

# Blower Door-Meßtechnik – Der Leckageverteilung auf der Spur<sup>1</sup>

Monika Hall, Achim Geißler<sup>2</sup>

## Zusammenfassung

Der Begriff Blower Door-Test bzw. Luftdichtheitsmessung ist momentan aufgrund der künftigen Energieeinsparverordnung ein brandaktuelles Thema. Jedoch betrifft die Problematik der Luftdichtheit nicht nur den Neubaubereich, sondern sie gilt auch für den Gebäudebestand. Gerade im Gebäudebestand ist es wichtig zu wissen, wie sich die Leckagen auf die einzelnen Gebäudebereiche bzw. Trennbauteile verteilen. Nur wenn die Leckageverteilung in einem Gebäude bekannt ist, kann mit gezielten Abdichtmaßnahmen eine Verbesserung der Luftdichtheit erreicht werden.

Für die Bestimmung der Leckageverteilung haben sich die bekannten Blower Door-Meßmethoden 'Opening A Door', 'Adding A Hole', 'Guard Zone' und 'Deduktion' bewährt. Die Anwendungsmöglichkeiten der Meßmethoden sind jedoch eingeschränkt bzw. die erhaltene Information ist in manchen Fällen nicht detailliert genug. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Methoden zu erweitern. Im folgenden wird eine Weiterentwicklung der Opening A Door-Methode vorgestellt und am Beispiel eines Reiheneinfamilienhauses mit zwei Wohneinheiten mit den Methoden Standard-Opening A Door, Guard Zone und Deduktion verglichen. Die Meßergebnisse zeigen, daß die Genauigkeit der erweiterten Anwendung der Opening A Door-Methode den Standard-Anwendungen entspricht. Mit der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode ist ein Werkzeug geschaffen, mit dem der mögliche Detaillierungsgrad der Information über die Leckageverteilung in einem Gebäude im Gegensatz zu den bislang verwendeten Methoden deutlich erweitert wird.

## 1 Problemstellung

Bei Luftdichtheitsmessungen von Gebäuden mit einem oder mehreren Blower Door-Systemen kann ein integraler Wert über das gesamte Gebäude oder über einzelne Gebäudebereiche bestimmt werden. Für die Untersuchungen von einzelnen Räumen oder Gebäudebereichen stehen die Meßmethoden 'Opening A Door' (OAD), 'Adding A Hole' (AAH), 'Guard Zone' (GZ) und 'Deduktion' (DD) zur Verfügung [1, 2, 3, 4]. Diese Methoden sind in ihrer Anwendung darauf beschränkt, daß der untersuchte Bereich nur *eine wesentliche* Verbindung zum restlichen Gebäude aufweisen darf (Fall a, Bild 1), d.h. der untersuchte Bereich (Zone) – in Bild 1 beispielsweise als Spitzboden oder Keller dargestellt – darf nur *eine wesentliche* Leckage aufweisen, entweder zum Haus oder zur Abseite (Zone 2). Bestehen wesentliche Verbindungen der untersuchten Zone zu zwei unterschiedlichen Gebäudebereichen, z.B. weist die Zone Verbindungen zum Haus und zur Zone 2 auf, dann führt die Anwendung der Standard-Methoden zu fehlerhaften Ergebnissen (Bild 1b, c). Die Undichtheiten der einzelnen Trennbauteile können bei den Fällen b und c nur noch mit der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode ermittelt werden.

## 2 Herleitung der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode

Der Einsatz der Opening A Door-Methode ist in Bild 1 beispielhaft am Spitzboden und Keller dargestellt. Für zwei Räume im Wohnbereich oder zwei benachbarte Wohnungen kann die Methode analog angewendet werden. In Bild 2 sind die Leckageverteilungen aus Bild 1 in einer neutralen Form skizziert, anhand derer die 'Erweiterung' der Opening A Door-Methode allgemeingültig beschrieben wird.

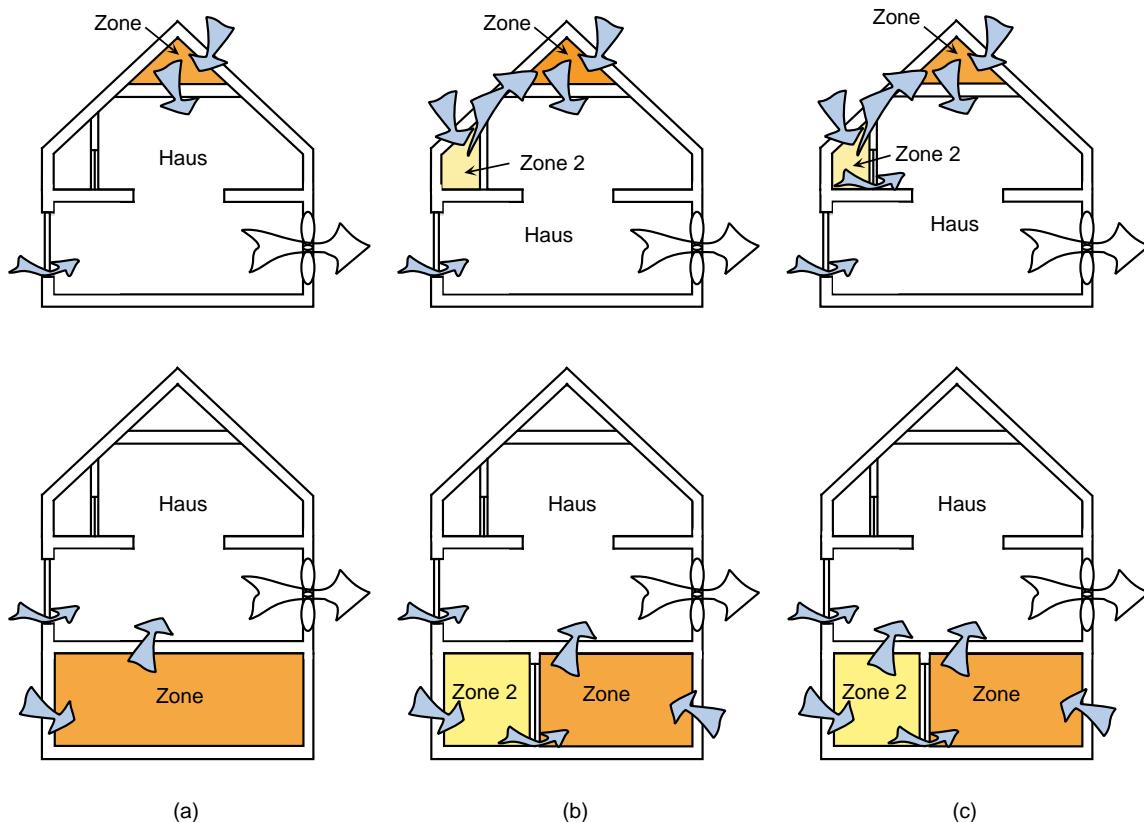
In den meisten Fällen können die Volumenströme über die einzelnen Trennbauteile nicht direkt bestimmt werden. Sie werden für eine bestimmte Gebäudepräparation aus den Druckdifferenzen, die meßtechnisch über einzelne Gebäudebereiche erfaßt werden sowie dem vom Ventilator geförderten Volumenstrom, für eine bestimmte Druckdifferenz zwischen Gebäude und Umgebung berechnet. Jeder gesuchte Volumenstrom stellt eine unbekannte Variable dar. Um diese bestimmen zu können, ist es notwendig,

<sup>1</sup>Die dieser Veröffentlichung zugrundeliegende Meßmethode wurde im Rahmen des AiF-Forschungsprojektes, AZ: 11402N, über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., München, durch Förderung aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft, entwickelt.

<sup>2</sup>Dipl.-Ing., Dipl.-Oec. Monika Hall, Dr.-Ing. Achim Geißler, Universität Gesamthochschule Kassel, Gottschalkstr. 28, 34109 Kassel.

Monika Hall – 1991 Diplom als Chemie-Ingenieurin an der TH Karlsruhe, 1996 Diplom als Ökonomin (FH) an der Univ. Gh Kassel, seit 1998 Wissenschaftliche Mitarbeiterin des Fachgebietes Bauphysik der Univ. Gh Kassel.

Achim Geißler – 1990 Diplom als Chemie-Ingenieur an der TH Karlsruhe, 1998 Promotion an der Univ. Gh Kassel, Fachbereich Architektur, seit 1992 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Fachgebietes Bauphysik der Univ. Gh Kassel.



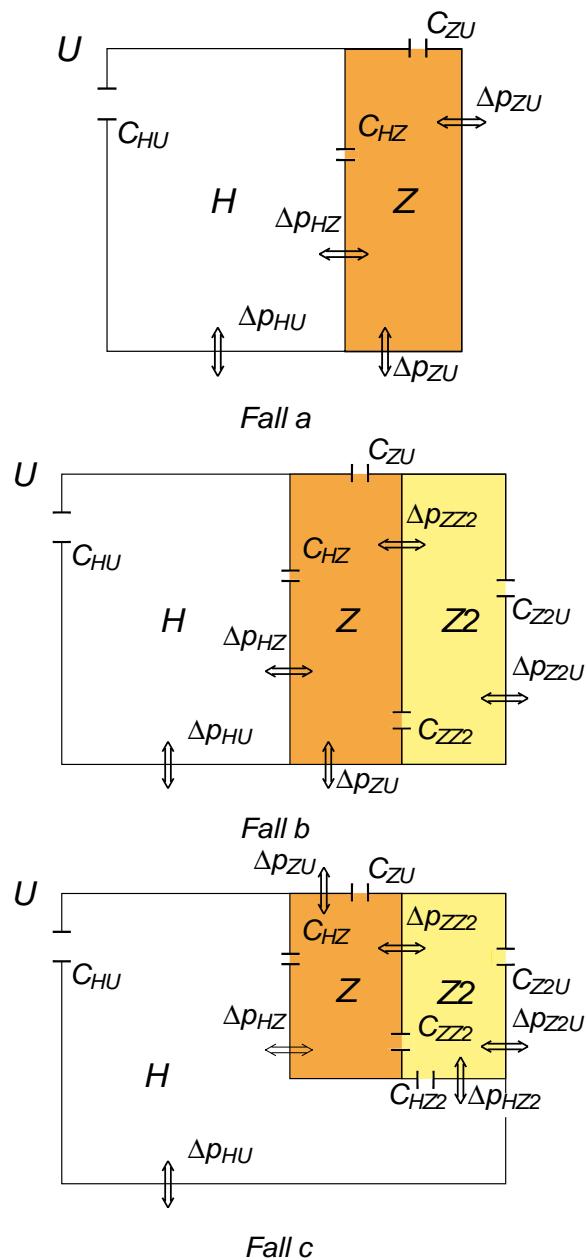
**Bild 1:** Schematische Darstellung der Verteilung der Leckagen für die Anwendung der Standard- (Fall a) sowie der 'Erweiterten'- (Fall b, c) Opening A Door-Methode für die Bereiche Spitzboden und Keller.

mehrere Messungen mit unterschiedlicher Gebäudepräparation durchzuführen. Die Grundlage zur Bestimmung der Volumenströme über die einzelnen Trennbauteile bildet die übliche Näherungsgleichung

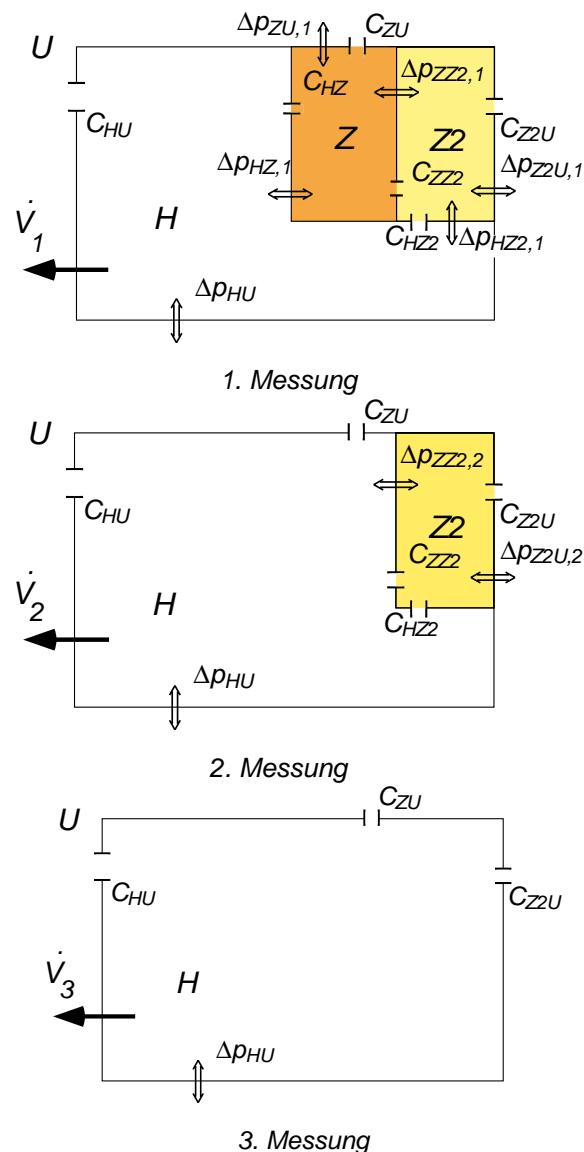
$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1)$$

mit C: Leckagekoeffizient in  $[\text{m}^3/(\text{h Pa}^n)]$ ,  $\Delta p$ : Druckdifferenz über das Trennbauteil in [Pa] und dem Druckexponent n: 0,65 [-]. Die Problematik bei der Ermittlung der einzelnen Volumenströme liegt in der Bestimmung des Leckagekoeffizienten C. Ist der Leckagekoeffizient über ein Trennbauteil bekannt, kann der Leckagevolumenstrom für beliebige Druckdifferenzen über das Trennbauteil berechnet werden.

Die folgende Herleitung der Opening A Door-Methode ist für die Fälle a, b und c gültig. Hierbei muß beachtet werden, daß sich bei Fall c die Strömungsrichtung des Leckagevolumenstroms über das Trennbauteil zwischen Zone (Z) und Zone 2 (Z 2) in Abhängigkeit von den Leckagekoeffizienten  $C_{ZU}$ ,  $C_{ZZ_2}$ ,  $C_{HZ}$ ,  $C_{Z2U}$  und  $C_{HZ_2}$  umkehren kann. Meßtechnisch läßt sich die Richtung des Volumenstroms über die Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ,1}$  und  $\Delta p_{HZ_2,1}$  erfassen. Ist das Verhältnis  $\frac{\Delta p_{HZ_2,1}}{\Delta p_{HZ,1}} > 1$ , strömt der Leckagevolumenstrom von Zone 2 in die betrachtete Zone. Ist das Verhältnis kleiner 1, ist die Strömungsrichtung umgekehrt. Für die Fälle a und b, bei denen weniger Leckagen vorhanden sind, müssen in den genannten Gleichungen entsprechend die Leckagekoeffizienten zu 'Null' gesetzt werden. Für alle Messungen gilt  $\Delta p_{HU} = \text{konst.}$ , z.B. 50 Pa. Der Druckexponent n wird üblicherweise für die Auswertung zu 0,65 gesetzt.



**Bild 2:** Allgemeingültige Darstellung der Druckdifferenzen und Verteilung der Leckagen für die Anwendung der Standard- (Fall a) bzw. 'Erweiterten'- (Fall b, c) Opening A Door-Methode.



**Bild 3:** Schematische Darstellung der drei Messungen der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode für Fall c.

Für Fall a gilt

$$C_{ZZ2} = C_{Z2U} = C_{HZ2} = 0$$

und für Fall b

$$C_{HZ2} = 0$$

Die 'Erweiterte'-Opening A Door-Methode für Fall c umfaßt drei Messungen mit unterschiedlicher Gebäudepräparation (Bild 3). Es ergeben sich die Gleichungen

$$\dot{V}_1 = C_{HU} \cdot \Delta p_{HU}^n + C_{ZU} \cdot \Delta p_{ZU,1}^n + C_{Z2U} \cdot \Delta p_{Z2U,1}^n \quad (2)$$

$$\dot{V}_2 = (C_{HU} + C_{ZU}) \cdot \Delta p_{HU}^n + C_{Z2U} \cdot \Delta p_{Z2U,2}^n \quad (3)$$

$$\dot{V}_3 = (C_{HU} + C_{ZU} + C_{Z2U}) \cdot \Delta p_{HU}^n \quad (4)$$

Hieraus ergibt sich

$$C_{Z2U} = \frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_2}{\Delta p_{HU}^n - \Delta p_{Z2U,2}^n} \quad (5)$$

und damit für  $C_{ZU}$

$$C_{ZU} = \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1}{\Delta p_{HU}^n - \Delta p_{ZU,1}^n} + C_{Z2U} \frac{\Delta p_{Z2U,1}^n - \Delta p_{Z2U,2}^n}{\Delta p_{HU}^n - \Delta p_{ZU,1}^n} \quad (6)$$

und für  $C_{HU}$

$$C_{HU} = \frac{\dot{V}_1 - C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n - C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,1}^n}{\Delta p_{HU}^n} \quad (7)$$

Aus den zusätzlichen Randbedingungen der Messungen 1 und 2

$$\dot{V}_1 = C_{HU} \Delta p_{HU}^n + C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n + C_{HZ2} \Delta p_{HZ2,1}^n \quad (8)$$

$$C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n = (C_{ZZ2} + C_{HZ2}) \Delta p_{ZZ2,2}^n \quad (9)$$

sowie der folgenden Bedingung, bei der unterschieden werden muß in

1.  $\Delta p_{HZ,1} < \Delta p_{HZ2,1}$  und für die Fälle a und b

$$C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n + C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (10)$$

und

2.  $\Delta p_{HZ,1} > \Delta p_{HZ2,1}$

$$C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n - C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (11)$$

lassen sich  $C_{ZZ2}$ ,  $C_{HZ2}$  und  $C_{HZ}$  herleiten.

$$C_{ZZ2} = \frac{C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n + C_{HU} \Delta p_{HU}^n - \dot{V}_1 + C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n \left( \frac{\Delta p_{HZ2,1}}{\Delta p_{ZZ2,2}} \right)^n}{\Delta p_{HZ2,1}^n - \Delta p_{ZZ2,1}^n} \quad (12)$$

$$C_{HZ2} = C_{Z2U} \left( \frac{\Delta p_{Z2U,2}}{\Delta p_{HZ,1}} \right)^n - C_{ZZ2} \quad (13)$$

$$C_{HZ} = C_{ZU} \left( \frac{\Delta p_{ZU,1}}{\Delta p_{HZ,1}} \right)^n \pm C_{ZZ2} \left( \frac{\Delta p_{ZZ2,1}}{\Delta p_{HZ,1}} \right)^n \quad (14)$$

In Gleichung 14 gilt

- '+' für  $\Delta p_{HZ,1} < \Delta p_{HZ2,1}$  und generell für Fall b,
- '-' für  $\Delta p_{HZ,1} > \Delta p_{HZ2,1}$ ,
- für Fall a entfällt der zweite Term.

Aus den Gleichungen 5, 6, 7, 12, 13 und 14 können die Volumenströme für die Randbedingungen von Messung 1 sofort zu

$$\dot{V}_{ZU,1} = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n \quad (15)$$

$$\dot{V}_{ZZ2,1} = C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (16)$$

$$\dot{V}_{HZ,1} = C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n \quad (17)$$

$$\dot{V}_{Z2U,1} = C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,1}^n \quad (18)$$

$$\dot{V}_{HZ2,1} = C_{HZ2} \Delta p_{HZ2,1}^n \quad (19)$$

$$\dot{V}_{HU} = C_{HU} \Delta p_{HU}^n \quad (20)$$

bestimmt werden. Die Kenntnis der einzelnen Leckagekoeffizienten bietet die Möglichkeit, die Volumenströme auch für andere Druckdifferenzen zu berechnen.

### 3 Validierung der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode

Am Versuchshaus des Fachgebiets Bauphysik der Universität Gh Kassel wird die Opening A Door-Methode für die Fälle a, b und c untersucht. Das Versuchshaus wird so präpariert, daß die Randbedingungen der Messungen durch kalibrierte Leckagen festgelegt werden. Die genaue Beschreibung der Randbedingungen und der Meßergebnisse sind [5] zu entnehmen. Die Meßergebnisse zeigen, daß die meisten der gesuchten Volumenströme unter den Randbedingungen von Messung 1 (vgl. in Bild 3 1. Messung) und dem Bereich der Druckdifferenz von  $5 \text{ Pa} < \Delta p_{ZZ2,1} < 45 \text{ Pa}$  eine Genauigkeit besser als  $\pm 25\%$  aufweisen.

### 4 Feldmessung der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode

Die Feldmessung der 'Erweiterte'-Opening A Door-Methode wird an einem Reiheneinfamilienhaus durchgeführt. Keller, Erd- und Dachgeschoß sind in Massivbauweise, die Kehlbalkenlage sowie das Dach in Holzbauweise errichtet. Der Keller ist unbeheizt und mit Stahlkellerfenstern ausgerüstet. Im Erd- und Obergeschoß befindet sich je eine separate Wohnung. Das Treppenhaus ist vom Keller bis zur Kehlbalkenlage offen. In der Kehlbalkenlage befindet sich im Bereich des Treppenhauses eine Spitzbodenluke. Die Luftdichtheitsebene und die Dämmung sind im Dach bis zum First verlegt. Die Kehlbalkendecke ist ebenfalls gedämmt und es sind Folienteile zu erkennen (Bild 4a). In der Dachfläche ist die Folie mit einem doppelseitigen Klebeband ohne mechanische Sicherung verlegt (Bild 4b). Die Befestigung der Folie an der Fuß- und Firstpfette erfolgt ohne Verklebung mittels Dachlatten. Im Giebelbereich ist die Folie ohne Streckmetall o.ä. eingeputzt.

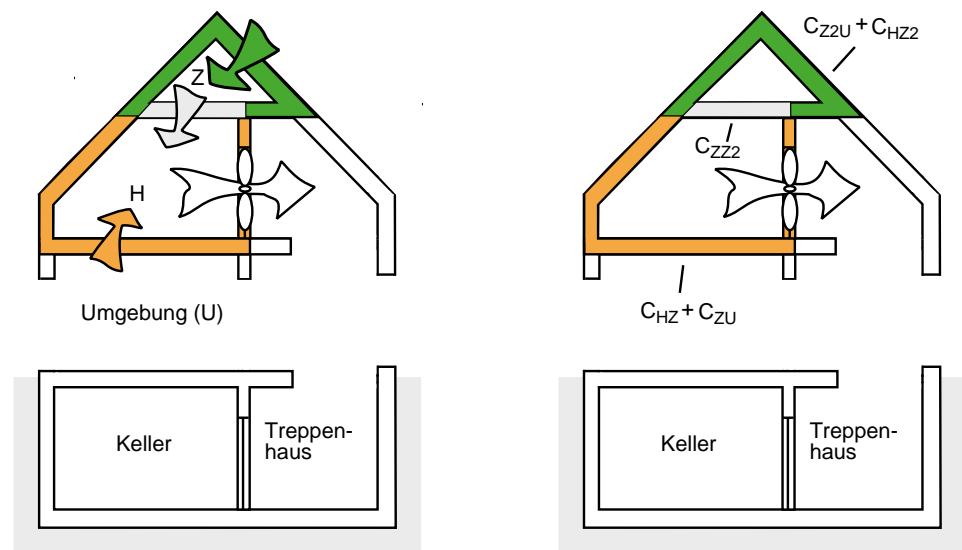


(a) Kehlbalkenlage

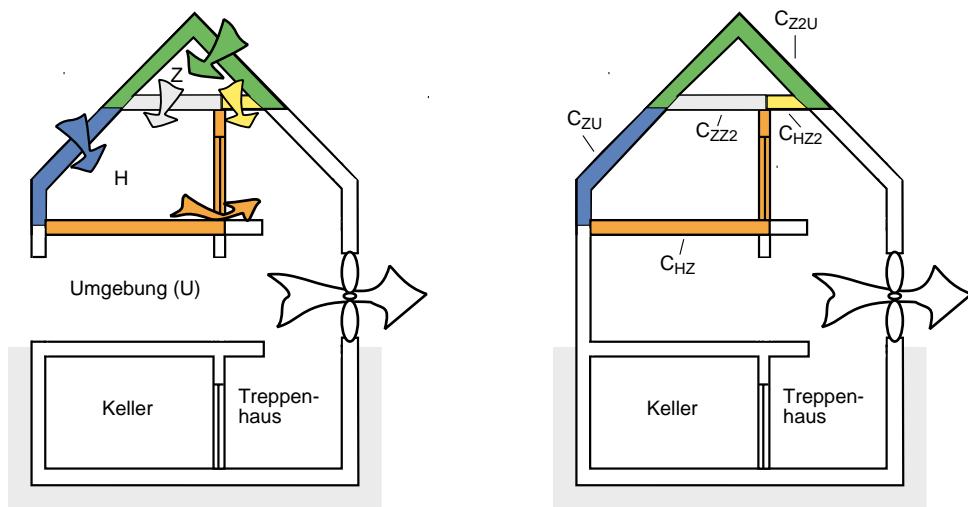
(b) Spitzboden

**Bild 4:** Verarbeitung der Folie in der Kehlbalkenlage und im Spitzboden.

Die Methoden Standard- bzw. 'Erweiterte'-Opening A Door, Guard Zone und Deduktion werden im Rahmen ihrer Möglichkeiten auf die Wohnung im Dachgeschoß und den Spitzboden angewendet (Bilder 5-7). Bild 5 zeigt die Anwendungsmöglichkeit der Standard-Opening A Door-Methode. Die in Bild 6 gezeigte Situation wird mit der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode überprüft. Vergleichend werden die bekannten Methoden Guard Zone und Deduktion auf die Wohnung im Dachgeschoß angewendet (Bild 7). Es kann angenommen werden, daß keine Verbindungen zu den Nachbargebäuden bestehen. Die ermittelten Leckagekoeffizienten sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

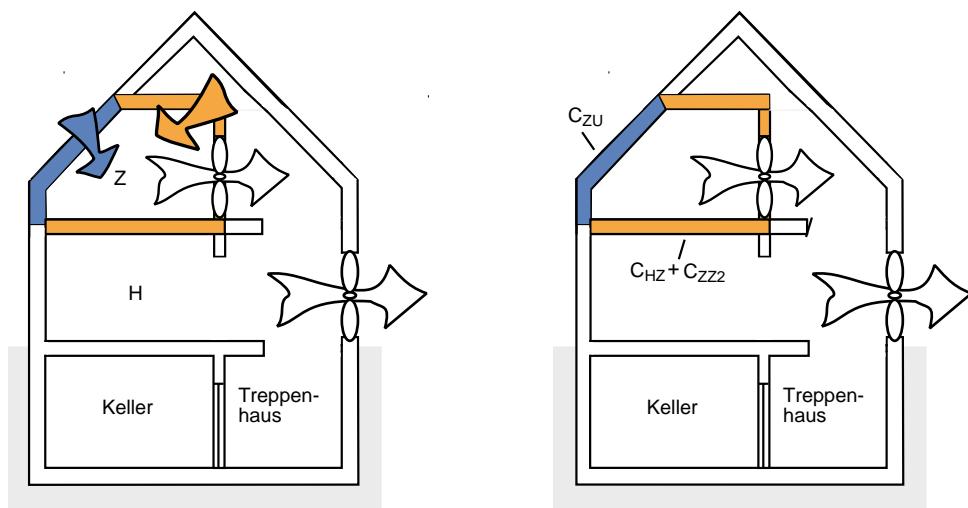


**Bild 5:** Anwendung und Nomenklatur der Methode Standard-Opening A Door.



**Bild 6:** Anwendung und Nomenklatur der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode.

Die 'Erweiterte'-Opening A Door-Methode bietet, im Gegensatz zu den anderen Methoden, die Möglichkeit, die Leckagekoeffizienten von fünf verschiedenen, einzelnen Trennbauteilen zu bestimmen. Mit allen anderen Methoden können weniger Leckagekoeffizienten und zum Teil auch nur Kombinationen von Trennbauteilen ermittelt werden. Im Vergleich der Leckagekoeffizienten nimmt  $C_{ZZ2}$  den größten Wert an, d.h. die Kehlbalkendecke im Bereich der Dachgeschoßwohnung weist die größte Undichtigkeit im Gebäude auf. Die Methoden Standard- und 'Erweiterte'-Opening A Door liefern ein vergleichbares Ergebnis für  $C_{ZZ2}$ . Die Leckagekoeffizienten aus den Methoden Standard-Opening A Door, Guard Zone und Deduktion, die sich aus Kombination von einzelnen Trennbauteilen ergeben, zeigen mit den Summen der einzelnen Leckagekoeffizienten über die Trennbauteile aus der 'Erweiterten'-Opening A Door-Methode eine gute Übereinstimmung. Die Meßmethoden sind im Rahmen ihrer An-



**Bild 7:** Anwendung und Nomenklatur der Guard Zone- und Deduktion-Methode.

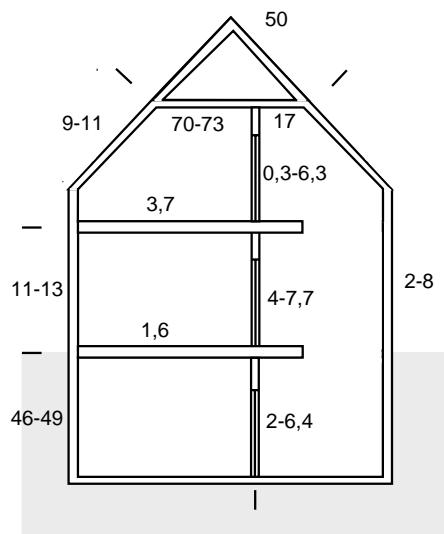
**Tabelle 1:** Zusammenstellung der ermittelten Leckagekoeffizienten für die Dachgeschoßwohnung und den Spitzboden ( $\Delta p_{HU} = 50 \text{ Pa}$ ,  $n = 0,65$ ).

Methode	Trennbauteil	Leckagekoeffizient C [ $\text{m}^3/(\text{h Pa}^n)$ ]
Standard OAD, Bild 5	ZU + HZ	14±0,6
	Z2U + HZ2	69±3
	ZZ2	73±3,1
Erweiterte OAD, Bild 6	Z-U	11±0,5
	HZ	4±0,4
	ZZ2	70±6,2
	HZ2	17±1,7
	Z2U	50±2,2
Guard Zone, Bild 7	ZU	9±0,3
Deduktion, Bild 7	ZU	9±0,3
	HZ + ZZ2	83±0,4

wendungsmöglichkeiten gleichwertig einsetzbar.

Die Messungen zeigen, daß die Kehlbalkendecke ( $C_{ZZ2}$ ) keine luftdichte Ebene bildet und damit die Dachgeschoßwohnung über Leckagen an den Spitzboden angeschlossen ist. Die Luftdichtheitsschicht im Dach ( $C_{Z2U}$ ) ist fehlerhaft ausgeführt, so daß über das Dach eine deutlich größere Anbindung der Wohnung an die Umgebung besteht, als über ihre Außenwände ( $C_{ZU}$ ). Die Anbindung der Dachgeschoßwohnung zur Wohnung im Erdgeschoß und zum Treppenhaus ( $C_{HZ}$ ) ist vernachlässigbar gering.

Werden o.g. Methoden auch auf die Bereiche Keller und Erdgeschoßwohnung angewendet, erhält man die Leckagekoeffizienten über verschiedene Trennbauteile im gesamten Gebäude. In Bild 8 sind Bereiche der Leckagekoeffizienten dargestellt, die sich aus der Anwendung der verschiedenen Meßmethoden ergeben. Vergleicht man die Undichtheiten der Wohnungen im Erd- und Dachgeschoß miteinander, so ist die Dachgeschoßwohnung deutlich undichter als die Erdgeschoßwohnung.



**Bild 8:** Ermittelte Bereiche für die Leckagekoeffizienten von Teilbereichen des untersuchten Reihenhauses ( $C$  in  $\text{m}^3/(\text{h Pa}^n)$ ).

Aufgrund dieser Leckageverteilung können gezielt Abdichtmaßnahmen ergriffen werden. Bei diesem Gebäude sollte entweder die Kehlbalkenlage oder das Dach abgedichtet werden. Die Gebäudeplanung sieht vor, daß die Luftdichtheitsebene bis zum First verläuft, da der Spitzboden evtl. später als Wohnraum ausgebaut werden soll. Soll dies verwirklicht werden, ist es sinnvoll, das Dach abzudichten. Wird der Spitzboden nicht genutzt, sollte die Kehlbalkendecke abgedichtet werden. Bei beiden Varianten sollte auch auf die Abdichtung der Kehlbalkendecke an den Stirnseiten, sowie auf einen luftdichten Anschluß der Spitzbodenluke an die Kehlbalkendecke geachtet werden. Die Undichtheiten im Keller sind hauptsächlich eine Folge der Stahlkellerfenster. Ein Austausch der Fenster rundet die Abdichtmaßnahmen ab.

### Bezeichnung

U	=	Umgebung
H	=	Haus
Z	=	Zone
Z2	=	Zone 2
$\Delta p$	=	Druckdifferenz [Pa]
C	=	Leckagekoeffizient [ $\text{m}^3/(\text{h Pa}^n)$ ]
n	=	Druckexponent der Leckagen, 0,65 [-]
$\dot{V}$	=	Volumenstrom [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]

### Literatur

- [1] Wouters, P., L'Heureux, D. und Voordecker, P. *Advanced single fan pressurization*. In Proceedings of the Measurement Technique Workshop (March 1988).
- [2] Geißler, A., Bolender, T. und Hauser, G. *Blower Door-Messungen - erweiterte Meßmethoden*. Heizung Lüftung Haustechnik 48 (1997), H. 5, S. 24–31.
- [3] Blasnik, M. und Fitzgerald, J. *In Search of the Missing Leak*. Home Energy (November/December 1992), 6.
- [4] Hall, M., Geißler, A. und Hauser, G. *Handbuch zur Durchführung von Blower Door-Messungen - Erweiterte Meßmethoden*. Abschlußbericht AiF-Forschungsvorhaben 11402N Teil 2, Fachgebiet Bauphysik der Universität Gh Kassel, April 2000. [www.bpy.uni-kassel.de](http://www.bpy.uni-kassel.de).
- [5] Hall, M., Geißler, A. und Hauser, G. *Quantifizierung einzelner Leckagen und Leckagewege bei Gebäuden in Holzbauweise*. Abschlußbericht AiF-Forschungsvorhaben 11402N Teil 1, Fachgebiet Bauphysik der Universität Gh Kassel, April 2000. [www.bpy.uni-kassel.de](http://www.bpy.uni-kassel.de).