' beruhende Erweiterung 'Adding A Hole Plus' ('AAH+') auf der Annahme, daß für eine Leckagekette, also der Durchströmung aufeinanderfolgender Hindernisse (beispielsweise die Kette 'Dach' - 'Kehlbalkenlage') der Zusammenhang

$$C \Delta p^n = konst. \quad (3)$$

oder, anders ausgedrückt

$$\frac{C_{12}}{C_{23}} = \left(\frac{\Delta p_{23}}{\Delta p_{12}} \right)^n \quad (4)$$

gilt. Der Volumenstrom durch die gesamte Leckagekette ist also stets kleiner als der Volumenstrom durch die Schicht mit dem größten Einzelwiderstand bei gleicher Druckdifferenz. Die mit einer Blower Door gemessenen Volumenströme sind stets die Volumenströme gesamter Leckageketten.

Es wird angenommen, daß die bei der Messung notwendige Änderung der Druckverhältnisse keine Rückwirkung auf die Leckagecharakteristik der untersuchten Hindernisse hat.

4.2 Nomenklatur und Randbedingungen

In Bild 2 und Tabelle 1 sind die im weiteren verwendeten Bezeichnungen und Annahmen bezüglich der Randbedingungen wiedergegeben.

Weitere Annahmen:

Bezeichner	Bedeutung
Δp_{HU}	= 50 Pa; Druckdiff. Gebäude/Umgeb.
n	= 0,65; Druckexponent der Leckagen
n_L	= 0,5; Druckexponent der Löcher
C_L	= $\sqrt{\frac{2}{\rho}}$; Leckagekoeffizient der Löcher
ρ	= Dichte der Luft
A_{L1}	= Fläche des kleinen Lochs in cm ²
A_{L2}	= Fläche des großen Lochs in cm ²

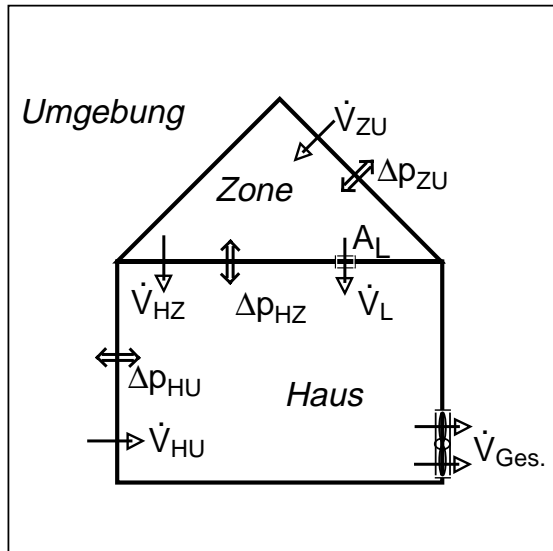


Bild 2: Bezeichnungen und Annahmen für die Meßmethoden 'Opening A Door', 'Adding A Hole' und 'Adding A Hole Plus' anhand des einfachen Beispiels eines Spitzbodens.

Tabelle 1: Randbedingungen der jeweils für die Methoden 'OAD', 'AAH' und 'AAH+' durchzuführenden Messungen.

Größe	Messung	OAD	AAH	AAH+
Δp_{HZ}	1	Δp_{HZ}	$\Delta p_{HZ,1}$	$\Delta p_{HZ,1}$
	2	0 Pa	$\Delta p_{HZ,2}$	$\Delta p_{HZ,2}$
Δp_{ZU}	1	Δp_{ZU}	$\Delta p_{ZU,1}$	$\Delta p_{ZU,1}$
	2	Δp_{HU}	$\Delta p_{ZU,2}$	$\Delta p_{ZU,2}$
A_L	1	0	0	$A_{L,1}$
	2	>>	A_L	$A_{L,2}$

4.3 "Opening A Door"

Ohne bauliche Veränderungen und mit geringem zusätzlichen Aufwand kann diese Methode für die Einschätzung von seriellen Leckagen durch Garagen, Keller, Dachböden und Abseiten, d. h. prinzipiell für alle abgeschlossenen Volumen mit Türe oder Luke angewendet werden [6]. Die Methode besteht aus den folgenden Schritten:

1. Bei einem Unterdruck von 50 Pa zwischen dem Haus und der Umgebung wird der Volumenstrom durch die Gebäudehülle sowie die Druckdifferenz zwischen dem Haus und der Zone bei geschlossener Klappluke bestimmt.
2. Die Türe/Klappluke zu der Zone wird geöffnet.
3. Der Volumenstrom durch die Gebäudehülle und die Außenbauteile der Zone wird bei einem Unterdruck

von 50 Pa bestimmt. Es ist darauf zu achten, daß tatsächlich $\Delta p_{HU} = 50$ Pa vorliegt und daß $\Delta p_{HZ} \approx 0$ Pa ist.

4. Die Volumenstromzunahme wird zu $\Delta \dot{V} = (\dot{V}_{\text{Gebäude} + \text{Zone}} \text{ (Schritt 3)} - \dot{V}_{\text{Gebäude}} \text{ (Schritt 1)})$ berechnet.
5. Mit der Druckdifferenz aus Schritt 1 und der Volumenstromzunahme gemäß Schritt 4 wird anhand von Gleichung 5 der Volumenstrom zwischen Haus und Zone ($\dot{V}_{HZ,50}$) berechnet.
6. Die Leckagen 'Zone zu Umgebung' bzw. 'Serienleckage' sind anhand der Gleichung 6 bzw. Gleichung 7 zu bestimmen.

Anhand des in Bild 2 dargestellten Ansatzes kann mit den angegebenen Randbedingungen und Annahmen die Bestimmungsgleichung für die Leckage leicht zu

$$\dot{V}_{HZ,50} = \frac{\Delta \dot{V}}{\Delta p_{HZ}^n \left(\frac{1}{\Delta p_{ZU}^n} - \frac{1}{\Delta p_{HU}^n} \right)} \quad (5)$$

erhalten werden. Der Volumenstrom $\dot{V}_{HZ,50}$ ist die Leckage durch das trennende Bauteil bei 50 Pa Druckdifferenz über dieses Bauteil. Gemäß Gleichung 4 können hieraus direkt die Leckagen $\dot{V}_{ZU,50}$ bzw. die Leckage durch die gesamte serielle Leckage bestimmt werden:

$$\dot{V}_{ZU,50} = \dot{V}_{HZ,50} \left(\frac{\Delta p_{HZ,1}}{\Delta p_{ZU,1}} \right)^n \quad (6)$$

$$\dot{V}_{FP,50} = \dot{V}_{HZ} \left(\frac{\Delta p_{HZ,1}}{\Delta p_{HU,1}} \right)^n \quad (7)$$

Um in der Anwendung dieser Methode ein gutes Ergebnis zu erzielen, sollte die Druckdifferenz zwischen dem Haus und der Zone gemäß Schritt 1 zwischen 15 und 40 Pa liegen.

4.4 "Adding A Hole"

Diese Meßmethode kann ebenfalls prinzipiell für Dachgeschoße, Spitzböden, Kniestöcke und auch kleinere Hohlräume angewendet werden. Dabei muß im Gegensatz zu "Opening A Door" keine Türe oder Klappe zu dem interessierenden Bereich führen. Es müssen jedoch gemäß der in [6] vorgestellten Version bauliche Veränderungen (Anbringen eines Lochs) vorgenommen werden. Diese Methode besteht aus den Schritten (vgl. Tabelle 1):

1. Bei einer Druckdifferenz zwischen dem Haus und der Umgebung von $\Delta p_{HU,1} = 50$ Pa werden die Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,1}$ und $\Delta p_{ZU,1}$ bestimmt. Hierbei ist zu beachten, daß $\Delta p_{HZ,1}$ mindestens 15 Pa beträgt und daß die Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,1}$ und $\Delta p_{ZU,1}$ in der Summe $\Delta p_{HU,1}$ ergeben.

2. Zwischen dem Haus und der Zone wird eine Verbindung (Loch) geschaffen. Anschließend muß sichergestellt werden, daß die Druckdifferenz zwischen Haus und Umgebung noch $\Delta p_{HU,1}$ beträgt.
3. Die Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,2}$ und $\Delta p_{ZU,2}$ sind zu bestimmen. Die Änderung von Δp_{HZ} sollte mindestens 10 Pa betragen (ggf. Loch vergrößern) und die verbliebene Druckdifferenz $\Delta p_{HZ,2}$ sollte mindestens 5 Pa betragen (ggf. Loch verkleinern).
4. Die Änderung der Druckdifferenz Δp_{HZ} wird bestimmt.
5. Die Fläche des Lochs wird ermittelt.
6. Mit den Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,1}$ und $\Delta p_{HZ,2}$ wird anhand von Gleichung 8 der Volumenstrom zwischen Haus und Zone $\dot{V}_{HZ,50}$ bestimmt.
7. Anhand der Gleichungen 9 bzw. 10 können die Leckagerate von der Umgebung zur Zone bzw. die Serien-Leckagerate bestimmt werden.
2. Ein vor Ort hergestelltes Loch kann für die Auswertung kaum präzise quantifiziert werden.
3. Bei der Meßmethode 'Opening A Door' kann häufig nach dem Öffnen der Verbindung die gewünschte Druckdifferenz $\Delta p_{HU} = 50$ Pa nicht mehr erreicht werden, da die äußere Leckage zu groß ist.
4. Es wird im allgemeinen Akzeptanz-Schwierigkeiten hervorrufen, will man ein Loch in eine Wand oder Decke schlagen. Ist keine Klappe oder Luke in dem zu untersuchenden Bauteil vorhanden, kann dies jedoch nicht vermieden werden.

Der Ansatz gemäß Bild 2 führt sofort zu der Bestimmungsgleichung

$$\dot{V}_{HZ,50} = \frac{A_L C_L \Delta p_{HU}^n}{\left(\frac{\Delta p_{HZ,1}^n}{\Delta p_{HZ,2}^n}\right) \left(\frac{\Delta p_{ZU,2}}{\Delta p_{ZU,1}}\right)^n - \Delta p_{HZ,2}^{(n-n_L)}} \quad (8)$$

für den Volumenstrom $\dot{V}_{HZ,50}$ und zu den Gleichungen

$$\dot{V}_{ZU,50} = \dot{V}_{HZ,50} \left(\frac{\Delta p_{HZ,1}}{\Delta p_{ZU,1}} \right)^n \quad (9)$$

$$\dot{V}_{FP,50} = \dot{V}_{HZ,50} \left(\frac{\Delta p_{HZ,1}}{\Delta p_{HU,1}} \right)^n \quad (10)$$

für die Volumenströme $\dot{V}_{ZU,50}$ und $\dot{V}_{FP,50}$, respektive.

Um in der Anwendung dieser Methode ein gutes Ergebnis zu erzielen, sollte die Druckdifferenz im Ausgangszustand $\Delta p_{HZ,1}$ (Schritt 1) zwischen 15 und 45 Pa liegen. Die Änderung der Druckdifferenz zwischen dem Haus und der Zone durch die Addition einer Leckage gemäß Schritt 2 soll zwischen 5 und 40 Pa betragen.

4.5 "Adding A Hole Plus"

Die oben beschriebenen Meßmethoden 'Opening A Door' und 'Adding A Hole' haben einige gravierende Schwächen, welche die Einsatzmöglichkeiten sehr einschränken. Die wichtigsten seien hier, in der Reihenfolge ihrer Gewichtung, kurz genannt:

1. Die in Abschnitt 4.3 in den Anmerkungen bzw. in Abschnitt 4.4 unter Punkt 1 und den Anmerkungen genannten Forderungen an die Druckdifferenzen sind in vielen für die Anwendung interessanten Fällen nicht erfüllt.

Insbesondere die Punkte 1 und 2 legen es nahe, die beschriebenen Meßmethoden zu erweitern. Eine solche Erweiterung wird im folgenden erläutert. Um für die Auswertung die Lochfläche genau zu kennen bietet es sich an, 'vorgefertigte Löcher', Lochblenden einzusetzen. Es ist hierbei eine Vorrichtung notwendig, die es erlaubt, ohne großen Aufwand die Fläche der Lochblende zu variieren. Um speziell die Druckdifferenz $\Delta p_{HZ,1}$ anpassen zu können, muß bereits im Ausgangszustand eine zusätzliche Leckage angebracht werden können. Auch hier liegt es nahe, vorgefertigte Lochblenden bekannter Fläche einzusetzen. Diese Vorgehensweise, auch im 'Ausgangszustand' bereits eine zusätzliche, definierte Leckage einzusetzen, wird im weiteren als 'Adding A Hole Plus (AAH+)' bezeichnet.

Der im Rahmen der hier beschriebenen Messungen eingesetzte Prototyp, der für das so abgeänderte AAH-Verfahren sowie für das neue AAH+-Verfahren notwendigen Vorrichtung, ist in Bild 3 zu sehen. Die Vorrichtung besteht aus einer luftdichten Plane mit Haltevorrichtung für kreisrunde Lochblenden und einem flexiblen Rahmen zum Befestigen der Plane in einer Öffnung (es kommt hier eine Sonderanfertigung des Aluminium-Rahmens der Fa. 'The Energy Conservatory' zum Einsatz, der mit wenigen zusätzlichen Mitteln auch eine Befestigung beispielsweise in Bodenluken erlaubt [10]). Ein Sortiment Lochblenden unterschiedlicher Durchmesser ergänzt die Vorrichtung. Die Lochblenden können durch Lösen der Verschraubung leicht ausgetauscht werden. Die gewählte Konstruktion kann als kostengünstige und flexible Lösung betrachtet werden.

Mit den in Bild 2 und Tabelle 1 festgelegten Bezeichnungen kann für die Bestimmung des gesuchten Volumenstroms anhand der Meßmethode

AAH⁺ Gleichung 8 sofort zu

$$\dot{V}_{HZ,50}^+ = \frac{C_{L2} A_{L2} \Delta p_{HU}^n}{\left(\frac{\Delta p_{HZ,1}^n}{\Delta p_{HZ,2}^n}\right) \left(\frac{\Delta p_{ZU,2}}{\Delta p_{ZU,1}}\right)^n - \Delta p_{HZ,2}^{(n-n_L)}} - \frac{C_{L1} A_{L1} \Delta p_{HU}^n \left(\frac{\Delta p_{HZ,1}}{\Delta p_{HZ,2}}\right)^{n_L} \left(\frac{\Delta p_{ZU,2}}{\Delta p_{ZU,1}}\right)^n}{\left(\frac{\Delta p_{HZ,1}^n}{\Delta p_{HZ,2}^n}\right) \left(\frac{\Delta p_{ZU,2}}{\Delta p_{ZU,1}}\right)^n - \Delta p_{HZ,2}^{(n-n_L)}} \quad (11)$$

erweitert werden. Für $A_{L1} \rightarrow 0$ geht Gleichung 11 in Gleichung 8 über.



Bild 3: Prototyp der Vorrichtung für die erweiterte Meßmethode 'Adding A Hole Plus'.

4.6 Fehlerbetrachtung

Die vorgestellten Meßmethoden beruhen auf der Bestimmung von Druckdifferenzen (alle), Volumenströmen (OAD) und Lochflächen (AAH, AAH⁺). Jeder Meßwert unterliegt einem mehr oder weniger großen Fehler. Allgemein gilt: Für eine Messung mit n unabhängigen Meßgrößen x_1, x_2, \dots, x_n mit den systematischen Fehlern δx_i der Meßgrößen x_i wird für die gesuchte abhängige Größe

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (12)$$

der maximale systematische Fehler zu

$$\Delta y_{max} = \sum |f_{x_i} \cdot \Delta x_i| \quad (13)$$

wobei $f_{x_i} = \delta f / \delta x_i$ ist [11].

Es kann also aus den partiellen Ableitungen der Gleichungen 5, 8 und 11, den Standardabweichungen der Meßwerte sowie den Sensorfehlern der zu erwartende maximale Fehler bestimmt werden.

5 Anwendung

Die Einsetzbarkeit der vorgestellten Meßmethoden, insbesondere die Überprüfung der erweiterten AAH-Methode "AAH⁺", wird anhand von Vergleichsmessungen am Versuchsgebäude des Fachgebiets Bauphysik der Universität Kassel vorgenommen. Eine Feldmessung gibt Aufschluß darüber, wie die Methoden in der Praxis einzusetzen sind.

5.1 Meßtechnik

Alle Messungen werden mit einer Blower Door 'Minneapolis Model 3' von 'The Energy Conservatory', Minneapolis durchgeführt. Zur Bestimmung der Druckdifferenzen werden Präzisions-Differenzdrucksensoren der Firma Ashcroft mit einer Genauigkeit von 0,25 % v.M.E. eingesetzt. Die Programme zur Meßwerterfassung und zum regeln der Ventilatoren basieren auf der Software 'LabVIEW' der Fa. National Instruments, München und werden mit einem handelsüblichen Laptop mit PCMCIA-I/O-Meßkarte, ebenfalls von der Fa. National Instruments, betrieben. Die eingesetzten Programme sowie der Aufbau der Zusatzhardware sind Entwicklungen des Fachgebiets Bauphysik der Universität Kassel [12].

Der zu betrachtende Gesamtfehler umfaßt neben den Sensorfehlern auch den Fehler durch Druckdifferenz-Schwankungen bei der Messung. Durch die rechnergestützte Meßwerterfassung ist es möglich, sehr viele Einzelwerte je Druckdifferenz zu bestimmen und damit eine Basis für aussagekräftige Mittelwerte und Standardabweichungen zur Verfügung zu haben. Anhand der Standardabweichung kann eine Abschätzung des Fehlerbereichs durchgeführt werden. Bei allen Messungen werden pro Druckstufe 350 Einzelwerte über einen Zeitraum von ca. 2 min ermittelt.

5.2 Vergleichsmessung

Versuchsmessungen im Klimahaus (Versuchsgebäude) des Fachgebiets Bauphysik sollen die anhand der vorgestellten Methoden erreichbare Genauigkeit abschätzen lassen. Es werden innen unterschiedliche Leckagen, die zuvor auf einem Laborprüfstand [13] vermessen werden und damit bekannt sind, eingebaut. Trennwände und -decken zwischen dem Meßraum und dem restlichen Gebäude können als luftdicht betrachtet werden. Die Meßergebnisse der durchgeführten Messungen sind in den Tabellen 2 und 3 zusammengefaßt dargestellt.

Gemäß Gleichung 13 sind in Tabelle 3 die folgenden Eingangsgrößen der diskutierten Meßmethoden mit ihren Abweichungen berücksichtigt:

- Sensorfehler und Standardabweichung der Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,i}$ und Δp_{HU} aus jeweils 350 Werten bei allen Methoden.
- zusätzlich der Fehler des Differenzdrucksensors zur Volumenstrombestimmung und die Standardabweichung der gemessenen Volumenströme bei OAD.

Naheliegender ist, gegenüber der in Gl. 5 bis 11 getroffenen Annahme, den Druckexponenten grundsätzlich zu $n=0,65$ anzusetzen, den für das jeweilige Gebäude ermittelten Druckexponenten zu verwenden. Der Einfluß dieser Änderung ist ebenfalls mit Fehlerbetrachtung in Tabelle 3 aufgeführt.

In Tabelle 4 sind die ermittelten Volumenströme mit ihrer prozentualen Abweichung wiedergegeben. Es wird deutlich, daß die Erweiterung der AAH Methode vom Ansatz her plausible Ergebnisse liefert und hinsichtlich der Genauigkeit im Bereich der original AAH- bzw. OAD-Methode liegt. Tendenziell sind die anhand der Meßmethode ermittelten Volumenströme eher etwas zu gering, was in der Praxis jedoch nicht notwendigerweise von Nachteil sein muß: Die Aussage des Verfahrens liegt auf der sicheren Seite, d.h. die untersuchten Leckagen werden nicht überbewertet. Wie Tabelle 4 zu entnehmen ist, empfiehlt es sich bei der AAH⁺-Methode, abweichend von den Originalmethoden, den tatsächlichen Druckexponenten für jedes Gebäude zu ermitteln und in der Auswertung anzusetzen. Ob sich diese Vermutung auch in der Praxis bestätigt, kann anhand der bisher durchgeführten Messungen nicht abschließend beurteilt werden.

Ein weiteres wichtiges Kriterium für gute Meßergebnisse mit der AAH⁺-Methode ist die Kalibrierung bzw. die genaue Fertigung der verwendeten Blenden. Vergleichsrechnungen zeigen, daß der durch eventuell vorhandene Toleranzen der tatsächlichen von den angenommenen Blendenflächen gemachte Fehler recht groß ist.

5.3 Feldmessung

Mit Messungen an einem Einfamilienhaus soll die Praxistauglichkeit der vorgestellten erweiterten Meßmethoden überprüft werden. Das gemessene Objekt ist ein ca. 30 Jahre altes Gebäude in Massivbauweise mit nachträglich ausgebautem Dachgeschoß. Die betrachteten Bereiche sind ein Zimmer im Dachgeschoß (Zone) und das restliche Gebäude (Haus, vgl. Bild 2). Die Wand zwischen dem DG-Zimmer und dem restlichen Gebäude ist Gegenstand der Untersuchung. Um eine weitere Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, werden in die betrachtete Wand für eine zweite Meßreihe zusätzliche Leckagen angebracht (2 kreisrunde Kanäle, $\varnothing_i=7,6$ cm, $l=12,5$ cm).

Tabelle 2: Bei der Vergleichsmessung am Klimahaus gemessene Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,i}$ für alle eingesetzten Blenden (Bl.) sowie die ermittelten Druckexponenten n .

Leckage	ohne Blende		Bl. 100 cm ²	Bl. 300 cm ²
	$\Delta p_{HZ,1}$ [Pa]	n [-]	$\Delta p_{HZ,i}$ [Pa]	$\Delta p_{HZ,i}$ [Pa]
Leckage 1 viel Wind	43,1 $\pm 1,1$	0,51	32,1 $\pm 1,0$	11,7 $\pm 0,7$
Leckage 1 wenig Wind	46,6 $\pm 0,3$	0,52	32,4 $\pm 0,5$	11,7 $\pm 0,3$
Leckage 2 wenig Wind	43,5 $\pm 1,0$	0,55	30,3 $\pm 0,5$	12,6 $\pm 0,4$
Leckage 3 viel Wind	40,6 $\pm 1,2$	0,61	30,8 $\pm 0,6$	14,9 $\pm 0,5$

In Tabelle 5 und 6 sind die Ergebnisse der Messungen zusammengefaßt. Wie für die Vergleichsmessungen sind die Eingangsgrößen der diskutierten Meßmethoden mit ihren Abweichungen (Sensorfehler und Standardabweichung) sowie der Einfluß des Druckexponenten mit Fehlerbetrachtung berücksichtigt.

Da bei diesem Gebäude keine bekannte Leckage vorhanden ist, können die Ergebnisse der einzelnen Messungen nur untereinander verglichen werden.

Der Vergleich der Ergebnisse miteinander zeigt, daß die Auswahl der Blenden und damit der sich einstellenden Druckdifferenzen bei der AAH⁺ aber auch bei der AAH Methode für die Genauigkeit der Ergebnisse ein entscheidender Faktor ist. Dies wird für die AAH⁺ Methode bei der Meßreihe 2 sehr deutlich. Ein im Vergleich mit den beiden anderen Methoden gutes Ergebnis liefert nur die Kombination der Blenden 200/300 cm². Diese Blendenkombination wird bei der Feldmessung zunächst durch Probieren ermittelt. Um eine gezielte Auswahl der optimalen Blendenkombination machen zu können ist die folgend dargestellte Vorgehensweise ('Rezept') zu empfehlen.

1. Volumenstrom \dot{V}_{Ges} und Druckdifferenz Δp_{HZ} bei Ausgangsbedingungen (kein Loch) bestimmen.
2. Falls vorhanden, Türe bzw. Klappe zu 'Zone' öffnen, erneut Volumenstrom bestimmen. Damit ist die maximale Größenordnung der Leckage bekannt.
3. Eine relativ große Blende einbauen, erneut $\Delta p_{HZ,0}$ bestimmen
4. Mit dieser Druckdifferenz und linearer Interpolation eine Blende bestimmen, mit der die Druckdifferenz $\Delta p_{HZ,1}$ zwischen 25 und 33 Pa liegt.
5. Mit dieser Blende $\Delta p_{HZ,1}$ bestimmen.

Tabelle 3: Meßergebnisse der Vergleichsmessungen am Klimahaus des Fachgebiets Bauphysik.

Alle Werte beziehen sich auf 50 Pa Druckdifferenz über die Referenzleckagen. Bei der AAH-Methode wird eine Blende mit 300 cm², bei der AAH⁺-Methode werden Blenden mit 100 und 300 cm² eingesetzt. Die Angaben in Prozent beziehen sich auf die ganz rechts angegebenen, im Labor gemessenen, Durchlässigkeiten der Referenzleckagen

	'Opening A Door' (OAD)						'Adding A Hole' (AAH)						'Adding A Hole Plus' (AAH ⁺)						Labor	
	n = 0,65			n _{ermittelt}			n = 0,65			n _{ermittelt}			n = 0,65			n _{ermittelt}				
	\dot{V}_{HZ} [m³/h]		%	\dot{V}_{HZ} [m³/h]		%	\dot{V}_{HZ} [m³/h]		%	\dot{V}_{HZ} [m³/h]		%	\dot{V}_{HZ} [m³/h]		%	\dot{V}_{HZ} [m³/h]		%		
Leckage 1 viel Wind	73	+44	151	114	+62	229	76	+26	132	111	+32	186	33	+39	93	77	+44	158	77	
		-34	51		-49	85		-25	67		-32	104		-33	-1		-38	52		
Leckage 1 wenig Wind	66	+23	116	102	+33	175	69	+11	104	99	+14	147	28	+18	60	68	+20	115	77	
		-20	60		-29	95		-11	75		-14	111		-17	14		-19	64		
Leckage 2 wenig Wind	114	+47	112	150	+58	146	123	+26	104	154	+29	127	95	+30	79	131	+32	113	143	
		-38	53		-48	72		-24	69		-28	88		-28	54		-29	71		
Leckage 3 viel Wind	202	+81	122	222	+87	133	205	+41	106	221	+43	114	155	+45	86	171	+47	94	232	
		-65	59		-70	65		-37	73		-39	78		-39	50		-41	56		

Tabelle 4: 'Tatsächliche' Meßergebnisse und Abweichungen der Vergleichsmessungen am Klimahaus des Fachgebiets Bauphysik. Alle Werte beziehen sich auf 50 Pa Druckdifferenz über die Referenzleckagen. Bei der AAH-Methode wird eine Blende mit 300 cm², bei der AAH⁺-Methode werden Blenden mit 100 und 300 cm² eingesetzt. Die Abweichung in Prozent bezieht sich auf die ganz rechts angegebenen, im Labor gemessenen, Durchlässigkeiten der Referenzleckagen.

	'Opening A Door' (OAD)				'Adding A Hole' (AAH)				'Adding A Hole Plus' (AAH ⁺)				Labor
	n = 0,65		n _{ermittelt}		n = 0,65		n _{ermittelt}		n = 0,65		n _{ermittelt}		V _{ref.} [m ³ /h]
	V _{HZ}	Abw.	V _{HZ}	Abw.	V _{HZ}	Abw.	V _{HZ}	Abw.	V _{HZ}	Abw.	V _{HZ}	Abw.	
	[m ³ /h]	[%]	[m ³ /h]	[%]	[m ³ /h]	[%]	[m ³ /h]	[%]	[m ³ /h]	[%]	[m ³ /h]	[%]	
Leckage 1 (viel Wind)	73	-5	114	+48	76	-1	111	+44	33	-57	77	±0	77
Leckage 1 (wenig Wind)	66	-14	102	+33	69	-10	99	+29	28	-64	68	-12	77
Leckage 2 (wenig Wind)	114	-20	150	+2	123	-14	154	+8	95	-34	131	-8	143
Leckage 3 (viel Wind)	202	-13	222	-4	205	-12	221	-5	155	-33	171	-26	232

Tabelle 5: Bei der Feldmessung gemessene Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,i}$ für alle eingesetzten Blenden (Bl.) und die ermittelten Druckexponenten n .

Leckage	ohne Blende		Bl. 100 cm ²	Bl. 200 cm ²	Bl. 300 cm ²
	$\Delta p_{HZ,1}$ [Pa]	n [-]	$\Delta p_{HZ,i}$ [Pa]	$\Delta p_{HZ,i}$ [Pa]	$\Delta p_{HZ,i}$ [Pa]
Meßr. 1	48,8 ±0,4	0,64	42,0 ±0,3	30,9 ±0,5	23,5 ±0,3
Meßr. 2	41,4 ±0,5	0,63	33,8 ±0,4	24,0 ±0,3	18,3 ±0,3

6. Anhand von Gleichung 11 überprüfen, ob die Druckdifferenzänderung $\Delta(\Delta p) = \Delta p_{HZ,1} - \Delta p_{HZ,0}$ möglich ist. Ist dies der Fall, kann $\Delta p_{HZ,0}$ zu $\Delta p_{HZ,2}$ gesetzt werden und direkt die Auswertung erfolgen. Ist dies nicht der Fall, muß eine weitere Messung mit geeigneter Blende, welche zwischen derjenigen aus Schritt 3 und der aus Schritt 5 liegt, erfolgen. Hierbei ist zu beachten, daß die Differenz zwischen den freien Flächen der Blenden möglichst groß sein sollte.

Mit diesem 'Rezept' können die durchzuführenden Messungen auf ein Minimum reduziert werden.

Da der gesuchte Leckagevolumenstrom bei der Feldmessung nicht wie bei der Vergleichsmessung bekannt ist, können selbstverständlich auch keine Aussagen über die absolute Genauigkeit der ermittelten Volumenströme gemacht werden. Die Meßergebnisse zeigen jedoch im gegenseitigen Vergleich, daß bei Wahl eines "optimalen Bereichs" für die jeweilige Methode eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt wird. Die Leckage durch die untersuchte Wand bei 50 Pa Druckdifferenz kann für die Bedingungen der ersten Messung zu ca. 60 - 80 m³/h, für die zweite Messung zu ca. 200 - 250 m³/h bestimmt werden. Für die AAH⁺ Methode sollte eine Vielzahl von Blenden mit unterschiedlichen Flächen zu Verfügung stehen, um die Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,1}$ und $\Delta p_{HZ,2}$ möglichst frei einstellen zu können.

6 Zusammenfassung

Die Bestimmung der Luftdichtheit der Gebäudehülle mit der Blower Door kann mit geringem technischen Aufwand als 'Qualitätskontrolle' der Gebäudehülle bzw. Luftdichtheitsschicht eingesetzt werden. Mit vertretbarem Mehraufwand können im Rahmen einer Blower Door-Messung insbesondere im Gebäudebestand viele zusätzliche Informationen, vor allem quantitative Aussagen zu einzelnen Leckagewegen, gewonnen werden.

Tabelle 6: Ergebnisse der Feldmessung mit der OAD-, der original AAH- sowie der AAH⁺-Methode. Alle Werte beziehen sich auf 50 Pa Druckdifferenz über die betrachteten Leckagen.

	'Opening A Door' (OAD)			Meßreihe			'Adding A Hole' (AAH)			'Adding A Hole Plus' (AAH ⁺)		
	$n = 0,65$	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	$n = 0,65$	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	$n = 0,65$	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	$n = 0,65$	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]	\dot{V}_{HZ} [m ³ /h]
Messung 1	61	+40 -42	+41 -44	74	+54 -52	76	+55 -53	10	+22 -21	14	+22 -21	
				60	+34 -40	62	+36 -42					
				61	+33 -40	63	+33 -42	77	+76 -62	82	+76 -62	
Messung 2	252	+53 -47	+55 -49	294	+66 -53	303	+68 -55	160	+30 -28	169	+30 -28	
				232	+32 -30	240	+33 -31					
				235	+28 -27	244	+29 -27	257	+98 -79	268	+99 -80	

Die Meßmethoden 'Opening A Door', 'Adding A Hole' sowie 'Adding A Hole Plus' eignen sich für alle Bereiche eines Gebäudes und sind mit nur einem Blower Door-System durchführbar. An zusätzlichen Meßgeräten ist prinzipiell nur ein Differenzdrucksensor notwendig. Die vorgestellten Meßergebnisse zeigen, daß die hier dargestellten Meßmethoden gut geeignet sind, im Rahmen von Luftdichtheitsmessungen zusätzliche Informationen zu erhalten. Der gewählte Ansatz, die Meßmethode AAH in ihrer Flexibilität zu erweitern, ist prinzipiell richtig und wird weiter verfolgt. Die Auswertung zahlreicher Messungen und durchgeführte Fehlerbetrachtungen legen den Schluß nahe, daß alle erweiterten Meßverfahren nur dann mit einer hinreichenden Genauigkeit und Reproduzierbarkeit durchführbar sind, wenn

- hochgenaue Differenzdrucksensoren eingesetzt werden,
- eine wegen der Genauigkeit erforderliche große Anzahl an Einzelmeßwerten aufgenommen wird und
- die eingesetzten Blenden/Löcher (AAH, AAH⁺) mit geringer Toleranz gefertigt sind.

Für die AAH⁺-Methode gilt zusätzlich

- eine hinsichtlich der Druckverhältnisse "optimale" Blendenkombination gewählt wird.

Die präzise Bestimmung der benötigten Druckdifferenzen erfordert i.d.R. die Regelung des Gebläses und die Erfassung der Meßwerte über ein Laptop mit Datenerfassungskarte und entsprechender Software. Präzisions-Differenzdrucksensoren sind zu empfehlen. Die mit der beschriebenen Hardware gewonnene Möglichkeit, über eine oder mehrere Minuten Meßdauer Mittelwerte zu bilden und damit immer vorhandene, kurzfristige Druckschwankungen der Druckdifferenzen zu glätten, erhöht die Genauigkeit der Messung erheblich und ermöglicht eine zuverlässige Fehlerabschätzung.

Vergleichsmessungen zeigen, daß mit den vorgestellten Methoden i.d.R. ein Vertrauensbereich von ca. ± 30 bis 40% zu erreichen ist. Wie Tabelle 4 zu entnehmen ist, liegt die tatsächliche Abweichung meist jedoch unter 20%. Vor dem Hintergrund, daß es keine alternative Möglichkeit gibt, mit vergleichbar geringem Aufwand die gesuchten Daten zu erhalten, erscheint dies akzeptabel. Die diskutierte Anpassung des Druckexponenten an den jeweils gemessenen Wert führt bei AAH⁺ zu einer Annäherung der Meßergebnisse an den tatsächlichen Wert. Die Verbesserung der Meßmethoden, insbesondere die Verringerung der Meßunsicherheit, wird durch weitere Arbeiten angestrebt.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn. *Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden*, Januar 1996.
- [2] Enquête-Kommission des Deutschen Bundestages. *Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre*. Techn. ber., 3. Bericht, Bonn, 1990.
- [3] DIN V 4108 "Wärmeschutz im Hochbau", Teil 7 "Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen", Vornorm, November 1996.
- [4] Hauser, G. und Maas, A. *Auswirkungen von Fugen und Fehlstellen in Dampfsperren und Wärmedämmschichten*. Deutsche Bauzeitschrift 24 (1992), H. 1, S. 97–100.
- [5] Geißler, A. und Hauser, G. *Luftdichtheit von Holzhäusern*. bauen mit holz (Juli 1996), H. 7, S. 562–568.
- [6] Blasnik, M. und Fitzgerald, J. *In Search of the Missing Leak*. Home Energy (November/December 1992), 6.
- [7] Roulet, C. und Vandaele, L. *Air flow patterns within buildings measurement techniques*. Techn. Ber. 34, AIVC, Dec 1991.
- [8] Feustel, H. *Measurements of Air Permeability in Multizone Buildings*. Energy and Buildings 14 (1990), S. 103–116.
- [9] Roulet, C. und Vandaele, L. *Air flow patterns within buildings measurement techniques*. Techn. Ber. 34, AIVC, Dec 1991. Appendix 4.
- [10] Bolender, T. *Erweiterte Blower Door-Meßmethoden*. Projektarbeit II, Weiterbilden der Studiengang Energie und Umwelt, Universität Gh Kassel, Fachgebiet Bauphysik, 1996–97.
- [11] Beitz, W. und Küttner, K.-H., Edn. *Taschenbuch für den Maschinenbau/Dubbel*, 15. korrigierte u. ergänzte Auflage Ed. Springer Berlin; Heidelberg; NewYork; Tokyo, 1983.
- [12] Hauser, G. und Geißler, A. *Entwicklung eines Meßsystems zur Bestimmung der Luftdichtheit von Bauteilen in situ*. Bauphysik 17 (1995), H. 4, S. 111–114.
- [13] Hauser, G. und Geißler, A. *Untersuchung der Luftdichtheit von Holzverschalungen*. Bauphysik 17 (1995), H. 6, S. 189–193.