

**UNIVERSITÄT GESAMTHOCHSCHULE KASSEL**  
**FACHGEBIET BAUPHYSIK**  
**UNIV.-PROF. DR.-ING. GERD HAUSER**

**Quantifizierung einzelner Leckagen und  
Leckagewege bei Gebäuden in Holzbauart**

von

Dipl.-Ing. M. Hall  
Dr.-Ing. A. Geißler  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Hauser

**Abschlußbericht – Teil 1**

**April 2000**

AIF–Forschungsvorhaben Nr. 11402N

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Dachkonstruktion</b>	<b>3</b>
2.1	Einführung . . . . .	3
2.2	Spezialgefache . . . . .	4
2.3	Verklebungen von Folienstößen und -anschlüssen . . . . .	5
2.3.1	Allgemeines . . . . .	5
2.3.2	Klebung der Folienüberstände . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Eingesetzte Meßtechnik und Grundlagen der Auswertung</b>	<b>11</b>
3.1	Eingesetzte Meßtechnik . . . . .	11
3.2	Mathematische Grundlagen der Auswertung . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Meßtechnische Untersuchungen</b>	<b>13</b>
4.1	Beschreibung der untersuchten Fälle . . . . .	13
4.2	Festlegung der Randbedingungen . . . . .	14
4.3	Herstellung der Leckagen . . . . .	16
4.4	Auswertung Fall 1 . . . . .	18
4.4.1	Allgemeines . . . . .	18
4.4.2	Ergebnisse der Standard-Meßmethoden . . . . .	20
4.4.3	Fehlinterpretation . . . . .	30
4.4.4	Ergebnisse mit der erweiterten Opening A Door-Methode	32
4.5	Auswertung Fall 2 . . . . .	36
<b>5</b>	<b>in situ-Meßgerät</b>	<b>40</b>
5.1	Einführung . . . . .	40
5.2	Prinzip des in situ-Meßgeräts . . . . .	40
5.3	Spaltnmessungen . . . . .	42
5.4	Konstruktion des neuen in situ-Meßgeräts . . . . .	45
5.4.1	Anforderungen an die Konstruktion . . . . .	45
5.4.2	Befestigung am Untergrund . . . . .	46

---

5.4.3	Abdichtung des in situ-Gerätes an den Untergrund . . .	46
5.4.4	Anschluß der Druckentnahme und Luftzu- bzw. -abfuhr	46
5.4.5	Meßgeräte und Meßwerterfassung . . . . .	48
5.5	Anlauf- und Regelverhalten des neuen in situ-Meßgerätes . .	48
5.5.1	Einführung . . . . .	48
5.5.2	Anlaufverhalten bei Deduktion, Doppelkammer . . . .	49
5.5.3	Anlaufverhalten bei Deduktion, Einzelkammer . . . . .	50
5.5.4	Druckgleichheit der Kammern bei Deduktion . . . . .	51
5.6	Experimentelle Untersuchungen mit dem neuen in situ-Meßgerät	51
5.6.1	Allgemeines . . . . .	51
5.6.2	in situ-Meßgerät als Doppelkammer . . . . .	51
5.6.3	in situ-Meßgerät als kompensierendes Volumenstrom- meßgerät . . . . .	52
5.7	Einsatz des in situ-Gerätes . . . . .	53
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>55</b>
6.1	Meßmethoden . . . . .	55
6.2	In situ-Meßgerät . . . . .	57
<b>A</b>	<b>Herleitung Fall 1</b>	<b>59</b>
<b>B</b>	<b>Herleitung Fall 2, Zone 2 - Zone</b>	<b>60</b>
<b>C</b>	<b>Herleitung Fall 2, Zone - Zone 2</b>	<b>61</b>
<b>D</b>	<b>Bild- und Tabellenverzeichnis</b>	<b>77</b>

# 1 Einleitung

Bislang gibt es kaum Möglichkeiten, im Rahmen von Blower Door-Messungen einzelne Leckagen zu quantifizieren, d.h. es kann nur ein Gesamtwert für alle vorhandenen Leckagen bestimmt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens 'Untersuchung der Luftdichtheit von Holz äusern' wurde seitens der Bauherren wiederholt die Quantifizierung einzelner Leckagen gewünscht. Es konnten aber nur vereinzelt Geb äudebereiche sowie in wenigen Fällen Bauteile grob quantifiziert werden [1]. Insbesondere im Dachbereich fehlen bislang geeignete, hinreichend flexible Methoden, Teilleckagen zu quantifizieren.

Für die Quantifizierung der Luftdichtheit einzelner Geb äudebereiche werden im ersten Teil des Projektes zur Schaffung von soliden Grundlagen die bekannten Methoden Opening A Door, Adding A Hole, Guard Zone und Deduktion auf ihre Anwendungsgrenzen untersucht. Es wird erarbeitet, unter welchen Bedingungen mit welcher Methode die sichersten Ergebnisse erhalten werden. Hierfür werden Vergleichsmessungen im Dachbereich eines Versuchsgebäudes unter bekannten Randbedingungen durchgeführt. Um die Möglichkeit zu haben, konkrete Randbedingungen einzustellen wurde das vorhandene Versuchshaus umgebaut bzw. erweitert. Ein neuer Dachaufbau wurde entsprechend den Anforderungen des Projektes konzipiert und errichtet.

Die Leckagen von einzelnen Bauteilen sollen im zweiten Teil des Projektes mit Hilfe eines in situ-Meßgerätes quantifiziert werden. Ein Meßsystem zur Bestimmung der Luftdichtheit von Bauteilen in situ wurde im Rahmen eines früheren Forschungsvorhabens als Prototyp bereits entwickelt [2]. Ausgehend von dem älteren Prototypen wird in diesem Projekt ein flexibles Meßsystem entwickelt, mit dem die Quantifizierung beliebiger einzelner Leckagen möglich ist. Das neue Gerät bietet die Möglichkeit an Flächen und in Eck- und Kantenbereichen eingesetzt zu werden. Es kann sowohl als Doppelkammer, als auch als Einzelkammer in Kombination mit z.B. einer Blower Door als kompensierendes Volumenstrommeßgerät verwendet werden. Neben Laborversuchen wird auch die Tauglichkeit im Feld überprüft.

In bezug auf Luftdichtheitsmessungen mit der Blower Door wird mit den durchgeführten Messungen ein 'Werkzeugkasten' für die Geb äudeanalyse zusammengestellt. Ausgehend von o.g. meßtechnischen Untersuchungen werden für verschiedene Geb äudesituationen Lösungswege aufgezeigt, wie Teilleckagen im Rahmen von Blower Door-Messungen quantifiziert werden können. Detaillierte Beschreibungen der Vorgehensweise bei Luftdichtheitsmessungen an Holzhäusern im Bestand, beispielsweise als Grundlage für geplante Sanierungen, werden erarbeitet. Sie ermöglichen es dem Anwender, vor Ort die bauliche Situation einzuschätzen und auf dieser Grundlage jeweils die bestgeeignete Methode auszuwählen. Diese Informationen werden in einem separaten Handbuch [3] zusammengestellt.



## 2 Dachkonstruktion

### 2.1 Einführung

Für die Quantifizierung von Leckagen und Leckagewege im Dachbereich wird auf dem Versuchshaus des Fachgebietes Bauphysik der Universität Kassel ein neues Dach errichtet. Dieses Dach ist ein Satteldach in Holzleichtbauweise. Bild 1 zeigt die Maße des Daches.

Volumina:

Dach gesamt: 95 m<sup>3</sup>

Dachraum: 78,3 m<sup>3</sup>

Spitzboden: 16 m<sup>3</sup>

Abseite: 0,7 m<sup>3</sup>

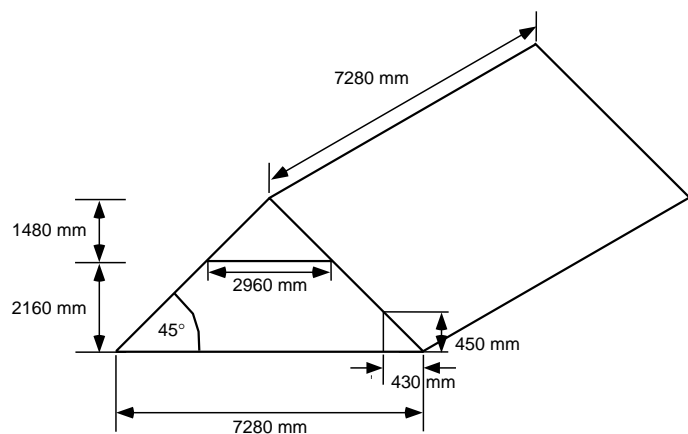


Bild 1: Maße und Volumina des Daches.



Bild 2: Montage des neuen Daches auf dem vorhandenen Versuchsgebäude.

Das Dach besteht aus 14 Elementen, die montagefertig angeliefert werden. Die Geschoßdecke, die Dachflächen und die Kehlbalenlage bestehen jeweils aus 3 Elementen. Die beiden Giebelwände werden je an einem Stück

gefertigt. Durch den hohen Grad an Vorfertigung sind die Montagearbeiten vor Ort auf ein Minimum reduziert (Bild 2).

Je Dachfläche sind zwei und je Giebelwand eine Öffnung angeordnet (Bild 3). In diese Öffnungen werden nach Bedarf kalibrierte Leckagen für die meßtechnischen Untersuchungen angebracht (externe Leckagen). Neben diesen sechs Möglichkeiten zur Leckageanordnung in der Dachhülle kann der Innenbereich des Daches in bis zu drei Zonen unterteilt werden: Dachgeschoß, Spitzboden und Abseite. Die Kehlbalkenlage, die Abseite als auch die Geschoßdecke haben je zwei Öffnungen, in die kalibrierte Leckagen eingebaut werden können (interne Leckagen).

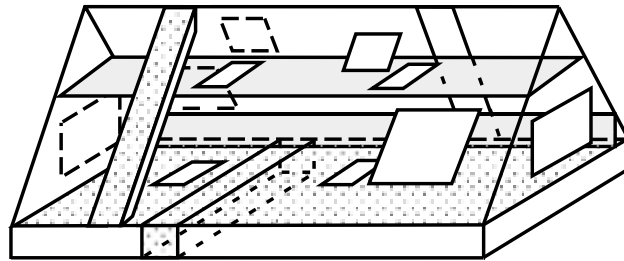


Bild 3: Schematische Darstellung des Daches

Je zwei spezielle Gefache in der Geschoßdecke und in den Dachflächen bieten die Möglichkeit, zusätzliche Verbindungen zwischen Spitzboden und Abseite bzw. Spitzboden und Dachgeschoß herzustellen sowie eine Durchströmung der Geschoßdecke zu realisieren.

Durch die beschriebene, erreichte Flexibilität bei der Anordnung und Ausbildung der Leckagen in der Außenhülle und in den Trennbautteilen der einzelnen Zonen wird die Untersuchung von verschiedenen Leckagen und Leckagewege möglich.

Die Luftdichtheitsschicht bei der gewählten Dachkonstruktion ist eine Polyethylen (PE)-Folie (Bild 4). Die Folienstöße werden mit einseitigem Klebeband [4] verklebt. Eine mechanische Sicherung der Klebungen mit einer Anpreßplatte wird nicht vorgenommen, um die Klebestellen jederzeit überprüfen zu können.

## 2.2 Spezialgefache

Zwei Gefache in der Dachfläche und Geschoßdecke werden luftdicht ausgeführt, um definierte Leckagen zwischen Spitzboden und Abseiten bzw. in die Geschoßdecke einbringen zu können. Der Gefachquerschnitt ist, wie in

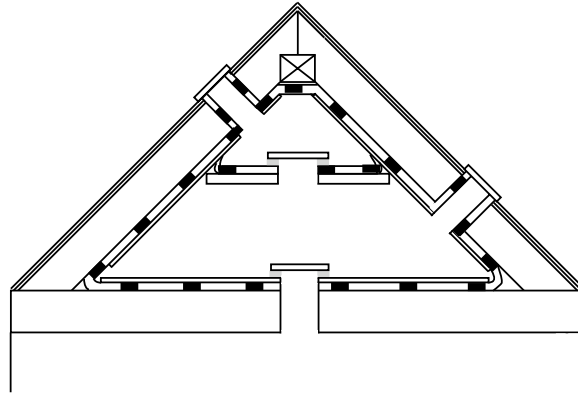


Bild 4: Verlauf der Luftdichtungsschicht.

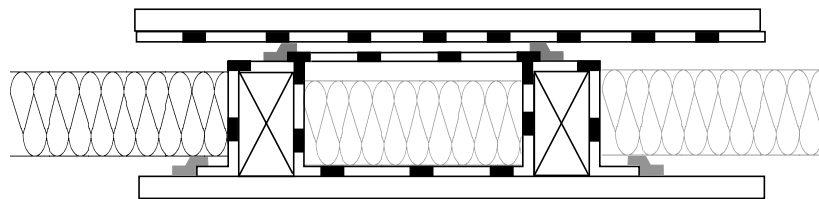


Bild 5: Schematische Darstellung eines Schnitts durch ein Gefach.

Bild 5 dargestellt ausgebildet. Die PE-Folie ist zwischen und über die Sparren bzw. Balken verlegt und mit einem 'Deckel' versehen. An den Stirnseiten ist die Folie analog verarbeitet.

Durch diese Art der Folienerlegung sind die Gefache luftdicht und von den anderen Gefachen abgeschlossen. Es ist gewährleistet, daß nur über die eingebrachten Soll-Leckagen Luft in das bzw. aus dem Gefach strömen kann.

## 2.3 Verklebungen von Folienstößen und -anschlüssen

### 2.3.1 Allgemeines

An jedem Dachelement steht die Folie an alle Stirnseiten ca. 20 cm über (Bild 6). Dieser Folienerstand wird nach der Dachrichtung von Mitarbeitern des Fachgebiets Bauphysik verklebt. Dadurch ist gewährleistet, daß das Dach luftdicht ist.



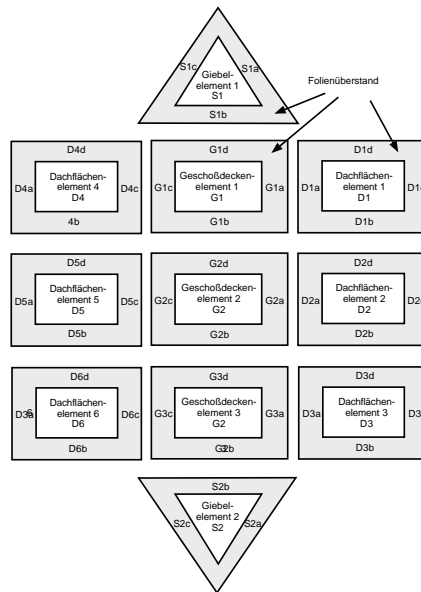


Bild 6: An allen Stirnseiten der Dachelementen steht die Folie ca. 20 cm über.



Bild 7: Die temporäre Befestigung der überstehenden Folie für den Transport und die Montage ist mit einem Pfeil gekennzeichnet.

Während der Verklebung werden folgende Punkte festgestellt:

- Die verwendete Folie wurde bei der Fertigung der Dachelemente von einer Rolle abgewickelt und verarbeitet. Die Breite der Folienbahnen ist größer als die Rollenlänge, so daß die Folie im gefalteten Zustand auf der Rolle aufgerollt ist. Diese Falten sind sehr dauerhaft. Wenn die Falten beim Verkleben glattgestrichen werden, bilden sie sich im Laufe der Zeit wieder aus und das Klebeband löst sich an entsprechender Stelle ab (Bild 8). Hierdurch entstehen Leckagen.
- Falten im Klebeband, die bei der Herstellung des Klebebandes entstanden sind, können beim Kleben glattgestrichen werden, bilden sich aber nach einiger Zeit wieder aus und es entstehen Leckagen.
- Ist das verwendete Klebeband sehr elastisch, dann muß darauf geachtet werden, daß es bei der Verarbeitung nicht zu sehr gedehnt wird. Nach einiger Zeit zieht sich das Klebeband wieder zusammen und löst sich von der Folie und bildet Leckagen (Bild 9).

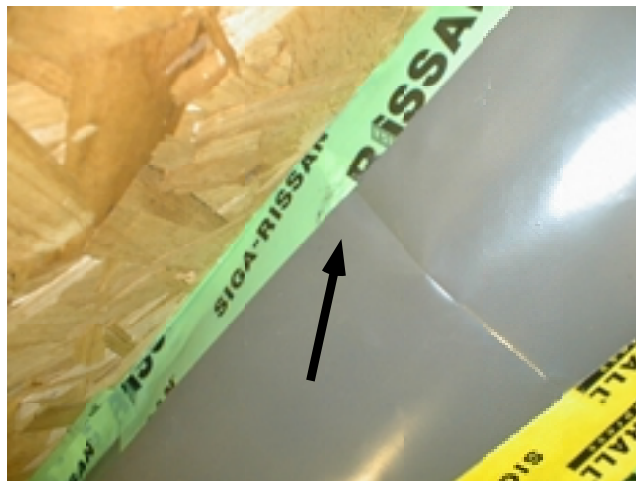


Bild 8: Nach einiger Zeit löst sich das Klebeband an der Knickstelle von der Folie ab.

### 2.3.2 Klebungen der Folienüberstände

Auf die Verklebung der Folienüberstände wird ein besonderes Augenmerk gelegt.

Während an den Stoßkanten der einzelnen Elemente nur zwei Folienüberstände miteinander zu verkleben sind (Bild 10), sind es in den Ecken sechs.

Die folgenden Bilder zeigen, wie die Folienüberstände in den Eckbereichen verklebt sind. Bei der Darstellung werden hauptsächlich nur die relevanten

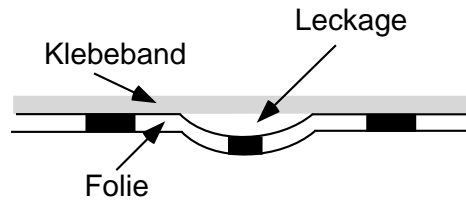


Bild 9: Nach einiger Zeit löst sich das Klebeband in denjenigen Bereichen von der Folie ab, in denen es bei der Anbringung sehr stark gedehnt wurde.

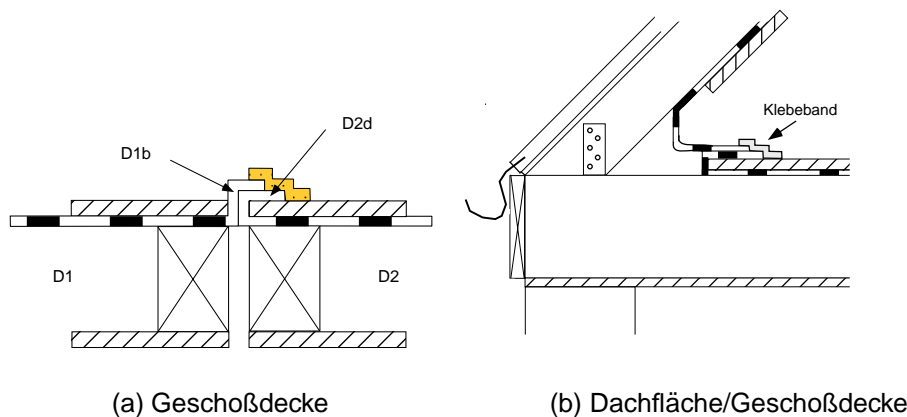


Bild 10: Anschlußbereich von zwei Elementen. Hier überlappen nur zwei Folien.

Folienausschnitte und ihre raumseitigen Hartfaserplatten gezeigt. Daher besteht z.B. der Giebel "nur" aus Hartfaserplatte und Folie.

Zuerst werden die Folienüberstände S1a und S1b des Giebels gefaltet (Bild 11). Im Eckbereich wird S1b zum Giebel eingeschlagen und bildet zusammen mit S1a eine "Tasche".

Anschließend werden die Folienüberstände G1a und G1d des Geschoßdeckenelements, wie in Bild 12 dargestellt ist, gefaltet und mit der Folie des Giebels verklebt. G1d wird an den Giebel geklappt und G1a auf die Geschoßdecke umgeschlagen. Mit Klebeband werden die Folien an den Giebel geklebt.

Bild 13 zeigt den Anschluß der Folienüberstände des Dachelements an den Giebel. Der Folienüberstand D1d wird auf den Giebel, D1a auf die Geschoßdecke gefaltet. Die überschüssige Folie im Eckbereich wird eingeschlagen. Alle Folienstöße werden mit Klebeband verklebt. Einen ausgeführten Anschluß zeigt Bild 14.

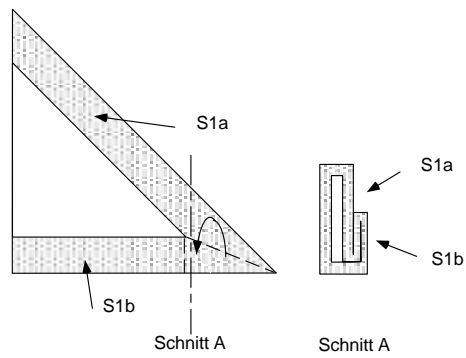


Bild 11: Die Folienüberstände S1a und S1b des Giebels S1 werden auf die Giebelfläche gefaltet.

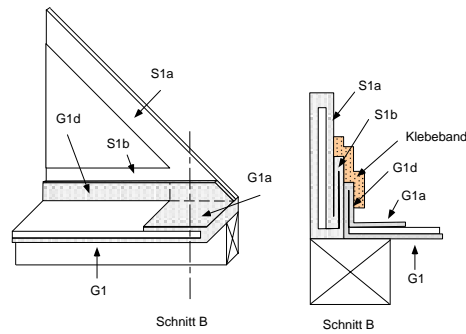


Bild 12: Die Folienüberstände des Geschosdeckenelements werden gefaltet und mit der Folie des Giebels verklebt.

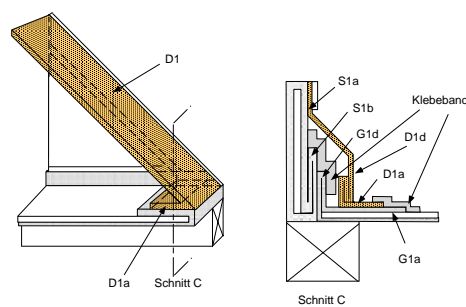


Bild 13: Die Folienüberstände des Dachelements werden auf die Giebel- und auf die Geschosdeckenfläche gefaltet und mit der Folie des Giebels und der Geschosdecke verklebt.



Bild 14: Eckanschluß Giebel/Geschoßdecke/Dachfläche vor Ort. Die Querlatten sind der Anschlag für die Abseitenwand.

## 3 Eingesetzte Meßtechnik und Grundlagen der Auswertung

### 3.1 Eingesetzte Meßtechnik

Der durchzuführende Vergleich von Meßwerten setzt eine hohe Genauigkeit der einzelnen Messungen voraus. Als hierbei nicht beeinflussbare Einflußgrößen sind die meteorologischen Randbedingungen der einzelnen Messungen zu sehen. Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes eingesetzten Blower Door-Systeme werden zur Erreichung einer größtmöglichen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit mit einer rechnergesteuerten Regelung und Meßwernerfassung sowie Präzisions-Differenzdrucksensoren erweitert (Bild 15). Die Regelung der Ventilatoren und das Auslesen der Meßgeräte erfolgt über einen handelsüblichen Laptop mit PCMCIA-Datenerfassungskarte (DAQ, Data-Aquisition). Es kommen für alle Messungen dieselben Ventilatoren (dieselbe Volumenstrombestimmung) zum Einsatz. Die eingesetzte Meß- und Regelungssoftware ist eine eigene Entwicklung des Fachgebietes Bauphysik der Universität Kassel und basiert auf dem Programm LabVIEW (National Instruments, München). Für die im Rahmen dieser Un-



Bild 15: Rechnergesteuertes Meßwernerfassungs- und Regelsystem für Blower Door-Messungen. Weiterentwicklung des in [2] beschriebenen Meßsystems.

tersuchung eingesetzten Meßgeräte sind in Tabelle 1 die Herstellerangaben zur Genauigkeit zusammengefaßt.

Tabelle 1: Herstellerangaben über die Genauigkeit der einzelnen zum Einsatz gebrachten Meßgeräte.

Meßgerät	Meßbereich	rel. Fehler	abs. Fehler
Differenzdrucksensor	0 ... 60 Pa	$\leq 0,25\%$ v.M.E.	0,15 Pa
Differenzdrucksensor	0 ... 100 Pa	$\leq 0,25\%$ v.M.E.	0,25 Pa
Differenzdrucksensor	0 ... 220 Pa	$\leq 0,25\%$ v.M.E.	0,55 Pa
DAQ-Karte PCMCIA	0 ... 10 V	0,025%	-
Volumenstrombestimmung	0 ... 10000 m <sup>3</sup> /h	3% d.A.	-
Volumenstrombestimmung	0 ... 2000 m <sup>3</sup> /h	3% d.A.	-
Volumenstrombestimmung	0 ... 70 m <sup>3</sup> /h	$\leq 0,5\%$ d.A.	-

### 3.2 Mathematische Grundlagen der Auswertung

In der Regel wird bei Luftdichtheitsmessungen eine Druckdifferenz-Volumenstrom-Kennlinie für ein Gebäude bzw. Gebäudebereich aufgenommen. Hierzu werden für die ermittelten Meßwert-Paare  $(\Delta p_i, \dot{V}_i)$  die Koeffizienten  $a$  und  $b$  der Gleichung

$$\ln(\dot{V}) = a + b \ln(\Delta p) \quad (1)$$

gesucht. Da sowohl die x-Werte (Druckdifferenzen) als auch die y-Werte (Volumenströme) mit Meßfehlern behaftet sind, wird die Verwendung der Methode der geringsten Fehlerquadratsumme angewendet. Bei dieser Methode werden die Faktoren  $a$  und  $b$  der Gleichung

$$\chi^2 = \sum_i \left[ \frac{(y_i - a - b x_i)^2}{\sigma_{y_i}^2 + b^2 \sigma_{x_i}^2} \right] \quad (2)$$

so bestimmt, daß  $\chi^2$  minimiert wird. Die Standardabweichungen der Koeffizienten  $a$  und  $b$ ,  $\sigma_a$  und  $\sigma_b$  werden für das Vertrauensintervall von 95,4 % bei normalverteilter Werte iterativ ermittelt [5].

## 4 Meßtechnische Untersuchungen

### 4.1 Beschreibung der untersuchten Fälle

Das Augenmerk der meßtechnischen Untersuchungen liegt auf der korrekten Bestimmung der Leckagengröße und -verteilung in einem Gebäude. Hierzu werden die bekannten Meßmethoden Opening A Door, Adding A Hole, Guard Zone und Deduktion eingesetzt. Eine Kurzbeschreibung der Meßmethoden ist in [6], eine ausführliche Beschreibung in [3] enthalten.

Die meßtechnischen Untersuchungen werden anhand von zwei Fällen durchgeführt. Sie stellen typische Leckagen und Leckagewege im Dachbereich dar und sind folgendermaßen definiert:

Fall 1: Das Gebäude ist in drei Zonen unterteilt: Gebäude (Haus), Spitzboden (Zone) und Abseite (Zone 2). Spitzboden und Abseite haben jeweils eine externe Leckage und sind untereinander über eine interne Leckage verbunden. Der Spitzboden hat zusätzlich eine Leckage zum Gebäude, die Abseite weist keine Leckage zum Gebäude auf. Dieser Fall ist in Bild 16 skizziert.

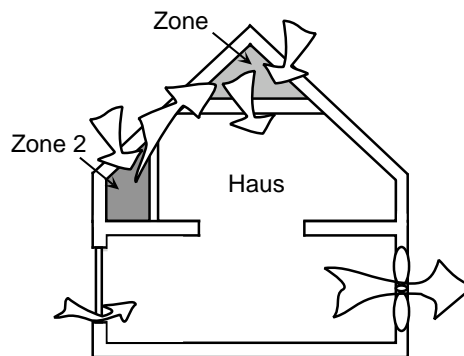


Bild 16: Darstellung der Leckageverteilung für Fall 1.

Fall 2: Wie Fall 1, jedoch hat die Abseite zusätzlich eine interne Leckage zum Gebäude (Bild 17).

Der Spitzboden stellt einen typischen Bereich dar, dessen Luftdichtheit getrennt vom restlichen Gebäude untersucht werden soll. Der primäre Leckageweg des Spitzbodens verläuft von der Umgebung über den Spitzboden in das Gebäude. Besteht zusätzlich eine Verbindung vom Spitzboden zur Abseite, wie es in o.g. Fällen beschrieben ist, dann gibt es einen sekundären Leckageweg über Umgebung, Abseite und Spitzboden in das Gebäude. In der Praxis ist bei vielen Objekten die Information über die Leckagegröße



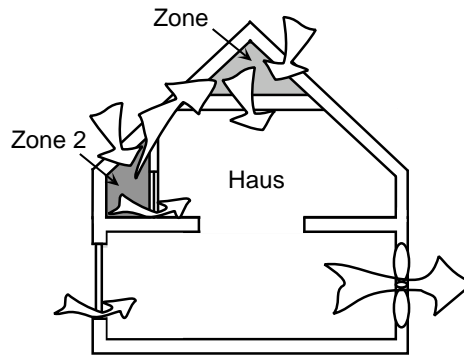


Bild 17: Leckageverteilung für Fall 2.

beider Leckagewege von Interesse. Gerade im Gebäudebestand ist die Information über die Leckageverteilung interessant, um gezielt Abdichtmaßnahmen anwenden zu können. Bisher gibt es jedoch nicht die Möglichkeit, diese Volumenströme detailliert zu untersuchen.

Die oben skizzierten Fälle werden daher auf folgende Fragestellungen untersucht:

1. Kann ein sekundärer Leckageweg mit den o.g. Meßmethoden ermittelt werden?
2. Wie wirken sich sekundäre Leckagewege auf das Ergebnis der betrachteten Zone aus?
3. Wie wirken sich komplexere Leckageverteilungen und -wege auf die erzielbaren Meßergebnisse aus?

## 4.2 Festlegung der Randbedingungen

Die Begriffe Gebäude, Spitzboden und Abseite stehen für drei verschiedene Bereiche bzw. Zonen im gesamten Gebäude, wobei auch andere Gebäudebereiche gemeint sein können. Wichtig ist, daß das Gebäude in drei Bereiche eingeteilt bzw. einteilbar ist und oben beschriebene Leckagenkonfigurationen aufweist. Im folgenden Text wird eine allgemeinere Schreibweise verwendet:

Gebäude	→	Haus (H)
Spitzboden	→	Zone (Z)
Abseite	→	Zone 2 (Z2)

Die oben genannten Fälle 1 und 2 sind in allgemeiner Form als Prinzipskizzen in den folgenden zwei Bildern dargestellt.

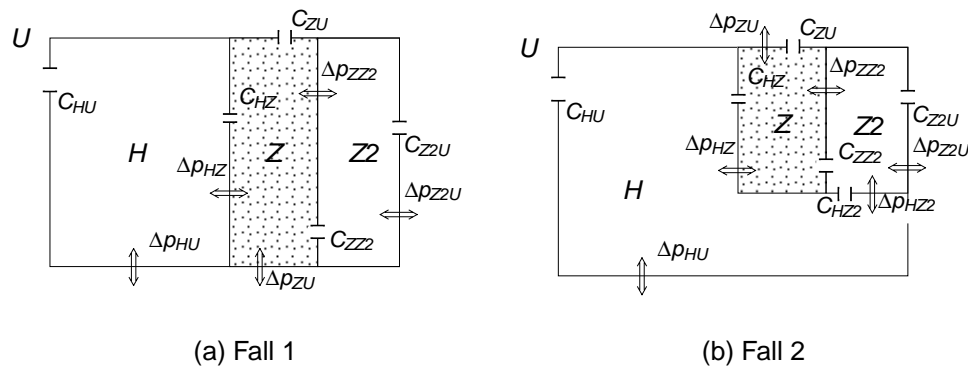


Bild 18: Schematische Darstellung der Druckdifferenzen und Verteilung der Leckagen für Fall 1 und 2.

Die entsprechenden Volumenströme können durch die übliche Näherungsgleichung

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n \quad (3)$$

bestimmt werden. Für die meßtechnischen Untersuchungen wird entsprechend den in Bild 18 gezeigten Ausgangssituationen, die baulichen Randbedingungen festgelegt. Die Parameter lauten:

- Der Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{ifp}}$  und die Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{HZ}}$  über die Trennwand Haus/Zone.
- Das Verhältnis der Volumenströme Zone/Zone 2 zu Zone/Umgebung  $\zeta = \frac{\dot{V}_{\text{ZZ2}}}{\dot{V}_{\text{ZU}}}$ .
- Die Druckdifferenz zwischen Zone und Zone 2  $\Delta p_{\text{ZZ2}}$ .

Alle übrigen Volumenströme und Druckdifferenzen ergeben sich hieraus. Die Randbedingungen für die Messungen werden so bestimmt, daß sie sich bei einer Druckdifferenz zwischen Haus und Umgebung von 50 Pa ( $\Delta p_{\text{HU}} = 50$  Pa), bei geschlossenen Türen zu den Zonen (Bild 18) einstellen.

Der Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{ifp}}$  ist zu 130 m<sup>3</sup>/h und zu 260 m<sup>3</sup>/h festgelegt. Diese Volumenströme ergeben sich wie folgt: Die typische Leckage von Spitzbodenluken liegt bei 100 m<sup>3</sup>/h bis maximal 500 m<sup>3</sup>/h [7]. Bei einem üblichen Einfamilienhaus mit einem beheizten Volumen von ca. 400 m<sup>3</sup>/h, ergibt sich damit der Anteil der gewählten Volumenströme  $\dot{V}_{\text{ifp}}$  an dem Gesamtvolumenstrom bei einem  $n_{50}$ -Wert von 1,0 h<sup>-1</sup> zu 30 % bzw. 60 %.

Die Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{HZ}}$  kann bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p_{\text{HU}} = 50$  Pa zwischen 0 und 50 Pa variieren. Für die Untersuchungen wird  $\Delta p_{\text{HZ}}$  zu 10

Pa als unteren Wert und 48 Pa als oberen Wert festgelegt. Als ein 'typischer' Wert wird zusätzlich  $\Delta p_{HZ} = 40$  Pa untersucht.

Das Volumenstromverhältnis  $\zeta = \frac{\dot{V}_{ZZ2}}{\dot{V}_{ZU}}$  wird zu 0,25, 1 und 2 festgesetzt. Der Volumenstrom  $\dot{V}_{ZZ2}$  des sekundären Leckageweges ist also kleiner, gleich oder größer als der Volumenstrom  $\dot{V}_{ZU}$  des primären Leckageweges.

$\Delta p_{ZZ2}$  kann maximal gleich der Druckdifferenz  $\Delta p_{ZU}$  mit  $\Delta p_{ZU} = \Delta p_{HU} - \Delta p_{HZ}$  sein, d.h.  $\Delta p_{ZZ2}$  muß dementsprechend in dem Bereich zwischen 0 Pa und  $\Delta p_{ZU}$  liegen. Für jeden Bereich, der sich aus der Vorgabe von  $\Delta p_{HZ}$  und damit auch von  $\Delta p_{ZU}$  ergibt, werden drei Druckdifferenzen  $\Delta p_{ZZ2}$  gewählt. Die Variationsbreite und Kombination der Parameter ist in Bild 19 dargestellt.

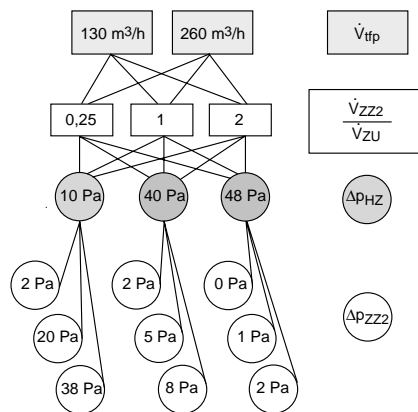


Bild 19: Variation und Kombination der Parameter.

### 4.3 Herstellung der Leckagen

Um die beschriebenen Randbedingungen einhalten zu können, werden spezielle Leckagen in Form von Blenden angefertigt, die im Laborprüfstand kalibriert werden (Bild 20). Ohne Änderung der Geometrie werden diese Lecka-

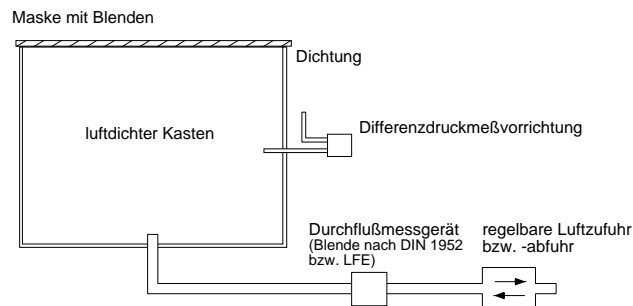


Bild 20: Prinzipskizze des Laborprüfstands für Luftdichtheit.

gen in die dafür vorgesehenen Öffnungen im Dach des Versuchsgebäudes

eingebaut. Durch die Kalibration ist die Abhängigkeit des Volumenstroms von einer gegebenen anliegenden Druckdifferenz bekannt. Die externen Leckagen Zone/Umgebung sind in der nördlichen Dachfläche angeordnet. Ebenfalls auf der Nordseite befinden die Leckagen Zone 2/Umgebung für die Druckdifferenzen  $\Delta p_{Z2U}$  von ca. 1, 2 und 5 Pa, die Leckagen Zone 2/Umgebung für die Druckdifferenzen  $\Delta p_{Z2U}$  von ca. 8, 20 und 38 Pa sind auf der Südseite des Daches angebracht.

## 4.4 Auswertung Fall 1

### 4.4.1 Allgemeines

Das Gebäude ist in drei Zonen aufgeteilt: Gebäude, Zone und Zone 2. Das Gebäude hat eine interne Leckage zu der Zone jedoch keine zu Zone 2. Die Zone weist eine Verbindung zum Gebäude und zu Zone 2 auf. Gebäude, Zone und Zone 2 haben jeweils externe Leckagen an die Umgebung (Bild 21).

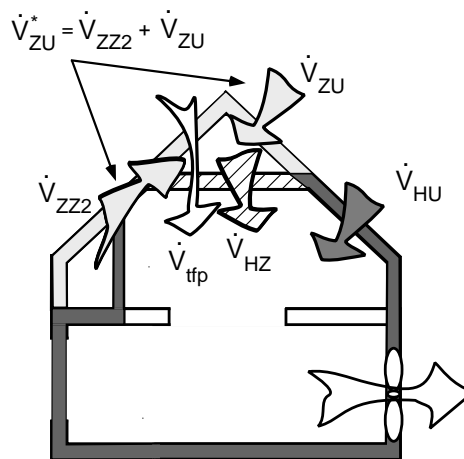


Bild 21: Schematische Darstellung der Leckagevolumenströme. Die Volumenströme  $\dot{V}_{ZU}$  und  $\dot{V}_{ZZ2}$  können nur als Summe  $\dot{V}_{ZU}^*$  ermittelt werden.

Mit Hilfe von Blower Door-Messungen können die Leckagen einzelner Gebäudebereiche nur als ein integraler Wert über einen bestimmten Bereich ermittelt werden. Durch die Kennzeichnung der einzelnen Gebäudebereiche in verschiedenen Graustufen wird deutlich, welche Leckagevolumenströme aus welchem Teil der Gebäudehülle zu welchem Gesamtvolumenstrom (Pfeil) zusammengefaßt werden, d.h. die ermittelten Volumenströme sind Summen aus mehreren einzelnen Volumenströmen durch verschiedene Gebäudehüllenbereiche. Die Volumenströme  $\dot{V}_{ZU}$  und  $\dot{V}_{ZZ2}$ , sowie entsprechend das Dach des Spitzbodens und der Wand/Dachbereich der Abseite in hellgrau gleich gestaltet, da diese beiden Volumenströme mit den o.g. Meßmethoden nicht getrennt ermittelt werden können. Der Gebäudevolumenstrom  $\dot{V}_{HU}$  wird im weiteren nicht betrachtet, da dieser zum 'Standard'-Repertoire gehört.

In Tabelle 2 ist zusammengestellt, mit welcher Meßmethode welche Volumenströme bestimmt werden können. Hier zeigt sich auch schon die Problematik aller o.g. Meßmethoden: Nicht alle Volumenströme können mit allen Meßmethoden bestimmt werden und die Volumenströme  $\dot{V}_{ZU}$  und  $\dot{V}_{ZZ2}$  können nur als Summe  $\dot{V}_{ZU}^*$  ermittelt werden. Die Bestimmung von  $\dot{V}_{ZU}^*$

Tabelle 2: Zusammenstellung der Volumenströme, die mit der jeweiligen Meßmethode ermittelt werden können.

Meßmethode	$\dot{V}_{ZU}^*$	$\dot{V}_{HZ}$	$\dot{V}_{tfp}$
Opening A Door	x	x	x
Adding A Hole	x	x	x
Guard Zone	x	-	-
Deduktion	x	x	-

hat zur Folge, daß bei der Interpretation der Meßergebnisse sehr gewissenhaft vorgegangen werden muß, damit die ermittelten Volumenströme nicht falsch zugeordnet werden. Bei den folgenden Untersuchungsergebnissen wird aufgezeigt, welche Fehlinterpretationen erfolgen können, wenn die Leckageverteilungen der einzelnen Zonen des untersuchten Gebäudes nicht ausreichend bekannt sind bzw. beachtet werden.

Zuerst werden die Ergebnisse aller Messungen vorgestellt und anschließend erfolgt an drei repräsentativen Varianten eine Detailbetrachtung. Die ermittelten Volumenströme  $\dot{V}_{ZU}^*$ ,  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  sind mit den für sie üblichen Druckdifferenzen berechnet. D.h. der Volumenstrom  $\dot{V}_{ZU}^*$  ist bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p_{ZU} = 50$  Pa bestimmt, bei  $\dot{V}_{HZ}$  ist die Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ} = 50$  Pa herangezogen und  $\dot{V}_{tfp}$  wird bei der jeweils anliegenden Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$  ausgewertet.

- $\dot{V}_{ZU}^*$  ist der Volumenstrom über das Dach und über die Verbindung zur Abseite, der sich bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p_{ZU} = \Delta p_{HU} = 50$  Pa einstellt (Bild 21, hellgraue Pfeile). Bei einer 'Standard'-Auswertung wird vernachlässigt, daß die Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$  in der Regel kleiner als 50 Pa ist.
- $\dot{V}_{tfp}$  ist der Gesamtleckage-Volumenstrom, der sich bei geschlossener Klappe über die gesamte Zone bei  $\Delta p_{HZ}$  und  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa einstellt (Bild 21, weißer Pfeil).
- $\dot{V}_{HZ}$  ist ein hypothetischer Volumenstrom über die Kehlbalckendecke, wenn die Druckdifferenz über die Kehlbalckendecke 50 Pa ( $\Delta p_{HZ} = \Delta p_{HU} = 50$  Pa) betragen würde (Bild 21, gestreifter Pfeil).

Bei der Präsentation der Ergebnisse wird der Wert von  $\Delta p_{HZ}$  hinsichtlich einer Aussage über alle Messungen nur als "ca.-Wert" angegeben, da aufgrund der Fertigung der Soll-Leckagen gewisse Schwankungen auftreten. Aus demselben Grund sind die für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa eingestellten Volumenströme  $\dot{V}_{tfp}$  auch als "ca.-Wert" angegeben.

Die verschiedenen Meßmethoden werden jeweils in direkter Folge an einer bestimmten Leckagekombination durchgeführt. Damit kann mit hinreichender Genauigkeit angenommen werden, daß die meteorologischen

Randbedingungen für alle Methoden gleich sind. Windgeschwindigkeit und -richtung, sowie Außen- und Innentemperaturen und Luftdruck werden an der meteorologischen Station am Versuchshaus kontinuierlich aufgezeichnet. Es werden alle 30 Sekunden Werte aufgenommen und als 6 Minutenmittelwerte gespeichert. Die Windgeschwindigkeit wird nach [8, 9] von der Höhe des Windgebers (17 m) auf die bei Blower Door-Messungen übliche Anemometerhöhe von 2 m umgerechnet. In Bild 22 sind die 6 Minuten-Mittelwerte für die Windgeschwindigkeit als Funktion der Windrichtung für den Zeitraum der Messungen aufgetragen. Der Mittelwert über alle Windgeschwindigkeiten beträgt  $0,7 \pm 0,2$  m/s in 2 m Anemometerhöhe. Bei den Untersuchungen wird darauf geachtet, daß nur bei niedriger Windgeschwindigkeit sowie stetigem Wind Messungen durchgeführt werden. Die vorherrschenden Windrichtungen bei den Messungen sind Süd bzw. Nord.

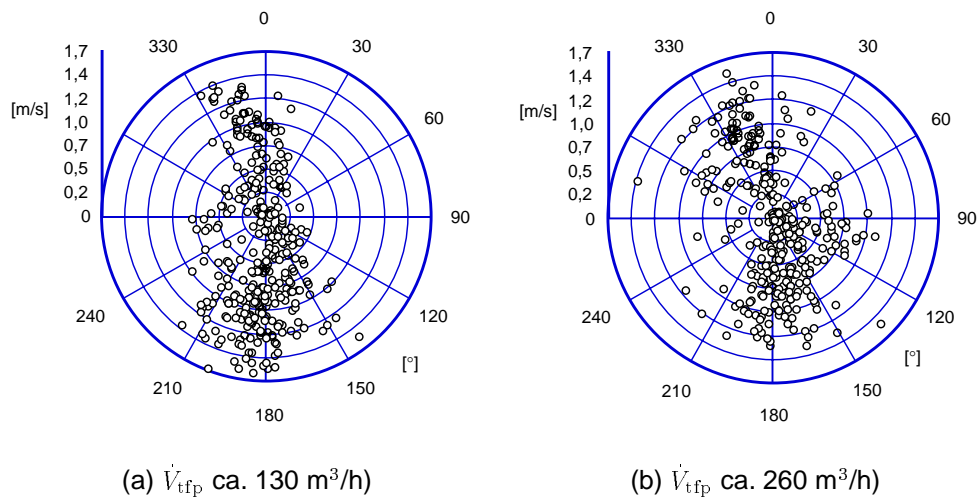


Bild 22: Windgeschwindigkeit und -richtung für alle Meßtage in 2 m Höhe. 0° entspricht der Richtung Nord.

#### 4.4.2 Ergebnisse der Standard-Meßmethoden

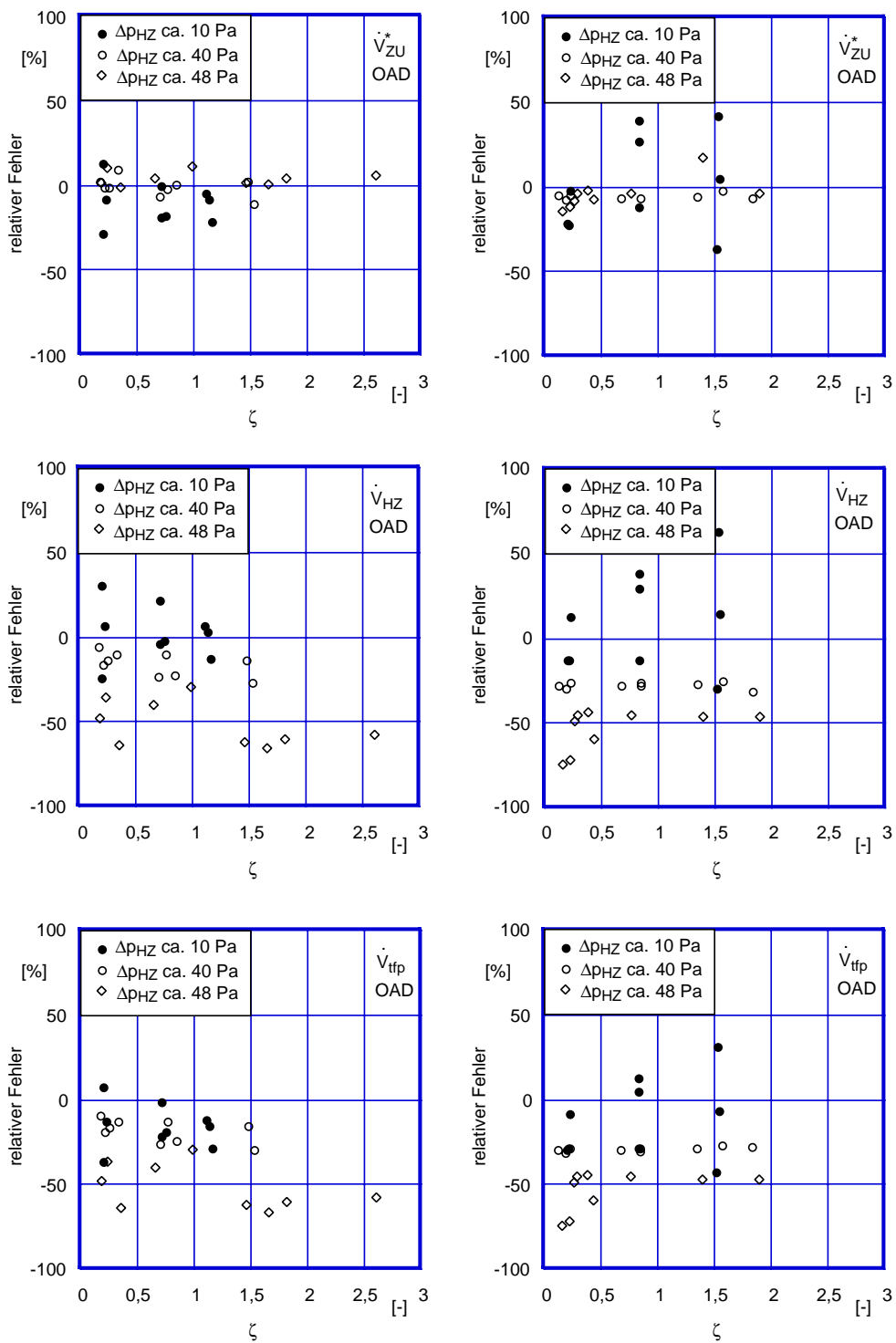
In den Bildern 23 und 24 sind alle Messungen, die mit der Opening A Door-Methode durchgeführt werden, nach den vorgegebenen Volumenströmen  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  von ca. 130 m<sup>3</sup>/h (a) bzw. ca. 260 m<sup>3</sup>/h (b) getrennt ausgewertet. In Bild 23 ist der relative Fehler der Ist-Volumenströme in bezug auf die Soll-Volumenströme in Abhängigkeit von allen Volumenstromverhältnissen  $\zeta$ , in Bild 24 über der Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{ZZ2}}$  aufgetragen.

Vergleicht man bei beiden Bildern die Seite (a) mit der Seite (b), ist zu erkennen, daß die relativen Fehler bei der Bestimmung der einzelnen Volumenströme bei  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  von ca. 130 m<sup>3</sup>/h bzw. ca. 260 m<sup>3</sup>/h eine ähnliche Größenordnung aufweisen, obwohl es sich dabei um eine Verdoppelung der absoluten Volumenströme handelt. Für alle drei Ergebnisvolumenströme

wird deutlich, daß die absolute Größe der Volumenströme nur einen geringen Einfluß auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat. Ebenfalls zeigen die Ergebnisse keine eindeutige Tendenz aufgrund der verschiedenen Volumenstromverhältnisse  $\zeta$ . Ob die Sekundärleckage  $\dot{V}_{ZZ2}$  kleiner, gleich oder größer als der Leckagevolumenstrom  $\dot{V}_{ZU}$  ist, spielt für die Opening A Door-Methode keine Rolle. Anders sieht es bei der Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$  aus. Die Druckdifferenz hat zwar auf den relativen Fehler von  $\dot{V}_{ZU}^*$  nur auf die Streuung des relativen Fehlers bei der Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$  von ca. 10 Pa eine Auswirkung, jedoch bei den Volumenströmen  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  einen größeren Einfluß. Während  $\Delta p_{HZ} \approx 10$  Pa zu positiven und negativen Abweichungen führt, sind die Abweichungen bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  für die Druckdifferenzen von ca. 40 und ca. 48 Pa immer negativ. D.h. der ermittelt Volumenstrom ist stets zu gering. Der relative Fehler der Volumenströme  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  liegt bei einer Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ} \approx 40$  Pa zwischen 0 und -25 % und bei  $\Delta p_{HZ} \approx 48$  Pa zwischen -25 und -75 %.

Neben der Variation von  $\Delta p_{HZ}$ ,  $\zeta$  und  $\dot{V}_{HZ}$  wird auch die Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$  variiert. Gemäß Bild 24 ist keine Abhängigkeit der Genauigkeit bei der Volumenstrombestimmung von dieser Druckdifferenz festzustellen.

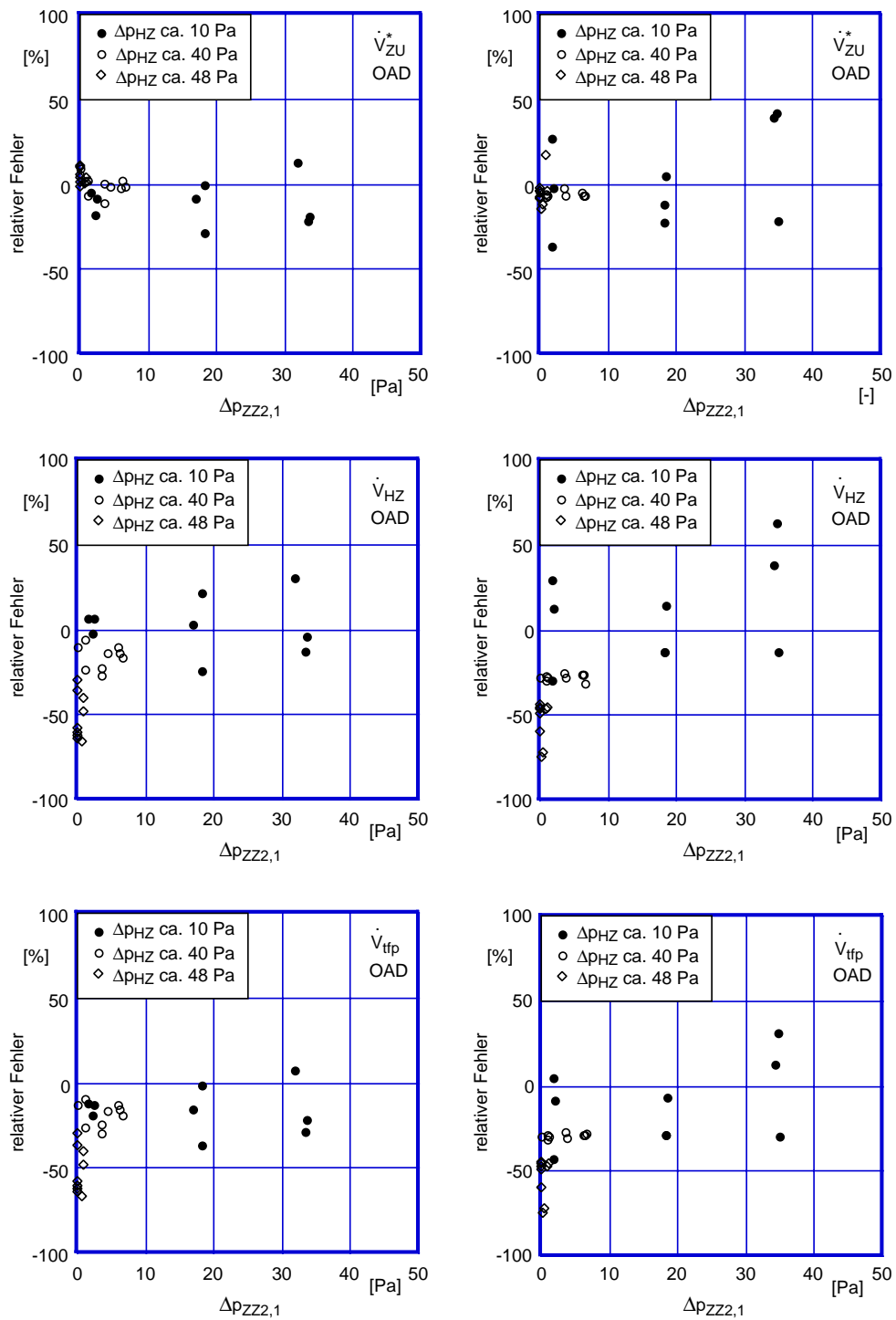




(a)  $\dot{V}_{tfp}$  ca. 130 m<sup>3</sup>/h

(b)  $\dot{V}_{tfp}$  ca. 260 m<sup>3</sup>/h

Bild 23: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme zu den Referenzvolumenströmen in Abhängigkeit von  $\zeta$  nach  $\dot{V}_{tfp}$  unterteilt. Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.



(a)  $\dot{V}_{tfp}$  ca. 130 m<sup>3</sup>/h

(b)  $\dot{V}_{tfp}$  ca. 260 m<sup>3</sup>/h

Bild 24: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme zu den Referenzvolumenströmen in Abhängigkeit von  $\Delta p_{ZZ2,1}$  nach  $\dot{V}_{tfp}$  unterteilt. Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

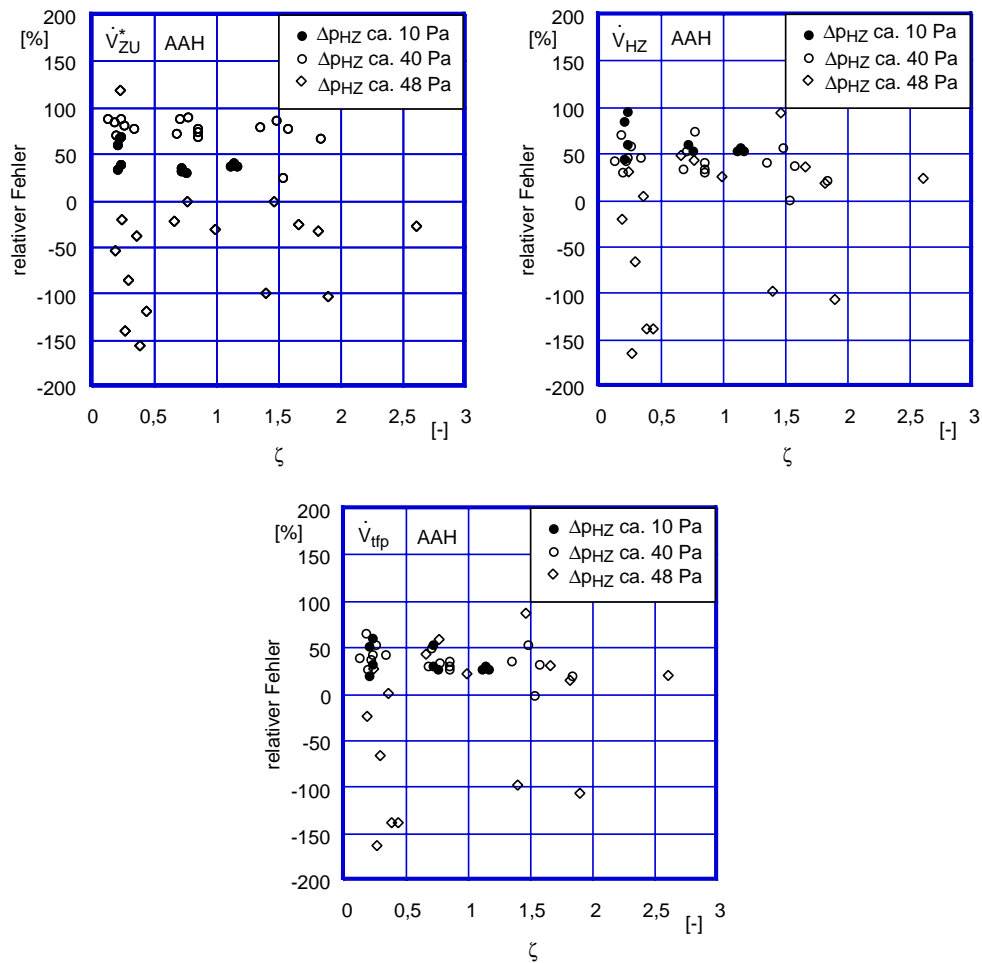


Bild 25: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme in bezug zu den Referenzvolumenströmen für alle mit der Adding A Hole-Methode durchgeführte Messungen. Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

Die Ergebnisse aus den Messungen mit der Adding A Hole-Methode sind in Bild 25 dargestellt. Im Gegensatz zu der Opening A Door-Methode zeigt der relative Fehler der ermittelten Volumenströme  $\dot{V}_{ZU}^*$  bezogen auf die Referenzvolumenströme eine deutliche Abhängigkeit von der Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$ . Eine Druckdifferenz von  $\Delta p_{HZ} \approx 10$  Pa führt zu einem relativen Fehler von 50 %, von 75 % bei einer Druckdifferenz von ca. 40 Pa und bei ca. 48 Pa variiert der rel. Fehler bis zu -150%. Bei den Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ}$  von ca. 10 Pa bzw. 40 Pa, werden die Volumenströme als zu groß ermittelt, während bei  $\Delta p_{HZ} \approx 48$  Pa zu geringe Volumenströme bestimmt werden. Ähnliche Tendenzen zeigen auch die relativen Fehler bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$ . Wie bei der Opening A Door-Methode besteht keine Abhängigkeit der Genauigkeit der Ergebnisse von  $\zeta$  und  $\Delta p_{ZZ2}$ .

Auch bei der Guard Zone-Methode ist die Abhängigkeit der relativen Fehler bei der Volumenströmbestimmung von der Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$  deutlich

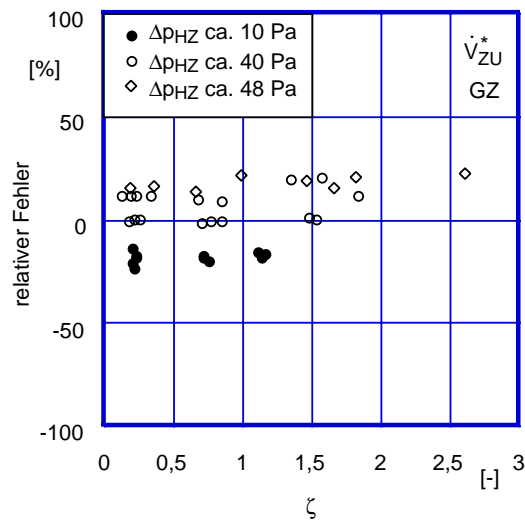


Bild 26: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme in bezug zu den Referenzvolumenströmen für alle mit der Guard Zone-Methode durchgeführte Messungen. Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

zu erkennen (Bild 26). Für die Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ} \approx 40$  Pa ist der relative Fehler am geringsten. Die Aufspaltung der Symbole auf zwei Niveaus beruht darauf, daß neben der Variation der Druckdifferenzen auch zwei unterschiedliche Soll-Volumenströme  $\dot{V}_{tfp}$  untersucht werden. Die Abweichung des relativen Fehlers von  $\pm 3\%$  wird mit einem Soll-Volumenstrom  $\dot{V}_{tfp}$  von ca.  $130 \text{ m}^3/\text{h}$ , der von  $10\%$  mit dem Soll-Volumenstrom  $\dot{V}_{tfp}$  von ca.  $260 \text{ m}^3/\text{h}$  ermittelt. Bei einer Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ} \approx 48$  Pa liegt der ermittelte Volumenstrom  $\dot{V}_{ZU}^*$  immer um ca.  $16\%$  über dem Soll-Volumenstrom, bei einer Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$  von ca.  $10$  Pa immer bei ca.  $-20\%$  unter dem Soll-Volumenstrom. Insgesamt ist die Abweichung der Werte innerhalb einer Druckstufe von  $\Delta p_{HZ}$  in Abhängigkeit von  $\zeta$  sehr gering. Die Werte zeigen ebenfalls deutlich, daß sich  $\zeta$  und  $\Delta p_{ZZ2}$  nicht auf den relativen Fehler auswirken.

Bild 27 zeigt die relativen Fehler der Volumenströme in bezug auf die Referenzvolumenströme für die Deduktions-Methode. Auch hier ist kein Zusammenhang des Verhältnisses  $\zeta$  der Volumenströme mit den relativen Fehlern zu erkennen. Die verschiedenen Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ}$  führen zu verschiedenen Abweichungen der relativen Fehlern. Die relativen Fehler bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{ZU}^*$  für  $\Delta p_{HZ} \approx 10$  Pa liegen bei  $-25 - 50\%$ , für  $\Delta p_{HZ} \approx 40$  Pa bei  $\pm 15\%$  und  $20\%$  bei  $\Delta p_{HZ} \approx 48$  Pa. Bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{HZ}$  liegen die relativen Fehler von  $\Delta p_{HZ} \approx 10$  und  $40$  Pa bei  $-50\%$ , während bei einem  $\Delta p_{HZ}$  von ca.  $48$  Pa sich der relative Fehler zu  $50\%$  ergibt.

Die vorgestellten Ergebnisse des Falls 1 zeigen, daß die Genauigkeit der verwendeten Meßmethoden im wesentlichen nur von der Druckdifferenz

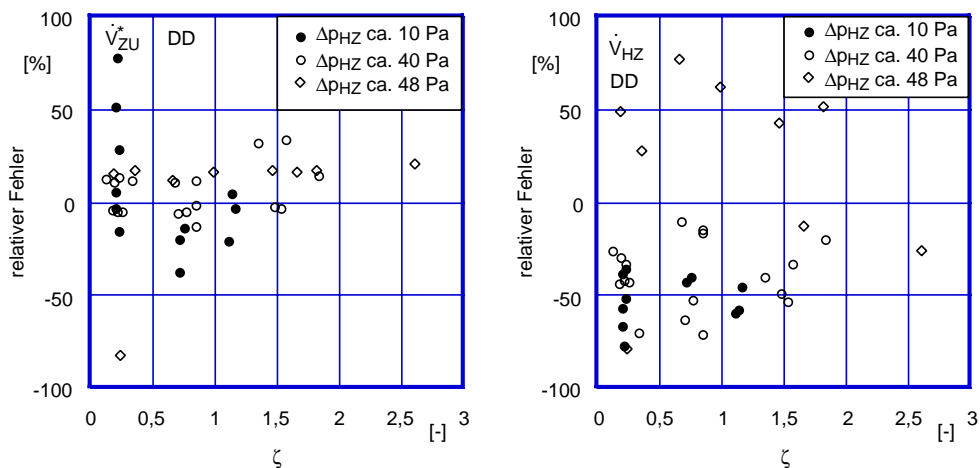


Bild 27: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme inbezug zu den Referenzvolumenströmen für alle mit der Deduktions-Methode durchgeführten Messungen. Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

$\Delta p_{HZ}$  abhängig ist, d.h. die Leckage- und somit auch Druckverteilung über die Trennbauteile Gebäude/Zone und Zone/Umgebung ist entscheidend für die Genauigkeit der Meßmethode. Die Opening A Door-Methode liefert tendenziell für alle untersuchten Druckstufen von  $\Delta p_{HZ}$  zu geringe Volumenströme. Die Methoden Guard Zone und Deduktion liefern für  $\Delta p_{HZ} \approx 10$  und 40 Pa zu geringe, für  $\Delta p_{HZ} \approx 48$  Pa zu große Volumenströme. Bei der Adding A Hole-Methode ist es umgekehrt.

Insgesamt zeigt sich, daß die Bestimmung des Volumenstroms  $\dot{V}_{ZU}^*$  für die verschiedenen Druckdifferenzen zwischen Gebäude und Zone mit den Methoden Opening A Door, Guard Zone und Deduktion mit bis zu  $\pm 20$  % recht genau ist. Mit der Guard Zone-Methode lassen sich die besten Ergebnisse erzielen ( $\pm 10$  %), jedoch ist diese Methode auch die aufwendigste, da zwei Ventilatoren zum Einsatz kommen. Gute Ergebnisse ( $\pm 15$  %) können mit der Opening A Door-Methode ermittelt werden. Diese Methode hat den Vorteil, daß zu der Standard-Meßausrüstung nur ein zusätzlicher Differenzdrucksensor und Schlauch erforderlich ist.

Die Abweichungen der relativen Fehler bei der Bestimmung der Volumenströme  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  in bezug auf die Soll-Volumenströme sind im Gegensatz zu den relativen Fehlern des Volumenstroms  $\dot{V}_{ZU}^*$  bei allen Meßmethoden größer. Die Opening A Door-Methode liefert bei der Bestimmung dieser Volumenströme die besten Werte ( $\pm 50$  %). Bei den Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ}$  von ca. 40 und ca. 48 Pa sollte ein Zuschlag auf die Volumenströme  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  von 33 % bzw. 100 % gegeben werden, da diese Volumenströme prinzipiell mit der Opening A Door-Methode als zu gering bestimmt werden.

Die größte Unsicherheit der Meßergebnisse ergibt sich für allen Methoden

bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p_{\text{HZ}} \approx 48$  Pa, obwohl bei diesen Messungen besonders darauf geachtet wird, sie bei konstanten Windverhältnissen durchzuführen. Sobald böiger Wind auftritt, kann die Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{HZ}}$  während der Messung so schwanken, daß  $\Delta p_{\text{HZ}}$  größer als  $\Delta p_{\text{HU}}$  werden kann. Die Messung muß dann verworfen werden.

Die Methode Adding A Hole schneidet im Vergleich zu den anderen Methoden nicht ganz so günstig ab. Der relative Fehler liegt je nach  $\Delta p_{\text{HZ}}$  in dem Bereich von 75 % bis zu -150 %. Jedoch gibt es Situationen in denen nur diese Methode angewendet werden kann. In diesem Fall sind die Informationen, die mit Hilfe von Adding A Hole erhalten werden können, sehr wichtig.

Im Vergleich der Meßmethoden zeigt sich, daß bei allen Methoden die relativen Fehler bei der Bestimmung der Volumenströme bei einer vorgegebenen Druckdifferenz von  $\Delta p_{\text{HZ}} \approx 40$  Pa am geringsten sind, bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p_{\text{HZ}} \approx 48$  Pa treten bei allen Meßmethoden die größten Abweichungen vom Sollwert auf.

Einen interessanten Aspekt zeigen ebenfalls die Bilder 23 - 27. Bei allen Methoden zeigt der relative Fehler der Volumenströme bezogen auf die Referenzvolumenströme kaum eine Abhängigkeit von dem Verhältnis der Volumenströme Zone/Zone 2 zu Zone/Umgebung  $\zeta = \frac{\dot{V}_{\text{ZZ2}}}{\dot{V}_{\text{ZU}}}$  und der anliegenden Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{ZZ2}}$ . Der Einfluß der absoluten Größen der insgesamt zu ermittelnden Volumenströme auf die Genauigkeit der Messungen ist gering.

In den folgenden Bildern werden drei Varianten aus den gesamten Meßergebnissen für Fall 1 vorgestellt. Die dabei verwendeten Meßmethoden werden bei gleicher Parameterwahl direkt nebeneinander gestellt, so daß sie sofort miteinander verglichen werden können. In den Bildern 28 - 30 werden die relativen Fehler der meßtechnisch ermittelten Ist-Volumenströme in bezug auf die Referenzvolumenströme über dem Verhältnis der Volumenströme Zone/Zone 2 zu Zone/Umgebung  $\zeta = \frac{\dot{V}_{\text{ZZ2}}}{\dot{V}_{\text{ZU}}}$  aufgetragen. Für jede Parameterkombination ergeben sich bis zu drei Ergebnisdiagramme, da je nach Meßmethode die Volumenströme  $\dot{V}_{\text{ZU}}^*$ ,  $\dot{V}_{\text{HZ}}$ ,  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  bestimmt werden können.

Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen der Messungen wieder. Die Standardabweichung der Deduktions-Methode ist bei manchen Ergebnissen nicht dargestellt, weil sie rechnerisch mehrere 100% groß wird.

Variation I ist in Bild 28 dargestellt. Die Randbedingungen lauten:  $\Delta p_{\text{HZ}}=15$  Pa,  $\Delta p_{\text{ZZ2}}=18$  Pa,  $\dot{V}_{\text{tfp}}=154$  m<sup>3</sup>/h bei  $\Delta p_{\text{HU}}=50$  Pa. Es ist zu erkennen, daß die relativen Fehler der Volumenströme zu den Referenzvolumenströmen sowohl in positiver als auch in negativer Richtung abweichen. Bei den einzelnen Meßmethoden ist die Richtung der Abweichungen bis auf wenige Ausnahmen entweder für alle Volumenströme positiv oder negativ. Der Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{ZU}}^*$  läßt sich am genauesten mit der Guard Zone- und Opening A Door-Methode bestimmen (-15 % bzw. -25 % Abweichung). Die Deduktions-Methode liefert auch recht gute Ergebnisse (-25 %), während bei der Me-

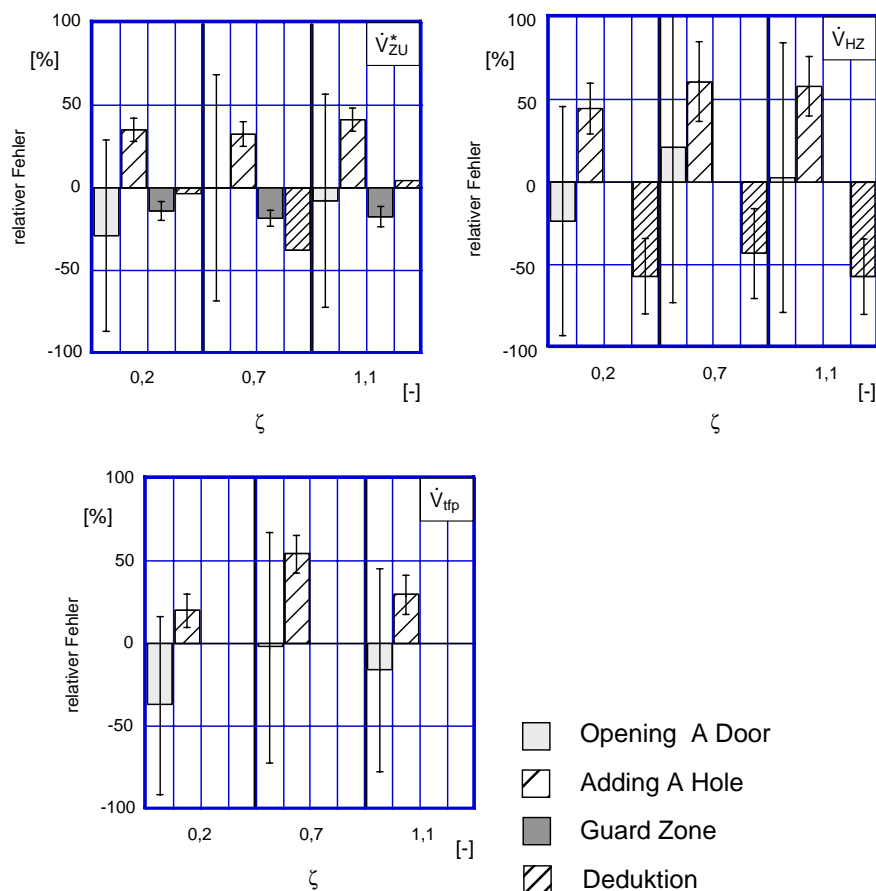


Bild 28: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme zu den Referenzvolumenströmen. Randbedingungen der Variation I:  $\Delta p_{HZ} = 15$  Pa,  $\Delta p_{ZZ2} = 18$  Pa,  $\dot{V}_{tfp} = 154$  m<sup>3</sup>/h) bei  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen der Messung wieder.

thode Adding A Hole etwas größere Abweichungen (35 %) vom Soll-Wert vorliegen. Bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  nehmen die relativen Fehler bei allen Methoden zu. Beide Volumenströme lassen sich mit der Opening A Door-Methode recht genau bestimmen ( $\dot{V}_{HZ}$ :  $\pm 20$  % bzw.  $\dot{V}_{tfp}$ : -20 %).

Bild 29 zeigt Variation II mit den Randbedingungen  $\Delta p_{HZ} = 41$  Pa,  $\Delta p_{ZZ2} = 4$  Pa und  $\dot{V}_{tfp} = 155$  m<sup>3</sup>/h) bei  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa. Die Richtung der Abweichungen der relativen Fehler der Volumenströme in bezug auf die Referenzvolumenströme aus Bild 28 ist analog für alle Methoden auch in Bild 29 zu erkennen. Die Methoden Opening A Door, Guard Zone und Deduktion schneiden bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{ZU}^*$  sehr gut ab ( $< 10$  %). Die Bestimmung der Volumenströme  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  erfolgt ebenfalls wie bei Variation I am genauesten mit der Opening A Door-Methode (-25 %).

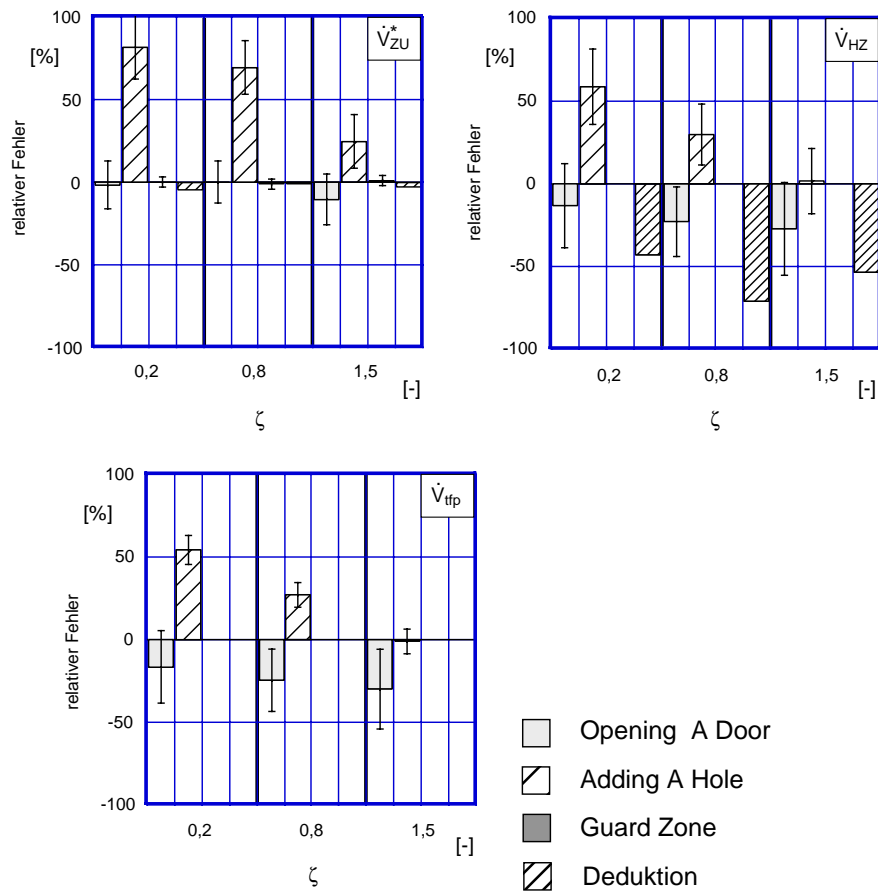


Bild 29: Relativer Fehler der Ergebnisvolumenströme zu den Referenzvolumenströmen. Randbedingungen der Variation II:  $\Delta p_{HZ} = 41 \text{ Pa}$ ,  $\Delta p_{ZZ2} = 4 \text{ Pa}$ ,  $\dot{V}_{tfp} = 155 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $\Delta p_{HU} = 50 \text{ Pa}$ . Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen der Messung wieder.



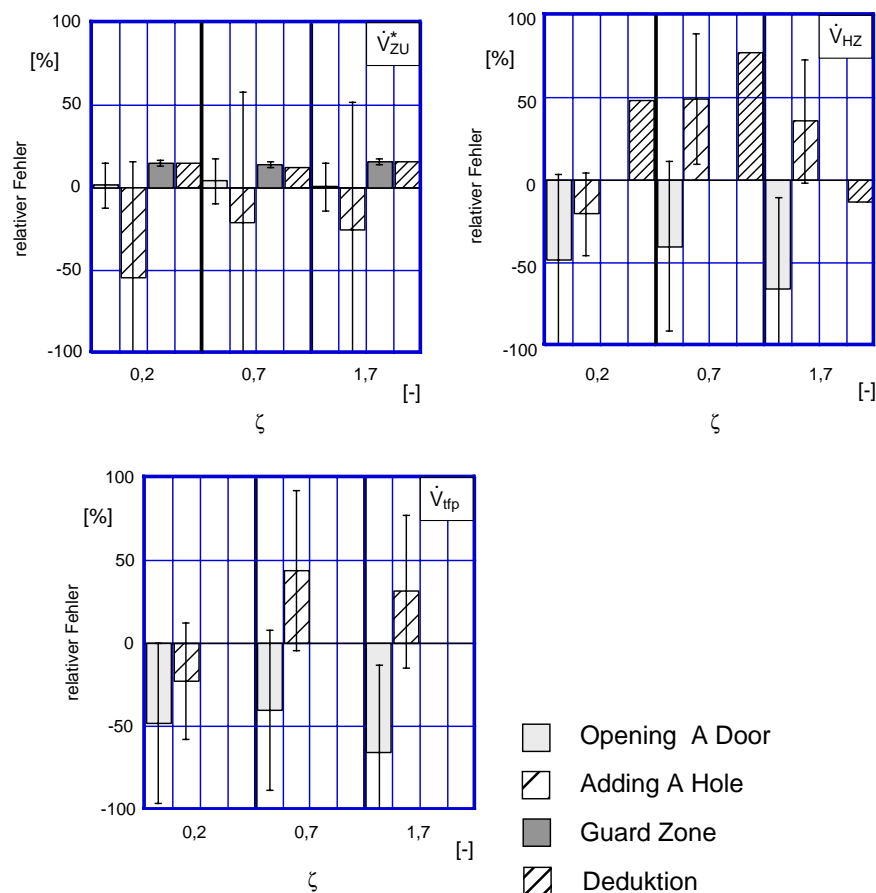


Bild 30: Relative Fehler der Ergebnisvolumenströme zu den Referenzvolumenströmen. Randbedingungen der Variation III:  $\Delta p_{HZ} = 49 \text{ Pa}$ ,  $\Delta p_{ZZ2} = 1 \text{ Pa}$ ,  $\dot{V}_{tfp} = 136 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $\Delta p_{HU} = 50 \text{ Pa}$ . Die Fehlerbalken geben die Standardabweichungen der Messung wieder.

Die dritte Parametervariation für Fall 1 mit den Randbedingungen  $\Delta p_{HZ} = 49 \text{ Pa}$ ,  $\Delta p_{ZZ2} = 1 \text{ Pa}$  und  $\dot{V}_{tfp} = 136 \text{ m}^3/\text{h}$  bei  $\Delta p_{HU} = 50 \text{ Pa}$  ist in Bild 30 dargestellt. Die Bestimmung des Volumenstroms  $\dot{V}_{ZU}^*$  ist für die Methoden Opening A Door, Guard Zone und Deduktion mit einem relativen Fehler von  $< 15 \%$  möglich. Bei der Ermittlung der Volumenströme  $\dot{V}_{HZ}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  muß jedoch bei allen Methoden mit Fehlern um  $+50 \%$  bzw.  $-50 \%$  gerechnet werden.

#### 4.4.3 Fehlinterpretation

Wie schon darauf hingewiesen wurde, kann mit den o.g. Methoden der Volumenstrom  $\dot{V}_{ZU}^*$  nur als Summe aus  $\dot{V}_{ZU}$  und  $\dot{V}_{ZZ2}$  bestimmt werden. Es muß bei der Interpretation solcher Fälle darauf geachtet werden, das  $\dot{V}_{ZU}^*$  nicht fälschlicher Weise als  $\dot{V}_{ZU}$  interpretiert wird. In diesem Falle treten

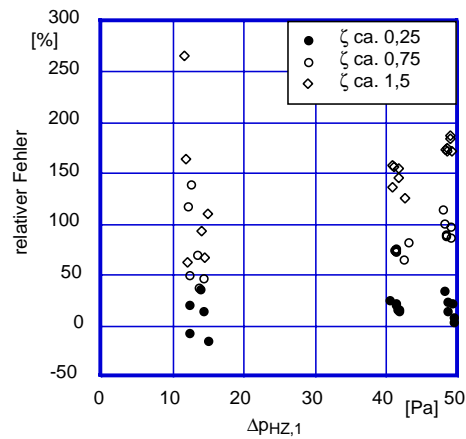


Bild 31: Relativer Fehler des Volumenstroms  $\dot{V}_{ZU}^*$  in bezug auf den tatsächlichen Volumenstrom  $\dot{V}_{ZU}$  in Abhängigkeit der Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$ . Die Werte gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

sehr große Fehler auf (Bild 31). Wie zu erwarten, zeigt sich, daß je größer das Verhältnis  $\zeta = \frac{\dot{V}_{ZZ2}}{\dot{V}_{ZU}}$  ist, der Fehler bei der Bestimmung von  $\dot{V}_{ZU}^*$  proportional zunimmt. Es spielt weder die Größe der gesuchten Volumenströme noch die Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$  bei dieser Betrachtung eine Rolle. Die Ungenauigkeit resultiert nur aus dem vorliegenden Volumenstromverhältnis  $\zeta$ .

#### 4.4.4 Ergebnisse mit der erweiterten Opening A Door-Methode

Da mit den Standard-Meßmethoden die Bestimmung von sekundären Leckagevolumenströmen nicht möglich ist, wird die Opening A Door Methode so erweitert, daß die einzelnen Volumenströme  $\dot{V}_{ZU}$  und  $\dot{V}_{ZZ2}$  auch bestimmt werden können. Die weiterentwickelte Meßmethode wird im Prinzip analog der Standard Opening A Door-Methode durchgeführt. Der Unterschied besteht nur darin, daß mehrere Messungen mit unterschiedlicher Kombination von "Klappe auf/Klappe zu" ausgeführt werden. Die mathematische Herleitung ist dem Anhang A zu entnehmen.

##### 1. Messung ("beide Klappen zu")

1. Klappen zu Zone und Zone 2 schließen und eine Messung durchführen.
2. Zu jeder Druckstufe sowohl die Druckdifferenzen Gebäude/Umgebung  $\Delta p_{HU}$  als auch die Druckdifferenz zwischen Gebäude/Zone  $\Delta p_{HZ}$  und Zone/Zone 2  $\Delta p_{ZZ2}$  (Bild 32b) protokollieren.

Um bei der Messung ein gutes Ergebnis zu erzielen, sollte die Druckdifferenz Gebäude/Zone bei  $\Delta p_{HU} = 50 Pa$  zwischen  $10 Pa \leq \Delta p_{HZ} \leq 48 Pa$  betragen!

##### 2. Messung ("eine Klappen auf")

1. Klappe öffnen, so daß zwischen Zone und Gebäude kein Druckunterschied herrscht (Bild 32c).

Es ist darauf zu achten, daß sich  $\Delta p_{HZ} \approx 0 Pa$  einstellt!

2. Messung durchführen und zu jeder Druckstufe sowohl die Druckdifferenz Gebäude/Umgebung  $\Delta p_{HU}$  als auch die Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$  zwischen Zone und Zone 2 protokollieren.

##### 3. Messung ("beide Klappen auf")

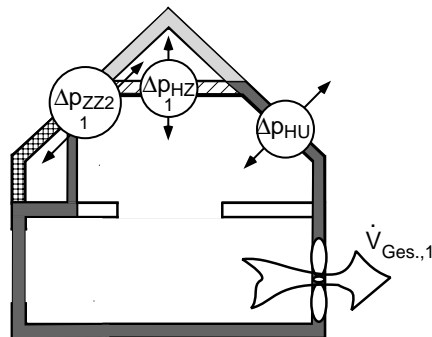
1. Beide Klappen öffnen, so daß zwischen Zone/Gebäude und Zone 2/Gebäude kein Druckunterschied herrscht (Bild 32d).

Es ist darauf zu achten, daß sich  $\Delta p_{HZ} \approx \Delta p_{ZZ2} \approx 0 Pa$  einstellt!

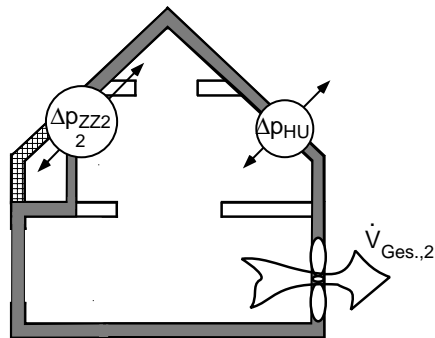
2. Messung durchführen.

Bezeichner	Bedeutung
$\Delta p_{HU}$	= ( $p_{Haus} - p_{Umgebung}$ )
$\Delta p_{HZ}$	= ( $p_{Haus} - p_{Zone}$ )
$\Delta p_{ZZ2}$	= ( $p_{Zone} - p_{Zone,2}$ )
$\Delta p_{ZU}$	= ( $\Delta p_{HU} - \Delta p_{HZ}$ )
$\Delta p_{Z2U}$	= ( $\Delta p_{ZU} - \Delta p_{ZZ2}$ )

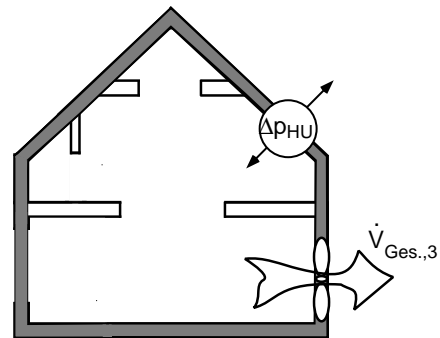
(a) Nomenklatur



(b) Messung 1 ("beide Klappen zu")



(c) Messung 2 ("eine Klappen auf")



(d) Messung 3 ("beide Klappen auf")

Bild 32: Bezeichnungen und Annahmen für die erweiterte Meßmethode Opening A Door anhand eines einfachen Beispiels eines Spitzbodens (OAD B und C).

Dieselben Leckagekombinationen wie sie für die Standardmethoden verwendet werden, werden mit der erweiterten Opening A Door-Methode untersucht. Bei der Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ}$  von ca. 48 Pa gibt es bei dieser Methode aufgrund oben beschriebener Windeinflüsse Probleme. Aus diesem Grund liegen für diese Druckdifferenz nur wenige Daten vor.

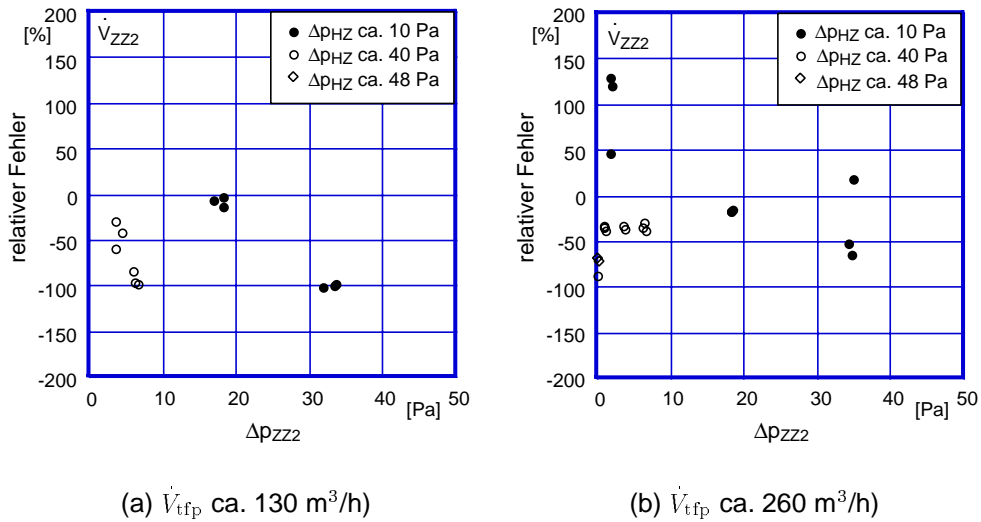
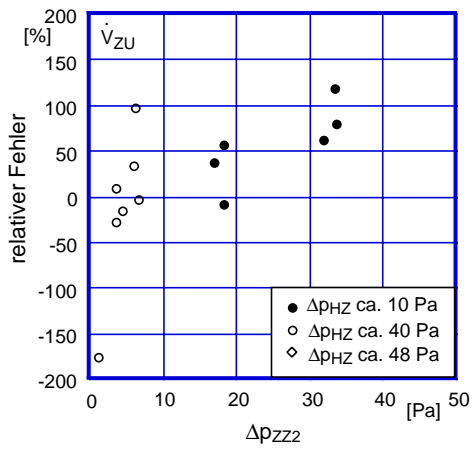


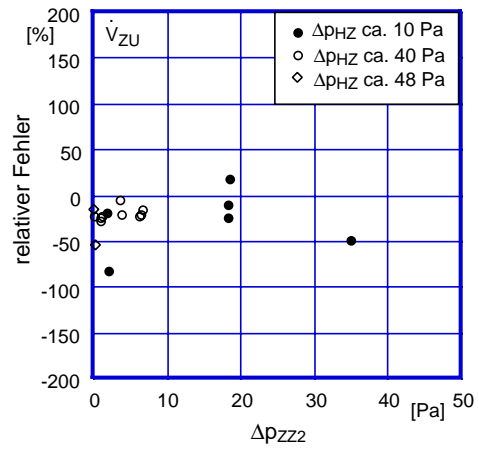
Bild 33: Relativer Fehler vom Ist-Volumenstroms  $\dot{V}_{ZZ2}$  in bezug auf den Soll-Wert in Abhängigkeit der Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$ . Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

Die relativen Fehler der Ist-Volumenströme  $\dot{V}_{ZZ2}$ ,  $\dot{V}_{ZU}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  in bezug auf die Soll-Werte sind in Abhängigkeit von der Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$  in den Bildern 33 - 35 aufgetragen. Bei einer Druckdifferenz  $\Delta p_{HZ} \approx 10$  Pa sind für alle drei Volumenströme die relativen Fehler mit  $\pm 25\%$  am geringsten, wenn die Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2}$  die Hälfte ihres maximalen Wertes annimmt ( $\Delta p_{ZZ2} \approx 20$  Pa). Nimmt  $\Delta p_{ZZ2}$  einen größeren oder kleineren Wert an, dann sind keine eindeutigen Tendenzen festzustellen. Für  $\Delta p_{HZ} \approx 40$  Pa werden die Volumenströme  $\dot{V}_{ZZ2}$  und  $\dot{V}_{tfp}$  prinzipiell um mindestens 25% zu gering ermittelt. Die relativen Fehler bei der Bestimmung des Volumenstroms  $\dot{V}_{ZU}$  weisen unterschiedliche Abweichungen in Abhängigkeit von  $\dot{V}_{tfp}$  auf. Einen relativen Fehler von -25% ergibt sich bei der Bestimmung des  $\dot{V}_{tfp} \approx 260$  m<sup>3</sup>/h), bei  $\dot{V}_{tfp} \approx 130$  m<sup>3</sup>/h) muß mit einem relativen Fehler von  $\pm 50\%$  gerechnet werden.

Mit der erweiterten Opening A Door-Methode können einzelne Volumenströme bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigen, daß die Genauigkeit der Ergebnisse im Vergleich zu einer Standardbetrachtung in der gleichen Größenordnung liegt, aber insgesamt mehr Information gewonnen werden kann.

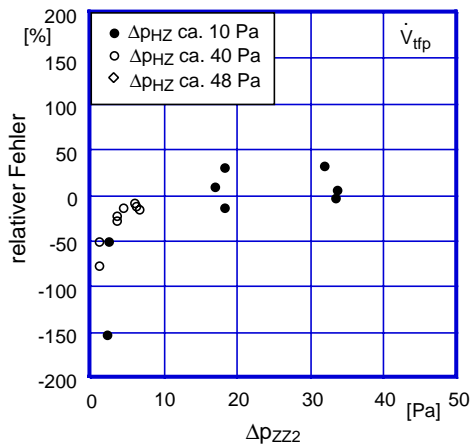


(a)  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  ca. 130 m<sup>3</sup>/h

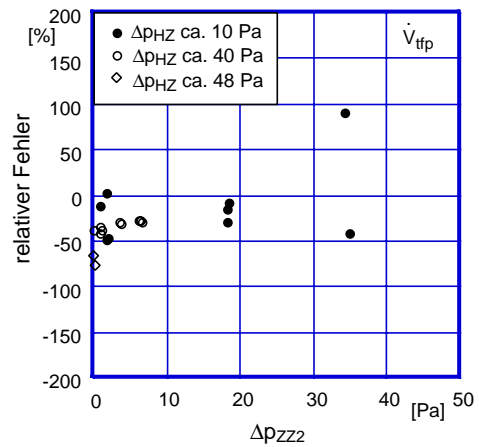


(b)  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  ca. 260 m<sup>3</sup>/h

Bild 34: Relativer Fehler des Ist-Volumenstroms  $\dot{V}_{\text{ZU}}$  in Abhängigkeit der Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{ZZ}2}$ . Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{\text{HU}} = 50$  Pa.



(a)  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  ca. 130 m<sup>3</sup>/h



(b)  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  ca. 260 m<sup>3</sup>/h

Bild 35: Relativer Fehler des Ist-Volumenstroms  $\dot{V}_{\text{tfp}}$  in Abhängigkeit der Druckdifferenz  $\Delta p_{\text{ZZ}2}$ . Die dargestellten Ergebnisse gelten für  $\Delta p_{\text{HU}} = 50$  Pa.

## 4.5 Auswertung Fall 2

Das Gebäude ist in drei Zonen aufgeteilt: Gebäude, Zone und Zone 2 (Bild 36). Die Leckagen sind wie für Fall 1 verteilt, jedoch hat Zone 2 zusätzlich eine Verbindung zum Gebäude.

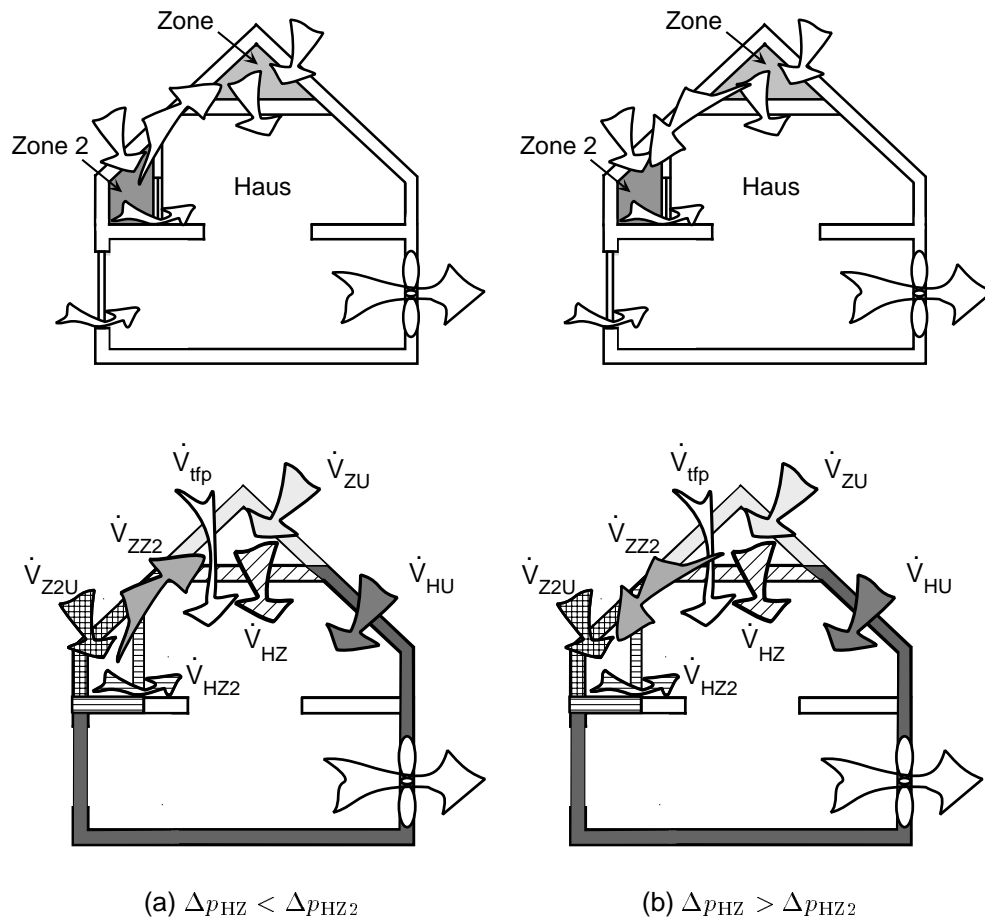


Bild 36: Leckageverteilung und Nomenklatur für das einfache Beispiels eines Spitzbodens.

Bei dieser Leckagekombination ist zu beachten, daß die Strömungsrichtung des Volumenstroms  $\dot{V}_{ZZ2}$  von den Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ}$  und  $\Delta p_{HZ2}$  abhängig ist. Bei einer Druckdifferenz von  $\Delta p_{HU} = 50 \text{ Pa}$  Unterdruck im Gebäude strömt die Luft immer in die Zone mit dem niedrigeren Druckniveau, d.h. bei  $\Delta p_{HZ} < \Delta p_{HZ2}$  strömt die Luft von der Zone 2 in die Zone (Bild 36a) und umgekehrt (Bild 36b).

Die Messungen werden nur mit einem Soll-Volumenstrom von  $\dot{V}_{HZ}$  ca.  $130 \text{ m}^3/\text{h}$  durchgeführt, da es sich bei der Untersuchung von Fall 1 gezeigt hat, daß die absolute Größe der gesuchten Volumenströme kaum einen Einfluß auf die Genauigkeit der Ergebnisse haben. Die einzelnen Volumenströme, wie sie in Bild 36 schematisch als Pfeil angedeutet sind, werden mit

der o.g. erweiterten Opening A Door-Methode ermittelt, da mit allen anderen Meßmethoden diese einzelnen Volumenströme nicht bestimmt werden können. Die Messungen erfolgen analog Fall 1. Die Herleitungen zur Bestimmung der einzelnen Volumenströme sind dem Anhang B zu entnehmen.

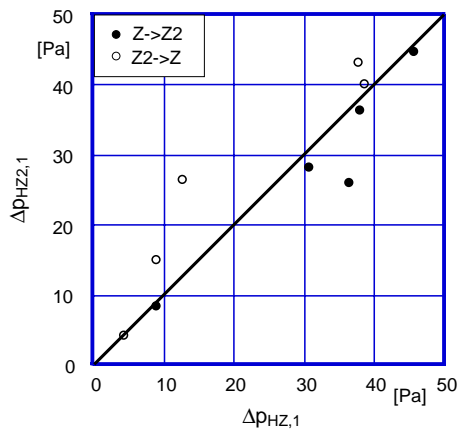


Bild 37: Die Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ,1}$  und  $\Delta p_{HZ2,1}$  aus Messung 1 gegeneinander aufgetragen. Es gilt  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa.

In Bild 37 sind die Druckdifferenzen  $\Delta p_{HZ,1}$  und  $\Delta p_{HZ2,1}$  aus Opening A Door Plus-Messungen mit geschlossenen Klappen (Messung 1) gegeneinander aufgetragen. Es gilt  $\Delta p_{HU} = 50$  Pa. Ist  $\Delta p_{HZ,1} > \Delta p_{HZ2,1}$  dann strömt die Luft ( $\dot{V}_{ZZ2}$ ) von der Zone in die Zone 2 (Z→Z2, gefüllte Symbole). Für den Fall  $\Delta p_{HZ,1} < \Delta p_{HZ2,1}$  strömt die Luft von der Zone 2 in die Zone (Z2→Z, leere Symbole). Diese Umkehr der Strömungsrichtung von  $\dot{V}_{ZZ2}$  muß bei der Auswertung und Interpretation beachtet werden.

Die relativen Fehler, die bei der Bestimmung der einzelnen Volumenströme für Fall 2 auftreten sind in Bild 38 über der Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2,1}$  aus Messung 1 aufgetragen. Es zeigt sich, daß bei einer Strömungsrichtung Zone → Zone 2 (gefüllte Symbole) bis auf wenige Ausnahmen die gesuchten Volumenströme mit zu kleinen Werten ermittelt werden (ca. -25%). Bei der Strömungsrichtung Zone 2 → Zone (leere Symbole) kann dies bezüglich keine eindeutige Aussage getroffen werden. Hier liegen die Abweichungen der relativen Fehler bei  $\pm 25\%$  bzw. bei dem Volumenstrom  $\dot{V}_{HZ2}$  bei  $\pm 50\%$ .

Die Auswertung von Fall 2 zeigt, daß die gesuchten Volumenströme trotz aufwendiger Meßtechnik und erhöhtem Rechenaufwand mit einer Genauigkeit bestimmt werden können, die einer Standard-Meßmethode entspricht. Mit der erweiterten Opening A Door-Methode ist es möglich mehrere Volumenströme zu bestimmen, die in verschiedenen Zone ein- bzw. ausströmen. Diese Information kann gerade für den Bereich Spitzboden/Abseite für vorzunehmende Absichtmaßnahmen von Interesse sein.



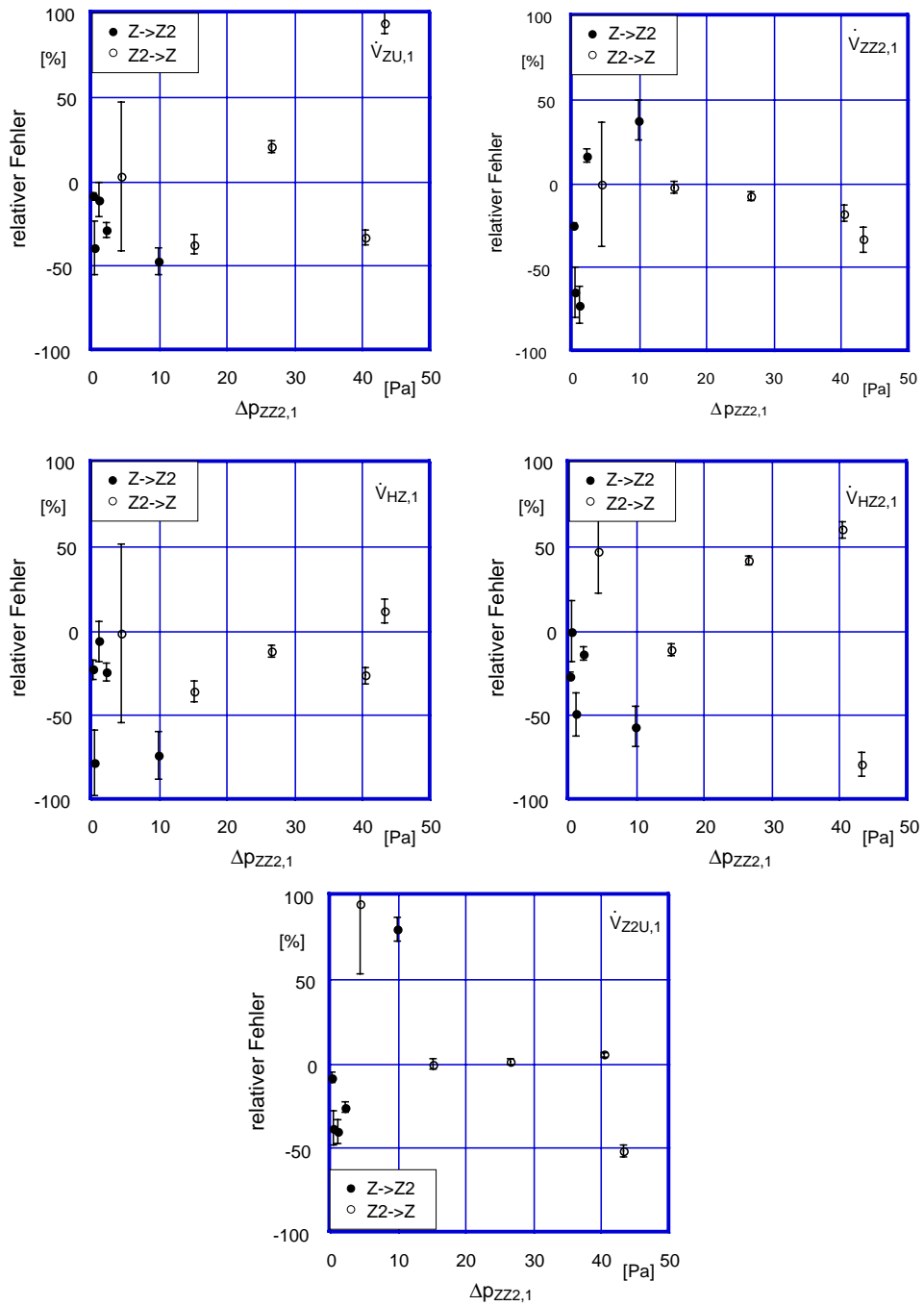


Bild 38: Relativer Fehler der Ergebnisvolumenströme in Abhängigkeit der Strömungsrichtung von  $\dot{V}_{ZZ2,1}$  aufgetragen über der Druckdifferenz  $\Delta p_{ZZ2,1}$ . Es gelten die Randbedingungen der "Messung 1" der erweiterten Opening A Door-Methode. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder.



## 5 in situ-Meßgerät

### 5.1 Einführung

Mit Hilfe des in situ-Meßgeräts ist es möglich, einzelne Bauteile im eingebauten Zustand wie z.B. den Fenstereinbau, oder Anschlußbereiche wie z.B. Raumecken oder -kanten auf ihre Luftdurchlässigkeit zu prüfen.

Problematisch sind bei diesen Messungen Querströmungen in Bauteilen. Einschichtige Bauteile können nur durchströmt werden, während in mehrschichtigen Bauteilen zusätzlich auch Querströmungen auftreten können. Läßt sich diese Querströmung nicht unterbinden, dann ist das Ergebnis einer Dichtheitsuntersuchung an diesem Bauteil nur die Luftdurchlässigkeit des Bauteils bis zu der quer durchströmten Ebene (Bild 39). Der gesamte Querschnitt des Bauteils kann auf diese Weise nicht untersucht werden.

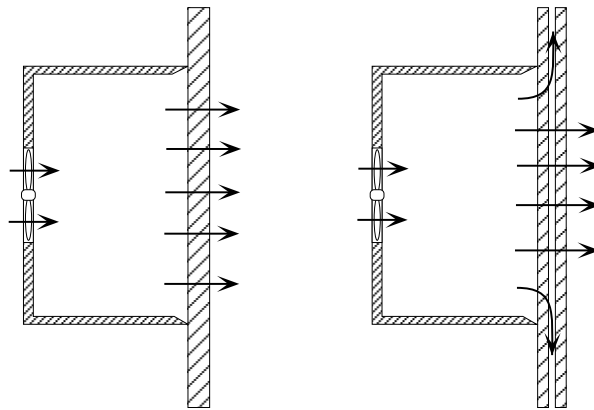
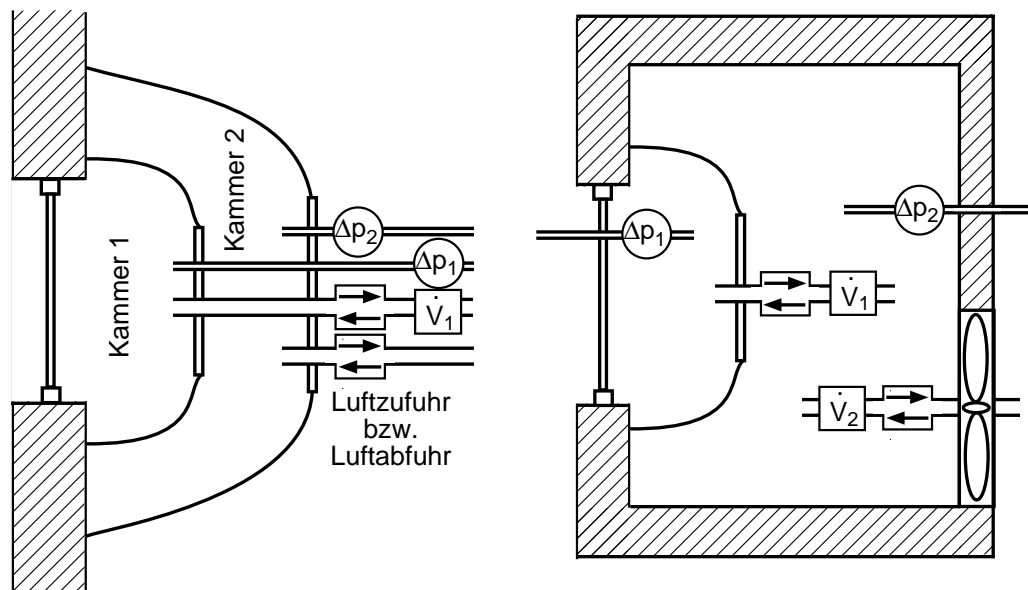


Bild 39: Durchströmung eines Bauteils, Querströmung im Bauteil nach [10].

### 5.2 Prinzip des in situ-Meßgeräts

Das Prinzip des in situ-Meßgeräts beruht auf der Deduktions-Methode. Zwei Kammern bilden die Basis des in situ-Meßgeräts, wobei eine kleinere Kammer von einer größeren Kammer umschlossen wird (Bild 40). Beide Kammern haben eine voneinander unabhängige Volumenstromregelung. Die innere Kammer ist zusätzlich mit einer Volumenstrombestimmung ausgerüstet. Die Druckdifferenzen zwischen der inneren Kammer (Meßkammer) und der Umgebung sowie zwischen der äußeren Kammer (Ausgleichskammer) und der Umgebung werden bestimmt.

Das in situ-Meßgerät ist flexibel einsetzbar. Es kann als Doppelkammer (Bild 40a) verwendet werden oder als eine einzelne Kammer in Kombination mit z.B. einem Blower Door-System oder einer Lüftungsanlage als ein



(a) In situ als Doppelkammer

(b) In situ als kompensierendes Volumenstrommeßgerät

Bild 40: Prinzipieller Aufbau des in situ-Meßgerätes mit Meß- und Regelgrößen.

kompensierendes Volumenstrommeßgerät (Bild 40b). Die Kombination in situ/Blower Door ist immer dann möglich, wenn der Luftwechsel des Raumes, in dem sich das zu untersuchende Bauteil befindet, bei 50 Pa Druckdifferenz zwischen Raum und Umgebung mit einer Blower Door sichergestellt werden kann. Ist der Raum zu groß oder kann nicht ausreichend abgedichtet werden, dann werden beide Kammern in Einsatz gebracht. In beiden Fällen erfolgt die Messung anhand der Deduktions-Methode. Die Guard Zone-Methode kann bei dem neuen in situ-Gerät im Gegensatz zu dem älteren Prototypen nicht mehr eingesetzt werden, da mit der neuen Konstruktion Probleme bei Druckgleichheit der Kammern auftreten.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Versuchsbedingungen.

Spalthöhe (h)	Spalttiefe (t)
1,5 mm	25 mm, 50 mm, 150 mm
1,9 mm	25 mm, 50 mm, 150 mm
2,6 mm	25 mm, 50 mm, 150 mm

### 5.3 Spaltmessungen

Mit dem Prototypen aus [2] werden detaillierte Untersuchungen zu Anwendungsmöglichkeiten an verschiedenen Spalten durchgeführt. Unterschiedliche Kombinationen von Spalttiefen und -höhen werden mit den Methoden Guard Zone und Deduktion im Vergleich untersucht. Eine Zusammenstellung der verwendeten Spalttiefen und -höhen sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Die Spalte sind aus Aluminium L-Profilen gefertigt. Bild 41 zeigt schematisch den Aufbau eines Spaltes.

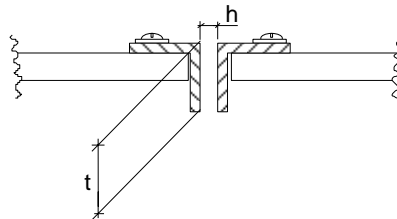


Bild 41: Spalt für Vergleichsmessungen zwischen Laborprüfstand und in situ-Meßgerät.

Das in situ-Gerät wird längs nacheinander auf die verschiedenen Spalte gestellt (Bild 42). Die untersuchten Spalte werden nicht ganz von dem Gerät abgedeckt. Diese Anordnung spiegelt den ungünstigsten Einsatzfall des Gerätes wider.

Zunächst werden alle untersuchten Spalte im Laborprüfstand kalibriert. Anschließend wird der Prototyp auf die Proben mit den Spalten gestellt und jeder Spalt wird mit den Methoden Guard Zone und Deduktion untersucht. In Bild 43 sind die Ist-Volumenströme über den Soll-Volumenströmen aufgetragen. Die gefüllten Symbole zeigen die Ergebnisse der Guard Zone-Methode, die leeren Symbole repräsentieren die Ergebnisse der Deduktions-Methode. Alle Ergebnissen sind auf einen Spalt der Länge 1 m normiert. Es sind keine Fehlerbalken eingezeichnet, da die Fehler der Meßgeräte kleiner als  $1 \text{ m}^3/(\text{hm})$  sind. Es zeigt sich, daß mit beiden Methoden ähnliche Ergebnisse erzielt werden, d.h. die Methoden sind austauschbar.

In Bild 44 ist der relative Fehler der Soll-Volumenströme in Abhängigkeit von den Spalthöhen aufgetragen. Bei den Ergebnissen ist zu beachten, daß die

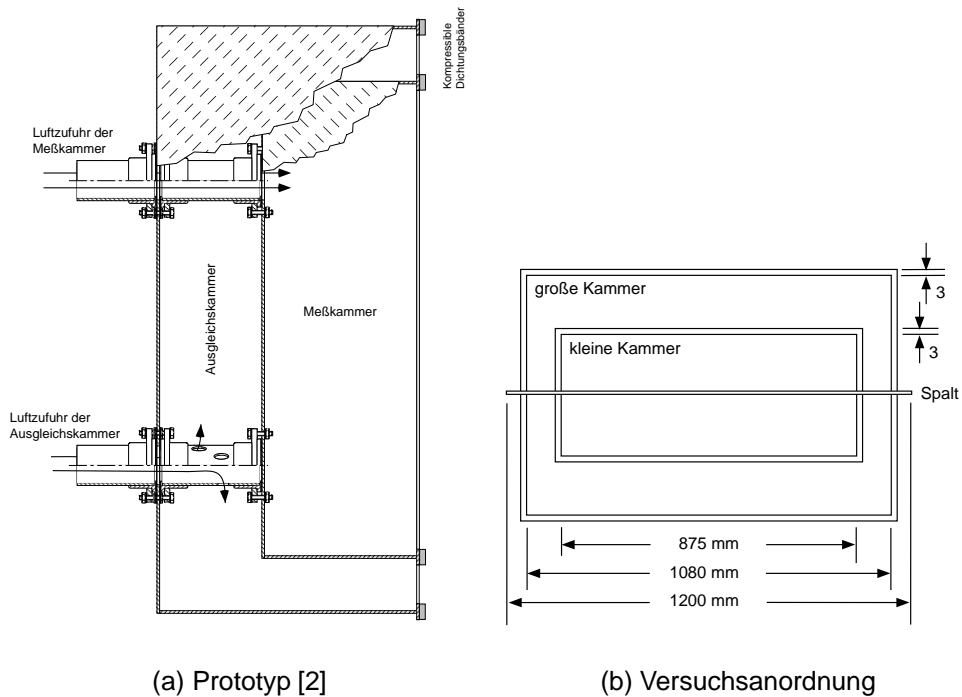


Bild 42: Versuchsanordnung für die Vergleichsmessungen.

absoluten Abweichungen der Volumenströme zwischen  $3 - 6 \text{ m}^3/(\text{hm})$  liegen. Die prozentuale Messgenauigkeit steigt bei der Deduktions-Methode mit der Spalthöhe an: von 7,5 % bei einer Spalthöhe von 1,5 mm, auf 10 % bei einer Spalthöhe von 1,5 mm und bei einer Spalthöhe von 2,6 mm auf 13 %. Bei der Guard Zone-Methode ergibt sich für alle drei Spalthöhen ein mittlerer prozentualer Fehler von ca. 7,5 %. Die untersuchten Spalttiefen weisen keinen einheitlichen Einfluß auf die Ergebnisse auf. Die Ergebnisse der Deduktions-Methode zeigen eine Abhängigkeit mit der Spalttiefe, die Ergebnisse der Guard Zone-Methode nicht. Mit beiden Methoden werden die gesuchten Volumenströme zu groß bestimmt.

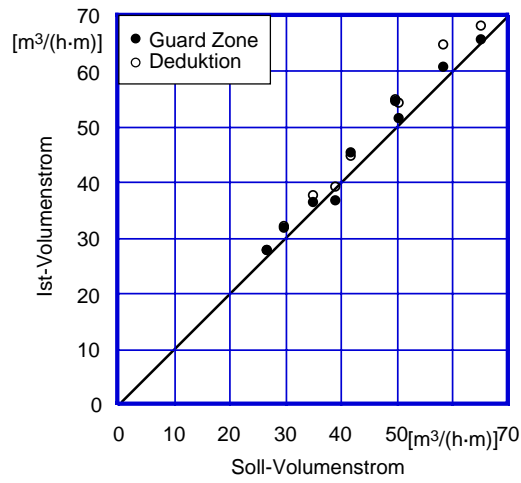


Bild 43: Ist-Volumenstrom in Abhängigkeit des Soll-Volumenstroms.

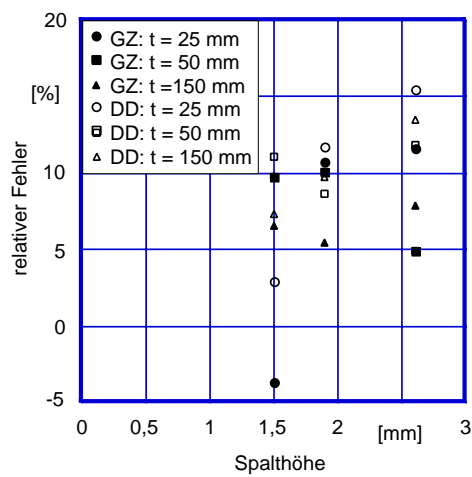


Bild 44: Prozentuale Abweichung des Soll-Volumenstroms vom Ist-Volumenstrom in Abhängigkeit der Spalthöhe.

## 5.4 Konstruktion des neuen in situ-Meßgeräts

### 5.4.1 Anforderungen an die Konstruktion

Aus der Konstruktion des älteren Prototyps ergaben sich folgende Anforderungen an die Weiterentwicklung:

1. Das Gerät sollte für Kanten und Ecken einsetzbar sein
2. Beibehaltung der zerstörungsfreien Befestigungsmöglichkeit
3. Die Befestigungsmöglichkeit sollte möglichst in der Dichtebene liegen
4. Das Gewicht des gesamten System sollte verringert werden
5. Die Kammern sollten gegeneinander verschiebbar sein
6. Die Kammern sollten einzeln in Kombination mit z.B. einer Blower Door einsetzbar sein

Die genannten Anforderungspunkte konnten durch die im folgenden beschriebenen Konstruktion gelöst werden. Sechs einzelne U-Profile aus Aluminium bilden das sechseckige Grundgerüst jeder Kammer (Bild 45). Die



Bild 45: Sechseckige Grundstruktur der großen in situ Kammer.

Kammerwände sind aus Stoff. Der Stoff ist wie ein sechsseitiger Pyramidenstumpf geschnitten. Das untere Ende des Pyramidenstumpfs ist an den sechs Schenkeln befestigt. Die Anschlußeinheit für die Druckabnahme und die Luftzu- bzw. -abfuhr wird in die obere Öffnung, jedoch erst nach dem Aufhängen der Kammern, integriert.

Für die Auswahl des Stoffes ist es wichtig, daß dieser luftdicht, möglichst leicht und flexibel ist. Diese Anforderungen erfüllt ein leichter Nylonstoff,



Tabelle 4: Daten des in situ-Meßgerätes.

Daten	kleine Kammer	große Kammer
Schenkellänge	ca. 0,93 m	ca. 1,40 m
Grundfläche	ca. 2,1 m <sup>2</sup>	ca. 4,2 m <sup>2</sup>
Volumen	ca. 1,2 m <sup>3</sup>	ca. 3,7 m <sup>3</sup>
Gewicht	ca. 4 kg	ca. 6,5 kg

wie er im Lenkdrachenbau eingesetzt wird. Es wird ein Stoff mit einem spezifischen Gewicht von 42 g/m<sup>2</sup> gewählt.

Die neue sechseckige Grundstruktur in Verbindung mit den Kammerwänden aus Stoff ermöglicht es, dieses Meßgerät flexibel der Raumgeometrie anzupassen. Es ist somit nicht nur für den Einsatz in der Fläche sondern auch an einem Wand/Wand- bzw. Fußboden/ Wand-Anschluß als auch für Raumecken geeignet. Die Daten der beiden Kammern sind Tabelle 4 zu entnehmen.

#### 5.4.2 Befestigung am Untergrund

Für die zerstörungsfreie Befestigung des in situ-Gerätes hat sich bereits die Vakuumtechnik bewährt. Jede Kammer verfügt über eine separate Vakuumsaugleitung und Vakuumpumpe. Dadurch, daß jeder Schenkel mit einem Ventil an die Vakuumsaugleitung angeschlossen ist, können die Schenkel unabhängig voneinander zu- und abgeschaltet werden. Die Vakuumsauger sind auf der Unterseite der U-Profile befestigt und befinden sich damit in der Dichtebene (Bild 46).

#### 5.4.3 Abdichtung des in situ-Gerätes an den Untergrund

Die Abdichtung der Schenkel an das zu untersuchende Bauteil erfolgt über eine Moosgummidichtung, die der Eckbereiche über integrierte Stofflappen, deren Kanten z.Z. noch mit Klebeband am Untergrund festgeklebt werden müssen (Bild 46 und 47).

#### 5.4.4 Anschluß der Druckentnahme und Luftzu- bzw. -abfuhr

Die Druckabnahmestellen und die Verbindungen zu den Ventilatoren sind in eine getrennte Einheit zusammengefaßt (Bild 48). Diese Anschlußeinheit besteht aus zwei runden, hintereinander geschalteten Platten, in denen sich die Anschlüsse für die Druckentnahme und der Luftzu- bzw. -abfuhr für die



Bild 46: Die Vakuumsauger sind in die Dichtebene integriert.



Bild 47: Abdichtungen der Eckbereiche mit Klebeband.

einzelnen Kammern befinden. Diese Einheit wird erst nachdem die Schenkel der Kammern z.B. an einer Wand haften, angeschlossen. Zuerst wird der Stoff der inneren Kammer um die erste, innere Platte gelegt und mit einer Ringschelle festgeklemmt (Bild 48, rechte Seite). Analog wird mit dem Stoff der äußeren Kammer an der zweiten, äußeren Platte verfahren. Anschließend werden die Schläuche für die Druckabnahme und für die Luftzu- bzw. -abfuhr an die entsprechenden Anschlußstücke in der äußeren Platte angeschlossen und zur Meß- und Regeleinheit geführt.

Je nach Anwendung des in situ-Gerätes ist eine Reduzierung des Querschnittes des Schlauches für die Volumenstromabfuhr mittels des Kammer-Ventilators notwendig, sowie das vollständige Abdichten der Ventilatoröffnung (siehe Kapitel 5.5.3). Für die Querschnittsverringering hat sich das Zwischenschalten einer Irisblenden als sinnvoll erwiesen, während das komplette Schließen der Ventilatoröffnung mit Klebeband erfolgen kann.

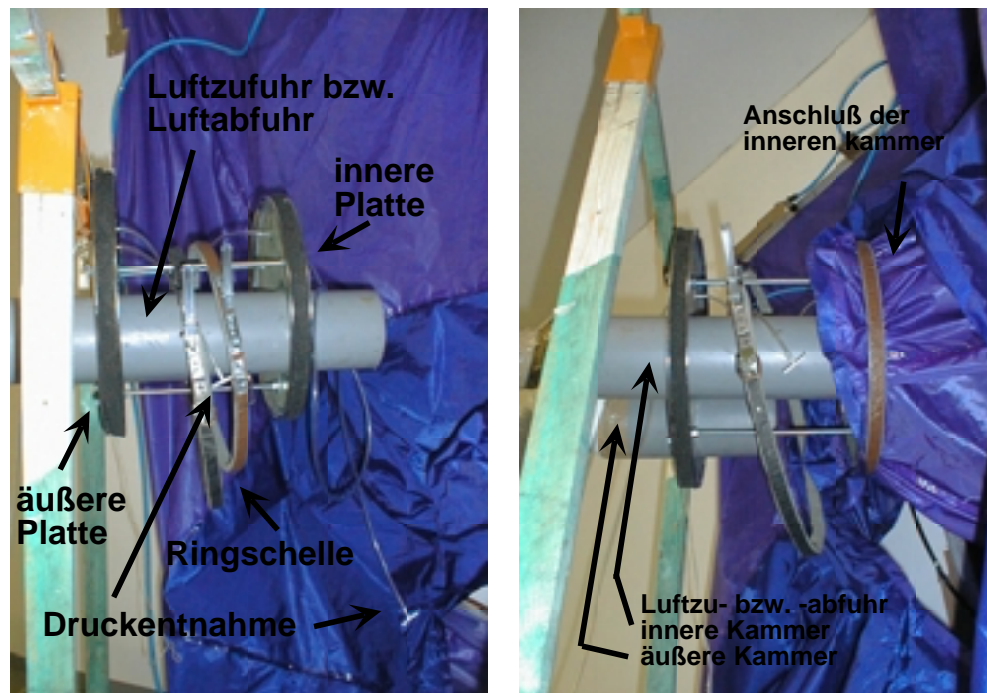


Bild 48: Anschlußelement für die Druckabnahme und die Volumenstromzu- und abfuhr.

#### 5.4.5 Meßgeräte und Meßwerterfassung

Der geförderte Volumenstrom durch die innere Kammer wird mit einem Laminar Flow Element (LFE) bestimmt. Der Meßbereich des eingesetzten Laminar Flow Elements von der Firma SI-Special Instruments, Nördlingen (D), liegt zwischen 0-70 m<sup>3</sup>/h). Die Vorteile ein Laminar Flow Element einzusetzen liegen darin, daß

- keine Ein- und Auslaufstrecken ben ötigt werden,
- eine gute Linearität (Fehler < 0,5% d.A.) gegeben ist,
- die Auflösung nur vom Differenzdrucksensor abhängt.

Das verwendete rechnergesteuerte Meßwerterfassungs- und Regelsystem ist bereits in Kapitel 3.1 beschrieben.

### 5.5 Anlauf- und Regelverhalten des neuen in situ-Meßgerätes

#### 5.5.1 Einführung

Der neue Prototyp mit Stoffkammerwänden weist bei Volumenstromzu- bzw. -abfuhr ein anderes Verhalten als der ältere Prototyp aus Acrylglas auf. Bei

dem starren Acrylglas-Prototypen ist die gewünschte Druckdifferenz sofort aufgeprägt, wenn eine Volumenstromänderung stattfindet. Im Gegensatz dazu reagieren die Kammerwände aus Stoff bei einer Volumenstromzufuhr sehr träge, da der Stoff sich erst entfalten muß und während dessen eine Volumenveränderung stattfindet. Solange der Stoff nicht ganz entfaltet und gespannt ist, baut sich keine Druckdifferenz auf. Erst wenn das Volumen der Kammer auch bei einer weiteren Volumenstromzufuhr konstant bleibt, stellt sich eine Änderung der Druckdifferenz ein. Dies hat zur Folge, daß das Anlauf- und Regelverhalten des in situ-Gerätes mit Stoffkammern von dem in situ-Gerät aus Acrylglaskammern deutlich abweicht. Aus diesem Grund kann mit dem neuen in situ-Gerät nur die Deduktions-Methode angewendet werden, während mit dem älteren in situ-Gerät sowohl Guard Zone- als auch die Deduktions-Methode eingesetzt werden kann.

### 5.5.2 Anlaufverhalten bei Deduktion, Doppelkammer

In Bild 49 ist das Anlaufverhalten schematisch dargestellt. Nach dem Aufbau beträgt die Druckdifferenz zwischen innerer und äußerer Kammer 0 Pa (Bild 49, linke Seite). Soll nun die innere Kammer auf 50 Pa Druckdifferenz zur Umgebung gebracht und gehalten werden, dann fördert der Ventilator solange Luft in die Kammer, bis dieser Zustand erreicht ist. Beginnt der Ventilator zu fördern, fangen die Stoffkammerwände an sich aufzublähen. Dieses Aufblähen der Kammerwände bedeutet zunächst eine Volumenvergrößerung der Kammer (Bild 49, Mitte).

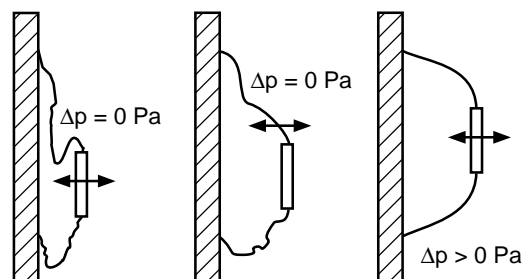


Bild 49: Anlaufverhalten

Das Volumen vergrößert sich so lange, bis die Kammerwände straff gespannt sind und auch bei einer weiteren Volumenstromzufuhr das Volumen konstant bleibt (Bild 49, rechte Seite). Erst zu diesem Zeitpunkt, an dem das Volumen der Kammer auch bei einer weiteren Volumenstromzufuhr konstant bleibt, ändert sich die Druckdifferenz zur Umgebung bzw. zur äußeren Kammer in nennenswertem Umfang. Die Druckdifferenz innere/äußere Kammer beträgt während der gesamten "Aufblähzeit" demnach ca. 0 Pa. Analog erfolgt das Anlaufverhalten bei der äußeren Kammer. Haben beide Kammern ihr maximales Volumen eingenommen, dann sind weitere Druckänderungen schnell möglich.

Für die Messungen hat es zur Folge, daß darauf geachtet werden muß, daß einerseits das Volumen der Kammern immer maximal ist und andererseits zwischen den Zonen zu jeder Zeit eine Druckdifferenz besteht.

### 5.5.3 Anlaufverhalten bei Deduktion, Einzelkammer

Wenn die Deduktion-Methode mit einer in situ-Kammer z.B. in Kombination einer Blower Door als Unterdruckmessung durchgeführt werden soll, dann ist darauf zu achten, daß nicht nur die luftdichte Abdichtung der Kammer zum Raum an der Dichtebene gewährleistet ist, sondern zusätzlich muß auch die Ausblasöffnung des Kammer-Ventilators zum Raum abgedichtet werden. Stellt die Blower Door einen Unterdruck von 50 Pa in dem Raum her, dann wird die Luft durch den Kammer-Ventilator aus der Kammer in den Raum gesaugt, ohne das der Ventilator fördert (Bild 50). Folglich kann

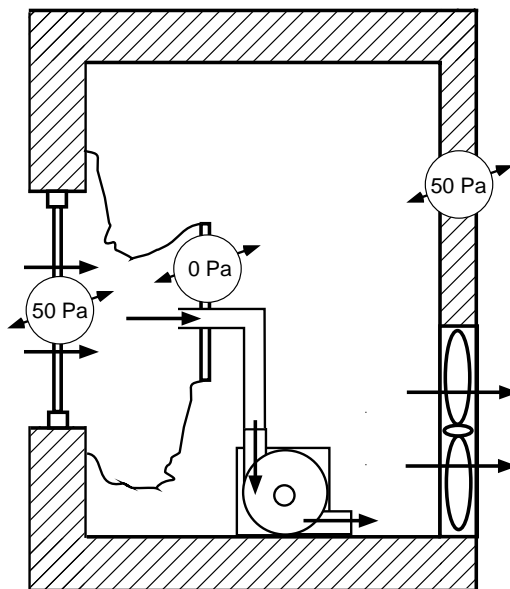


Bild 50: Bei einer Unterdruckmessung wird Luft durch den Kammer-Ventilator in den Raum gesaugt.

sich keine Druckdifferenz zwischen Kammer und Raum aufbauen. Aus diesem Grund muß zu Beginn der Messung die Durchströmung des Ventilators vermindert bzw. verhindert werden. Sobald der Kammer-Ventilator anfängt zu fördern, um eine bestimmte Druckdifferenz sicherzustellen, muß jedoch eine Durchströmung wieder gewährleistet werden. Für diese temporäre Durchflußreduzierung hat sich das Zwischenschalten einer Irisblende als sinnvoll erwiesen. Mit ihr kann je nach Bedarf der Querschnitt des Verbindungsschlauches für die Volumenstromabfuhr und damit die Durchströmung des Ventilators stufenlos verändert werden. Je geringer die Größe der gesuchten Leckage ist, um so kleiner muß der lichte Querschnitt werden. Bei

sehr kleinen Leckagen kann es notwendig sein, den Ventilator im Ausgangszustand zusätzlich temporär komplett abzudichten. Die richtige Einstellung des gesamten Systems ist der jeweiligen Situation anzupassen.

#### **5.5.4 Druckgleichheit der Kammern bei Deduktion**

Standardmäßig wird die Deduktions-Methode mit einer Druckstufe beendet, bei der beide Kammern das gleiche Druckniveau gegenüber der Umgebung aufweisen. Daraus folgt, daß die Druckdifferenz zwischen beiden Kammern 0 Pa beträgt. In dieser Situation ist die Stoffkammerwand der inneren Kammer nicht mehr straff gespannt und fällt in sich zusammen. Sobald die Kammerwände nicht mehr gespannt sind, verändert sich auch kontinuierlich das Kammervolumen. Für diese Druckstufe kann kein konstanter Zustand erreicht werden, so daß der während dieser Zeit geförderte Volumenstrom für die innere Kammer keinen bestimmten Randbedingungen unterliegt. Der Volumenstrom muß verworfen werden. Aus dieser Problematik folgt, daß bei Einsatz des in situ-Meßgerätes die Deduktions-Methode mit einer Druckstufe beendet werden muß, bei der noch eine Druckdifferenz zwischen äußerer und innerer Kammer besteht. Der Wert für Druckgleichheit muß bei der Auswertung extrapoliert werden.

Die auftretende Problematik bei der Druckgleichheit ist auch der Grund, warum von der Anwendung der Guard Zone-Methode für das neue in situ-Meßgerät abgesehen wird, da bei dieser Methode immer Druckgleichheit zwischen den Kammern besteht.

## **5.6 Experimentelle Untersuchungen mit dem neuen in situ-Meßgerät**

### **5.6.1 Allgemeines**

Das in situ-Gerät wird als Doppelkammer und als Einzelkammer in Kombination mit einer Lüftungsanlage analog eines kompensierenden Volumenstrommeßgerätes getestet.

### **5.6.2 in situ-Meßgerät als Doppelkammer**

Auf Grund der Größe des in situ-Gerätes ist es im Rahmen des Projektes nicht möglich einen Test mit der Doppelkammer an einer kalibrierten Leckagen durchzuführen. Das Meßprinzip wird an einer Raumkante des Versuchsgebäudes getestet, in der sich durch Setzungen des Gebäudes ein Riß gebildet hat. Der Riß verläuft über ca. 2 m der gesamten Kantenlänge. Das in situ-Gerät ist so montiert, daß nur 1,30 m Länge des Risses abdeckt sind. Die sichtbare Höhe des Risses beträgt ca. 1 mm. Die Messungen

erfolgen also unter Feldbedingungen (Bild 51). Mit Hilfe der Deduktions-Methode wird für den betrachteten Riß bei 50 Pa Druckdifferenz eine absolute Leckage von  $8 \pm 0,4 \text{ m}^3/\text{h}$  ermittelt. Dies entspricht ca.  $5,2 \text{ m}^3/(\text{hm})$ .

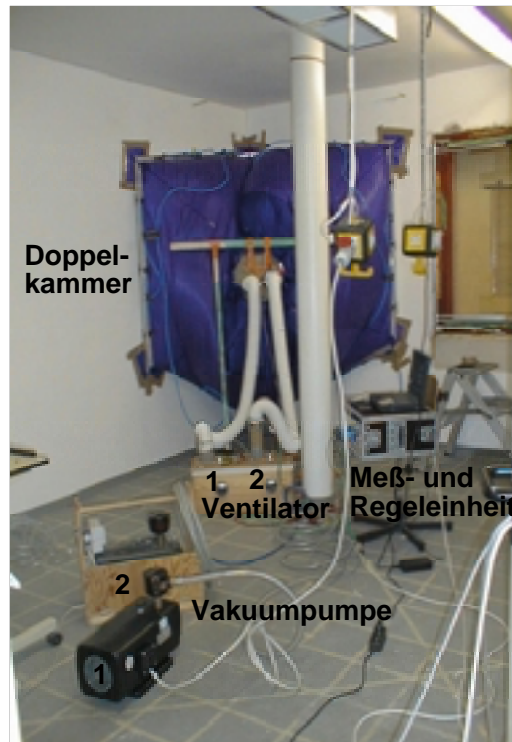


Bild 51: Das in situ-Meßgerät als Doppelkammersystem im "Einsatz".

### 5.6.3 in situ-Meßgerät als kompensierendes Volumenstrommeßgerät

Wird das in situ-Meßgerät als kompensierendes Volumenstrommeßgerät verwendet, dann kommt nur eine Kammer in Verbindung mit z.B. einer Blower Door in Einsatz. Dieses Verfahren wird an einer kalibrierten Spaltleckage geprüft.

Die große in situ-Kammer haftet mittels Vakuum um ein Fenster im Versuchshaus (Bild 45). Die Fensterflügel sind für die Messungen ausgebaut. Die Fensteröffnung ist mit einer variablen Spaltleckage [6] versehen, so daß die Größe der gesuchten Leckage variiert werden kann. Durch die Kalibrierung der Spaltleckage ist der Zusammenhang zwischen Spalthöhe und Volumenstrom bei einer Druckdifferenz über den Spalt von 50 Pa bekannt. Da der Raum mit einer Lüftungsanlage ausgerüstet ist, wird anstelle einer Blower Door die Lüftungsanlage für die Ausgleichdruckerzeugung eingesetzt. Die Messungen werden mit der Deduktions-Methode durchgeführt.

Tabelle 5: Zusammenstellung der Volumenströme bei 50 Pa Differenzdruck über den Spalt.

Messung	Soll-Wert [m <sup>3</sup> /h ]	Ist-Wert [m <sup>3</sup> /h ]	Abweichung [m <sup>3</sup> /h ]	Abweichung [%]
1	82	78	-4	-5
2	47	56	+9	20
3	30	22	-8	-27

Die Ergebnisse sind Tabelle 5 zu entnehmen. Für Messung 1 und 2 wird der Raum konstant auf 50 Pa Druckdifferenz zwischen Raum und Umgebung gehalten und die Kammer stufenweise nachgeregelt. Diese Messungen werden als Unterdruckmessungen durchgeführt. Messung 3 wird als Überdruckmessung ausgeführt. Hierbei wird die Kammer konstant auf 50 Pa Druckdifferenz zwischen Kammer und Umgebung gehalten und der Raum stufenweise nachgeregelt. Die Ergebnisse zeigen, daß der Leckagevolumenstrom mit der Einzelkammer recht genau bestimmt werden kann. Es zeigt sich, daß das in situ-Meßgerät als kompensierendes Volumenstrommeßgerät sowohl mit Überdruck als auch mit Unterdruck betrieben werden.

Die Kombination in situ/Lüftungsanlage wird auch auf o.g. Riß angewendet und ergibt mit der Deduktion-Methode ein Leckagevolumenstrom von  $10 \pm 0,4 \text{ m}^3/\text{h}$  (entspricht ca.  $6,3 \text{ m}^3/(\text{hm})$ ) bei einer Druckdifferenz von 50 Pa über den Riß. Dieses Ergebnis deckt sich gut mit den o.g. Ergebnis aus der Untersuchung mit der Doppelkammer.

## 5.7 Einsatz des in situ-Gerätes

Einen Feldeinsatz des in situ-Meßgerätes in einem Einfamilienhaus an einem Dachflächenfenster zeigt Bild 52. Die kleine Kammer wurde in Verbindung mit einer Blower Door als kompensierendes Volumenstrommeßgerät verwendet. Obwohl die raumseitige Verkleidung aus Gipskarton sehr staubig ist, ist die Befestigung der Kammer durch Vakuumtechnik möglich. Die einbaubedingte Leckage des Dachflächenfensters wird zu  $12,5 \text{ m}^3/\text{h}$  bestimmt.





(a) Dach-  
flächenfenster



(b) Ansicht von vorne



(c) Seitenansicht

Bild 52: Das in situ-Meßgerät 'in Aktion'.

## 6 Zusammenfassung

Die Möglichkeiten im Rahmen einer Blower Door-Messung einzelne Gebäude- teile oder einzelne Leckagen zu quantifizieren waren bisher eingeschränkt. Standardmäßig wird daher nur die Gesamtleckage eines Gebäudes bestimmt. In vielen Fällen, insbesondere im Sanierungsfalle, ist es von Interesse, Information über die Leckageverteilung in einzelnen Gebäudebereichen zu haben. Auch wünschen sich viele Bauherren die Quantifizierung einzelner Leckagen bzw. Gebäudebereiche [1]. Insbesondere im Dachbereich fehlen bislang geeignete, hinreichend flexible Methoden, Teilleckagen zu quantifizieren. Um diesen Wünschen gerecht zu werden, werden im ersten Teil der Arbeit die bekannten Meßmethoden Opening A Door, Adding A Hole, Guard Zone und Deduktion auf ihre Anwendungsgrenzen untersucht und im zweiten Teil ein in situ-Meßgerät für die Quantifizierung von Einzelleckagen weiterentwickelt und getestet.

### 6.1 Meßmethoden

Die meßtechnischen Untersuchungen werden anhand von zwei Fällen durchgeführt. Sie stellen typische Leckagen und Leckagewege im Dachbereich dar und sind, wie in Bild 53 dargestellt, definiert.

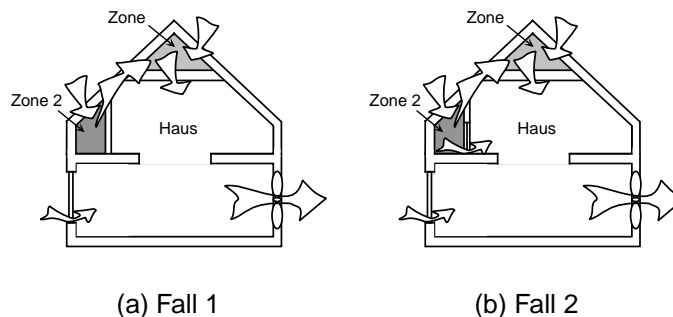


Bild 53: Leckageverteilung für Fall 1 und Fall 2.

Der Spitzboden stellt einen typischen Bereich dar, dessen Luftdichtheit getrennt vom restlichen Gebäude untersucht werden soll. Der primäre Leckageweg des Spitzbodens verläuft von der Umgebung über den Spitzboden in das Gebäude. Besteht eine Verbindung vom Spitzboden zur Abseite, wie sie in o.g. Fällen beschrieben sind, dann gibt es noch einen sekundären Leckageweg über Umgebung, Abseite und Spitzboden in das Gebäude. Die oben skizzierten Fälle werden auf folgende Fragestellungen untersucht:

1. Kann ein sekundärer Leckageweg mit den o.g. Meßmethoden ermittelt werden?

2. Wie wirken sich sekundäre Leckagewege auf das Ergebnis der betrachteten Zone aus?
3. Wie wirken sich komplexere Leckageverteilungen und -wege auf die erzielbaren Meßergebnisse aus?

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenstellen:

1. Mit den o.g. Meßmethoden können sekundäre Leckagewege nicht quantifiziert werden.
2. Je nachdem, über welchen Leckagevolumenstrom Information gewünscht ist, kann sich ein sekundärer Leckageweg auf das Ergebnis auswirken. Ist der gesamte Leckagevolumenstrom über eine Zone gefragt, dann spielt ein sekundärer Leckageweg keine Rolle. Sind jedoch einzelne Volumenströme, die in bzw. aus der Zone treten von Interesse, müssen auch sekundäre Leckagewege berücksichtigt werden.
3. Mit der Erweiterung der Opening A Door-Methode können auch komplexere Leckageverteilungen und -wege ermittelt werden, wenn die Strömungsrichtung der Leckagevolumenströme aufgrund der unterschiedlichen Druckverteilung im Gebäude beachtet wird.

Folgende Einflüsse von Randbedingungen auf die Genauigkeit der Ergebnisse können bei den Untersuchungen festgestellt werden:

- Der entscheidende bauliche Parameter, der Einfluß auf die Genauigkeit einer Blower Door-Messung hat, ist die Druckdifferenz zwischen Gebäude und Zone. Am ausgeprägtesten zeigt sich dieser Einfluß bei der Auswertung der Messungen mit der Guard Zone-Methode.
- Das Verhältnis der Volumenströme Zone/Zone 2 zu Zone/Umgebung und die Druckdifferenz Zone/Zone 2 haben kaum einen Einfluß auf die Genauigkeit der Ergebnisse. D.h. ob der sekundäre Leckagevolumenstrom über das Trennbauteil Zone/Zone 2 größer, gleich oder kleiner als der Leckagevolumenstrom über das Trennbauteil Zone/Umgebung ist, hat kaum einen Einfluß auf die Genauigkeit der Ergebnisse.
- Die absolute Größe des Volumenstroms über das Trennbauteil Gebäude/Zone hat auf die Genauigkeit des Ergebnisses kaum keinen Einfluß.
- Messungen, bei denen die Druckdifferenzen Gebäude/Zone bei ca. 48 Pa und Gebäude/Umgebung bei 50 Pa liegen weisen für alle verwendeten Meßmethoden die größten Ungenauigkeiten in den Ergebnissen auf. Diese können in dem Bereich bis zu  $\pm 150\%$  liegen.
- Die Bestimmung des Volumenstroms Gebäude/Zone erfolgt mit der Guard Zone-Methode je nach Druckdifferenz Gebäude/Zone mit  $\pm 20\%$  am genauesten. Die eingesetzte Meßtechnik für diese Methode ist jedoch sehr aufwendig.

- Mit der Anwendung der Opening A Door-Methode für die Ermittlung der Volumenströme über die gesamte Zone können Ergebnisse mit der Genauigkeit von +25 % bis -50 % in Abhängigkeit der Druckdifferenz Gebäude/Zone erreicht werden. Für den relativ geringen meßtechnischen Aufwand dieser Methode ist dies ein sehr gutes Ergebnis.
- Die Volumenströme von Sekundärleckagen können nur mit der erweiterten Opening A Door-Methode ermittelt werden. Die Genauigkeit der Ergebnisse liegt in weiten Bereichen bei  $\pm 50$  % und ist damit vergleichbar mit der Opening A Door-Methode.

## 6.2 In situ-Meßgerät

Mit Hilfe eines in situ-Meßgeräts ist es jetzt möglich, einzelne Bauteile im eingebauten Zustand wie z.B. den Fenstereinbau, oder Anschlußbereiche wie z.B. Raumecken oder -kanten auf ihre Luftdurchlässigkeit zu prüfen. Es erfolgte eine Weiterentwicklung eines bestehenden Prototypens [2].

Die neue sechseckige Grundstruktur in Verbindung mit den Kammerwänden aus Stoff ermöglicht es, dieses Meßgerät flexibel der Raumgeometrie anzupassen. Es ist somit nicht nur für den Einsatz in der Fläche sondern auch an einem Wand/Wand- bzw. Fußboden/ Wand-Anschluß als auch für Raumecken geeignet. Das in situ-Meßgerät ist flexibel einsetzbar. Es kann als Doppelkammer verwendet werden oder als eine einzelne Kammer in Kombination mit z.B. einem Blower Door-System oder einer Lüftungsanlage als ein kompensierendes Volumenstrommeßgerät.

Aufgrund der neuen Konstruktion hat sich das Meßprinzip Deduktion als geeignet erwiesen. Testmessungen an einem kalibrierten Spalt ergeben Abweichungen vom Sollwert bei der Bestimmung des Volumenstroms von maximal 20 % bis -27 %.

## Literatur

- [1] Geißler, A. und Hauser, G. *Untersuchung der Luftdichtheit von Holzhäusern*. Abschlußbericht AiF Forschungsvorhaben 9579, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, März 1996.
- [2] Hauser, G. und Geißler, A. *Entwicklung eines Meßsystems zur Bestimmung der Luftdichtheit von Bauteilen in situ*. Bauphysik 17 (1995), H. 4, S. 111–114.
- [3] 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).
- [4] Siga AG. *Mit dem SIGA-SYSTEM Drampfbremsen luftdicht einbauen nach DIN V 4108-7 ( $n_{50}$ )*, 1998.
- [5] Press, W. H. et al. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*, 2 Ed. Nr. ISBN 0-521-43108-5. Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.
- [6] Geißler, A. und Hauser, G. *Reproduzierbarkeit von Messungen zur Luftdichtheit von Gebäuden*. Abschlußbericht AiF- Forschungsvorhaben 10650, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, April 1998. [www.bpy.uni-kassel.de](http://www.bpy.uni-kassel.de).
- [7] Geißler, A. und Hauser, G. *Luftdichtheit von Holz äusern*. bauen mit holz (Juli 1996), H. 7, S. 562–568. [www.bpy.uni-kassel.de](http://www.bpy.uni-kassel.de).
- [8] ASHRAE (1993). *Fundamentals Handbook*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1993. 1791 Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA 30329.
- [9] Feustel, H. E. et al. *Fundamentals of the Multizone Air Flow Model - COMIS*. Technical Note AIVC 29, University of Warwick Science Park, Great Britain, Nov 1990.
- [10] Roulet, C. und Vandaele, L. *Air flow patterns within buildings measurement techniques*. Techn. Ber. 34, AIVC, Dec 1991.

## A Herleitung Fall 1

Die Bilanzgleichungen für die durchgeführten Messungen (Bild 32) lauten

$$\dot{V}_{\text{Ges.,1}} = C_{\text{HU}} \cdot \Delta p_{\text{HU}}^n + C_{\text{ZU}} \cdot \Delta p_{\text{ZU,1}}^n + C_{\text{Z2U}} \cdot \Delta p_{\text{Z2U,1}}^n \quad (4)$$

$$\dot{V}_{\text{Ges.,2}} = (C_{\text{HU}} + C_{\text{ZU}}) \cdot \Delta p_{\text{HU}}^n + C_{\text{Z2U}} \cdot \Delta p_{\text{Z2U,2}}^n \quad (5)$$

$$\dot{V}_{\text{Ges.,3}} = (C_{\text{HU}} + C_{\text{ZU}} + C_{\text{Z2U}}) \cdot \Delta p_{\text{HU}}^n \quad (6)$$

Gleichung 4 wird nach der Variablen  $C_{\text{HU}}$  aufgelöst und diese in die Gleichungen 5 und 6 eingesetzt. Anschließend wird aus Gleichung 5  $C_{\text{ZU}}$  eliminiert und in Gleichung 6 eingesetzt. Löst man dies nach  $C_{\text{Z2U}}$  auf, ergibt sich

$$C_{\text{Z2U}} = \frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_2}{\Delta p_{\text{HU}}^n - \Delta p_{\text{Z2U,2}}^n} \quad (7)$$

für  $C_{\text{ZU}}$

$$C_{\text{ZU}} = \frac{\dot{V}_2 - \dot{V}_1 + C_{\text{Z2U}} (\Delta p_{\text{Z2U,1}}^n - \Delta p_{\text{Z2U,2}}^n)}{\Delta p_{\text{HU}}^n - \Delta p_{\text{ZU,1}}^n} \quad (8)$$

und für  $C_{\text{HU}}$

$$C_{\text{HU}} = \frac{\dot{V}_1 - C_{\text{ZU}} \Delta p_{\text{ZU,1}}^n - C_{\text{Z2U}} \Delta p_{\text{Z2U,1}}^n}{\Delta p_{\text{HU}}^n} \quad (9)$$

Für die serielle Leckage Zone 2 gilt der Zusammenhang

$$C_{\text{ZZ2}} \Delta p_{\text{ZZ2,1}}^n = C_{\text{Z2U}} \Delta p_{\text{Z2U,1}}^n \quad (10)$$

Mit Gl. 7 wird  $C_{\text{ZZ2}}$  zu

$$C_{\text{ZZ2}} = \frac{\dot{V}_3 - \dot{V}_2}{\Delta p_{\text{HU}}^n - \Delta p_{\text{Z2U,2}}^n} \left( \frac{\Delta p_{\text{Z2U,1}}^n}{\Delta p_{\text{ZZ2,1}}^n} \right)^n \quad (11)$$

ermittelt.  $C_{\text{HZ}}$  wird aus Messung 1

$$C_{\text{HZ}} \Delta p_{\text{HZ,1}}^n = C_{\text{ZU}} \Delta p_{\text{ZU,1}}^n + C_{\text{ZZ2}} \Delta p_{\text{ZZ2,1}}^n \quad (12)$$

zu

$$C_{\text{HZ}} = \frac{C_{\text{ZU}} \Delta p_{\text{ZU,1}}^n + C_{\text{Z2U}} \Delta p_{\text{Z2U,1}}^n}{\Delta p_{\text{HZ,1}}^n} \quad (13)$$

eliminiert. Mit Hilfe der Gleichungen 7, 8, 12 und 13 können die Volumenströme mit den Randbedingungen aus Messung 1 zu

$$\dot{V}_{ZU,1} = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n \quad (14)$$

$$\dot{V}_{ZZ2,1} = C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (15)$$

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

$$\dot{V}_{Z2U,1} = C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,1}^n \quad (17)$$

bestimmt werden.

## B Herleitung Fall 2, Zone 2 - Zone

Die Bilanzgleichungen für die durchgeführten Messungen (Bild 32) lauten wie für Fall 1

$$\dot{V}_{Ges.,1} = C_{HU} \cdot \Delta p_{HU}^n + C_{ZU} \cdot \Delta p_{ZU,1}^n + C_{Z2U} \cdot \Delta p_{Z2U,1}^n \quad (18)$$

$$\dot{V}_{Ges.,2} = (C_{HU} + C_{ZU}) \cdot \Delta p_{HU}^n + C_{Z2U} \cdot \Delta p_{Z2U,2}^n \quad (19)$$

$$\dot{V}_{Ges.,3} = (C_{HU} + C_{ZU} + C_{Z2U}) \cdot \Delta p_{HU}^n \quad (20)$$

Die Parameter  $C_{HU}$ ,  $C_{ZU}$  und  $C_{Z2U}$  werden analog Fall 1 bestimmt. Aus den zusätzlichen Bedingungen aus Messung 1

$$\dot{V}_1 = C_{HU} \Delta p_{HU}^n + C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n + C_{HZ2} \Delta p_{HZ2,1}^n \quad (21)$$

$$C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n + C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (22)$$

und Messung 2

$$C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n = (C_{ZZ2} + C_{HZ2}) \Delta p_{HZ2,2}^n \quad (23)$$

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

$$C_{ZZ2} = \frac{C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n + C_{HU} \Delta p_{HU}^n - \dot{V}_1 + C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n \left( \frac{\Delta p_{HZ2,1}}{\Delta p_{HZ2,2}} \right)^n}{\Delta p_{HZ2,1}^n - \Delta p_{ZZ2,1}^n} \quad (24)$$

$$C_{HZ} = \frac{C_{ZZ2} \Delta p_{HZ2,2}^n + \left( \frac{\Delta p_{HZ2,2}}{\Delta p_{HZ2,1}} \right)^n (\dot{V}_1 - C_{HU} \Delta p_{HU}^n) - C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n \left( \frac{\Delta p_{HZ2,1}}{\Delta p_{HZ,1}} \right)^n}{\Delta p_{HZ2,2}^n} \quad (25)$$

$$C_{HZ2} = \frac{\dot{V}_1 - C_{HU} \Delta p_{HU}^n - C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n}{\Delta p_{HZ2,1}^n} \quad (26)$$

Mit Hilfe der Gleichungen 7, 8, 24, 25 und 26 können die Volumenströme für die Randbedingungen von Messung 1 zu

$$\dot{V}_{ZU,1} = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n \quad (27)$$

$$\dot{V}_{ZZ2,1} = C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (28)$$

$$\dot{V}_{HZ,1} = C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n \quad (29)$$

$$\dot{V}_{Z2U,1} = C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,1}^n \quad (30)$$

$$\dot{V}_{HZ2,1} = C_{HZ2} \Delta p_{HZ2,1}^n \quad (31)$$

bestimmt werden.

## C Herleitung Fall 2, Zone - Zone 2

Die Aufstellung der Bilanzgleichungen für die durchgeführten Messungen (Bild 32) sowie die Bestimmung der Parameter  $C_{HU}$ ,  $C_{ZU}$  und  $C_{Z2U}$  erfolgt analog Fall 1. Aus den zusätzlichen Bedingungen aus Messung 1

$$\dot{V}_1 = C_{HU} \Delta p_{HU}^n + C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n + C_{HZ2} \Delta p_{HZ2,1}^n \quad (32)$$

$$C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n = C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n + C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n \quad (33)$$

sowie aus Messung 2

$$C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n = (C_{ZZ2} + C_{HZ2}) \Delta p_{HZ2,2}^n \quad (34)$$

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

$$C_{ZZ2} = \frac{C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n + C_{HU} \Delta p_{HU}^n - \dot{V}_1 + C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n \left( \frac{\Delta p_{HZ2,1}}{\Delta p_{HZ2,2}} \right)^n}{\Delta p_{HZ2,1}^n + \Delta p_{ZZ2,1}^n} \quad (35)$$



$$C_{HZ} = \frac{C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n - C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n}{\Delta p_{HZ,1}^n} \quad (36)$$

$$C_{HZ2} = \frac{C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,2}^n - C_{ZZ2} \Delta p_{HZ2,2}^n}{\Delta p_{HZ2,2}^n} \quad (37)$$

Mit Hilfe der Gleichungen 7, 8, 35, 36 und 37 können die Volumenströme für die Randbedingungen aus Messung 1 zu

$$\dot{V}_{ZU,1} = C_{ZU} \Delta p_{ZU,1}^n \quad (38)$$

$$\dot{V}_{ZZ2,1} = C_{ZZ2} \Delta p_{ZZ2,1}^n \quad (39)$$

$$\dot{V}_{HZ,1} = C_{HZ} \Delta p_{HZ,1}^n \quad (40)$$

$$\dot{V}_{Z2U,1} = C_{Z2U} \Delta p_{Z2U,1}^n \quad (41)$$

$$\dot{V}_{HZ2,1} = C_{HZ2} \Delta p_{HZ2,1}^n \quad (42)$$

bestimmt werden.

**Tabelle 6:** Messergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Opening A Door-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent  $n=0,65$ .

$\Delta p_{\text{HZ},1}$ Pa	$\Delta p_{\text{ZZ},1}$ Pa	$\Delta p_{\text{ZZ},2}$ Pa	$\zeta$	$\dot{V}_{\text{ZU}}^*$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{\text{ZU}}^*$ $\text{m}^3/\text{h}$ (%)	$\dot{V}_{\text{ZU}}$ $\text{m}^3/\text{h}$ (%)	$\dot{V}_{\text{HZ}}$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{\text{HZ}}$ $\text{m}^3/\text{h}$ (%)	$\dot{V}_{\text{tfp}}$ $\text{m}^3/\text{h}$	$\dot{V}_{\text{tfp}}$ $\text{m}^3/\text{h}$ (%)
12,3	1,9	2,9	0,2	327,8	335,6 (-2,3)	271,0 (20,9)	680,0	603,7 (12,6)	272,9	297,4 (-8,2)
12,3	18,2	24,0	0,2	254,1	327,3 (-22,4)	271,0 (-6,3)	526,4	603,7 (-12,8)	211,5	297,6 (-28,9)
12,2	34,8	45,0	0,2	252,6	322,5 (-21,7)	271,0 (-6,8)	526,1	603,7 (-12,9)	210,6	296,8 (-29,1)
41,7	0,9	10,0	0,2	579,4	623,7 (-7,1)	507,3 (14,2)	202,6	287,2 (-29,5)	180,1	262,5 (-31,4)
41,6	0,0	23,7	0,1	588,1	619,1 (-5,0)	507,3 (15,9)	207,4	287,2 (-27,8)	184,1	262,2 (-29,8)
41,5	6,1	38,6	0,2	591,2	622,5 (-5,0)	507,3 (16,5)	211,9	287,2 (-26,2)	187,6	261,6 (-28,3)
48,4	0,0	0,0	0,3	1247,8	1359,0 (-8,2)	1091,0 (14,4)	135,8	264,2 (-48,6)	133,0	260,0 (-48,9)
49,4	0,1	24,0	0,2	1142,6	1338,5 (-14,6)	1091,0 (4,7)	67,7	264,2 (-74,4)	67,1	262,5 (-74,4)
49,3	0,5	48,6	0,2	1184,2	1340,7 (-11,7)	1091,0 (8,6)	74,0	264,2 (-72,0)	73,3	262,4 (-72,1)
12,1	1,8	2,7	0,8	371,8	293,0 (26,9)	170,0 (118,7)	783,8	603,7 (29,8)	310,8	295,0 (5,4)
12,4	18,3	24,1	0,8	256,8	291,0 (-11,8)	170,0 (51,1)	528,1	603,7 (-12,5)	213,4	299,0 (-28,6)
12,4	34,3	48,2	0,8	406,8	291,7 (39,5)	170,0 (139,3)	834,1	603,7 (38,2)	337,8	299,0 (13,0)
41,2	1,0	9,6	0,7	565,8	605,0 (-6,5)	325,0 (74,1)	207,5	287,0 (-27,7)	182,9	260,8 (-29,9)
41,3	3,8	24,0	0,8	571,5	609,5 (-6,2)	325,0 (75,9)	207,2	287,2 (-27,9)	183,0	261,3 (-30,0)
41,0	6,3	38,9	0,8	568,7	607,8 (-6,4)	324,7 (75,1)	212,4	287,2 (-26,1)	186,7	260,1 (-28,2)
48,8	0,0	0,0	0,4	1206,3	1301,2 (-7,3)	645,2 (87,0)	107,8	264,2 (-59,2)	106,1	261,0 (-59,3)
48,2	0,1	24,0	0,3	1231,1	1281,1 (-3,9)	645,2 (90,8)	145,6	264,2 (-44,9)	142,1	259,4 (-45,2)
48,2	1,1	47,6	0,8	1221,8	1268,0 (-3,6)	645,2 (89,4)	145,5	264,2 (-44,9)	142,0	259,3 (-45,2)

Fortsetzung Opening A Door												
$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,2}$ Pa	$\zeta$ -	$V_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h	$V_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h (%)	$V_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h (%)	$V_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$V_{HZ}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$V_{tUp}$ m <sup>3</sup> /h	$V_{tUp}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)		
12,1	1,8	2,5	1,5	201,8	318,0 (-36,6)	124,0 (62,7)	424,7	603,0 (-29,6)	168,6	295,0 (-42,9)		
11,9	18,4	23,8	1,5	327,1	311,0 (5,2)	124,0 (163,8)	693,8	604,0 (14,9)	273,8	294,0 (-6,9)		
11,7	34,7	48,8	1,5	453,8	319,0 (42,3)	124,0 (265,9)	984,3	604,0 (63,0)	381,9	290,0 (31,7)		
41,0	1,0	9,6	1,3	566,3	599,8 (-5,6)	220,9 (156,4)	211,2	287,2 (-26,5)	185,7	260,2 (-28,6)		
40,8	3,5	22,5	1,6	569,7	583,5 (-2,4)	220,9 (157,9)	215,7	287,2 (-24,9)	189,1	259,7 (-27,2)		
41,8	6,6	39,2	1,8	564,9	604,0 (-6,5)	221,0 (155,6)	196,2	287,0 (-31,6)	174,6	241,0 (-27,6)		
48,4	0,0	0,0	1,9	1286,6	1344,6 (-4,3)	472,6 (172,2)	141,6	264,2 (-46,4)	138,5	259,9 (-46,7)		
48,3	0,0	23,7	0,4	1292,3	1317,0 (-1,9)	473,0 (173,2)	148,9	264,0 (-43,6)	145,5	260,0 (-44,1)		
48,4	0,9	48,4	1,4	1303,3	1108,5 (17,6)	472,6 (175,8)	141,2	264,2 (-46,6)	138,3	260,0 (-46,8)		
14,3	2,4	4,0	0,2	164,9	179,1 (-8,0)	144,0 (14,5)	298,6	281,0 (6,3)	132,4	151,0 (-12,3)		
14,9	18,2	26,6	0,2	123,0	173,0 (-28,9)	144,0 (-14,6)	213,9	281,0 (-23,9)	97,6	154,0 (-36,6)		
13,8	31,9	46,8	0,2	196,1	173,5 (13,0)	144,0 (36,2)	367,2	281,0 (30,7)	159,0	148,0 (7,4)		
40,3	1,0	9,3	0,2	299,9	293,6 (2,1)	240,0 (25,0)	118,5	126,0 (-6,0)	103,1	114,0 (-9,6)		
41,1	4,3	29,0	0,3	296,0	300,2 (-1,4)	240,0 (23,3)	109,1	126,0 (-13,4)	96,1	115,0 (-16,4)		
41,2	6,5	40,1	0,2	289,5	292,6 (-1,1)	240,0 (20,6)	105,8	126,0 (-16,0)	93,4	115,0 (-18,8)		
48,1	0,0	0,0	0,2	727,3	659,0 (10,4)	538,0 v35,2)	88,4	138,0 (-40,0)	86,2	135,0 (-36,2)		
49,1	0,0	24,8	0,4	658,8	665,8 (-1,1)	538,0 v22,5)	49,5	138,0 (-64,1)	48,9	136,0 (-64,0)		
48,4	0,9	48,7	0,2	669,8	660,3 (1,4)	538,0 (24,5)	71,9	138,0 (-47,9)	70,4	136,0 (-48,2)		

Fortsetzung Opening A Door													
$\Delta p_{HZ,1}$	$\Delta p_{ZZ,1}$	$\Delta p_{ZZ,2}$	$\zeta$	$\dot{V}_{ZU}^*$	$\dot{V}_{ZU}^*$	$\dot{V}_{ZU}^*$	$\dot{V}_{ZU}$	$\dot{V}_{HZ}$	$\dot{V}_{HZ}$	$\dot{V}_{HZ}$	$\dot{V}_{HZ}$	$\dot{V}_{tfp}$	$\dot{V}_{tfp}$
Pa	Pa	Pa	-	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h (%)	m <sup>3</sup> /h (%)	m <sup>3</sup> /h (%)	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h (%)	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup> /h (%)
14,3	2,2	3,4	0,8	151,8	184,3 (-17,6)	103,0 (47,4)	274,6	281,0 (-2,3)	121,9	151,0 (-19,3)	121,9	151,0 (-19,3)	151,0 (-19,3)
13,3	18,2	25,5	0,7	176,1	176,1 (0,0)	103,0 (70,9)	340,9	281,0 (21,3)	144,0	146,0 (-1,3)	144,0	146,0 (-1,3)	146,0 (-1,3)
13,6	33,5	47,1	0,7	142,3	175,9 (-19,1)	103,0 (38,1)	270,0	281,0 (-3,9)	115,6	147,0 (-21,3)	115,6	147,0 (-21,3)	147,0 (-21,3)
42,3	1,1	9,7	0,7	292,5	312,9 (-6,5)	176,0 (66,2)	96,3	126,0 (-23,6)	86,4	116,0 (-25,5)	86,4	116,0 (-25,5)	116,0 (-25,5)
43,1	3,4	27,1	0,8	320,6	319,6 (0,3)	176,0 (82,2)	97,5	126,0 (-22,6)	88,5	117,0 (-24,3)	88,5	117,0 (-24,3)	117,0 (-24,3)
41,2	5,9	39,5	0,8	307,6	314,7 (-2,3)	175,8 (74,9)	113,1	126,2 (-10,4)	99,7	114,7 (-13,1)	99,7	114,7 (-13,1)	114,7 (-13,1)
47,7	0,0	0,0	1,0	703,9	636,1 (10,7)	327,0 (115,3)	97,7	138,0 (-29,2)	94,7	134,0 (-29,3)	94,7	134,0 (-29,3)	134,0 (-29,3)
49,0	0,0	25,2	1,5	647,2	639,8 (1,1)	326,0 (98,5)	52,3	138,0 (-62,1)	51,6	136,0 (-62,1)	51,6	136,0 (-62,1)	136,0 (-62,1)
48,0	0,9	48,3	0,7	657,7	630,8 (4,3)	327,0 (101,1)	82,9	138,0 (-39,9)	80,7	135,0 (-40,2)	80,7	135,0 (-40,2)	135,0 (-40,2)
14,9	1,5	2,7	1,1	171,2	179,0 (-4,4)	81,1 (111,0)	299,1	281,4 (6,3)	136,0	154,1 (-11,7)	136,0	154,1 (-11,7)	154,1 (-11,7)
14,0	17,0	23,6	1,1	156,9	170,9 (-8,2)	81,0 (93,7)	289,1	281,0 (2,9)	126,6	150,0 (-15,6)	126,6	150,0 (-15,6)	150,0 (-15,6)
14,4	33,4	47,2	1,2	136,0	173,7 (-21,7)	81,0 (67,9)	244,9	281,0 (-12,9)	109,1	152,0 (-28,3)	109,1	152,0 (-28,3)	152,0 (-28,3)
40,8	0,1	6,3	0,3	298,9	274,1 (9,0)	126,0 (137,2)	113,2	126,0 (-10,2)	99,2	114,0 (-13,0)	99,2	114,0 (-13,0)	114,0 (-13,0)
42,5	3,5	26,0	1,5	283,7	317,6 (-10,7)	126,0 (125,2)	91,9	126,0 (-27,1)	82,7	117,0 (-29,3)	82,7	117,0 (-29,3)	117,0 (-29,3)
41,7	6,2	40,6	1,5	310,6	303,3 (2,4)	126,0 (146,5)	109,3	126,0 (-13,3)	97,0	115,0 (-15,6)	97,0	115,0 (-15,6)	115,0 (-15,6)
49,0	0,0	0,0	1,8	673,1	647,7 (3,9)	236,0 (185,2)	54,7	138,0 (-60,4)	53,9	136,0 (-60,4)	53,9	136,0 (-60,4)	136,0 (-60,4)
48,9	0,0	25,7	2,6	680,3	641,8 (6,0)	236,0 (188,3)	58,7	138,0 (-57,5)	57,8	136,0 (-57,5)	57,8	136,0 (-57,5)	136,0 (-57,5)
49,1	0,8	47,6	1,7	643,5	639,8 (0,6)	236,4 (172,2)	46,8	137,6 (-66,0)	46,3	136,5 (-66,1)	46,3	136,5 (-66,1)	136,5 (-66,1)

**Tabelle 7:** Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Adding A Hole-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent  $n=0,65$ .

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,2}$ Pa	$\zeta$	$\dot{V}_{ZU}^*$ $m^3/h$	$\dot{V}_{ZU}^*$ $m^3/h$ (%)	$\dot{V}_{ZU}^*$ $m^3/h$ (%)	$\dot{V}_{HZ}$ $m^3/h$	$\dot{V}_{HZ}$ $m^3/h$ (%)	$\dot{V}_{ttp}$ $m^3/h$	$\dot{V}_{ttp}$ $m^3/h$ (%)	A kl. $cm^2$	A gr. $cm^2$
12,3	1,9	5,2	2,5	0,2	572,1	335,6 (70,5)	271,0 (111,1)	1186,9	604,0 (96,5)	476,4	297,0 (60,4)	-	242,0
41,7	0,9	27,4	3,9	0,2	1072,4	623,4 (72,0)	507,0 (111,5)	375,0	287,0 (30,7)	333,3	262,0 (27,2)	-	159,4
41,6	0,0	21,3	13,5	0,1	1171,7	618,7 (89,4)	507,0 (131,1)	413,1	287,0 (43,9)	366,7	262,0 (40,0)	-	271,0
41,5	6,1	21,2	21,7	0,2	1176,8	622,2 (89,1)	507,0 (132,1)	421,7	287,0 (46,9)	373,3	262,0 (42,5)	-	271,0
41,2	1,0	26,7	4,1	0,7	1048,7	604,6 (73,4)	324,0 (223,7)	384,5	287,0 (34,0)	339,1	260,1 (30,4)	-	159,4
41,3	3,7	26,9	10,9	0,8	1064,6	609,0 (74,8)	324,0 (228,6)	385,9	287,0 (34,4)	340,9	260,0 (31,1)	-	159,4
41,0	6,3	26,9	17,6	0,8	1083,3	607,0 (78,5)	324,0 (234,3)	404,6	287,0 (41,0)	355,6	260,0 (36,8)	-	159,4
41,0	1,0	26,9	4,1	1,3	1085,2	600,0 (80,9)	221,0 (391,0)	404,8	287,0 (41,0)	355,8	260,0 (36,9)	-	159,4
40,8	3,5	26,3	10,4	1,6	1045,8	583,6 (79,2)	221,0 (373,2)	396,0	287,0 (38,0)	347,1	260,0 (33,5)	-	159,4
41,8	6,6	26,7	17,5	1,8	1015,9	604,0 (68,2)	221,0 (359,7)	352,8	287,0 (22,9)	314,0	260,0 (20,8)	-	159,4
14,3	2,4	7,4	3,1	0,2	249,0	179,0 (39,1)	143,9 (73,1)	451,0	281,4 (60,3)	200,0	151,1 (32,4)	-	75,3
15,0	18,2	7,3	22,2	0,2	233,6	172,9 (35,1)	143,9 (62,3)	406,3	281,4 (44,4)	185,4	154,5 (20,0)	-	75,3
13,8	31,9	7,7	40,1	0,2	279,6	173,4 (61,3)	143,9 (94,3)	523,7	281,4 (86,1)	226,7	148,4 (52,8)	-	75,3

Fortsetzung Adding A Hole													
$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,2}$ Pa	$\zeta$	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{tfp}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{tfp}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	A kl. cm <sup>2</sup>	A gr. cm <sup>2</sup>
40,3	1,0	27,3	3,8	0,2	546,2	293,5 (86,1)	239,9 (127,7)	215,8	126,0 (71,3)	187,7	113,5 (65,4)	-	75,3
41,1	4,3	27,9	12,0	0,2	545,7	300,1 (81,8)	239,9 (127,5)	201,2	126,6 (58,9)	177,2	114,7 (54,5)	-	75,3
41,2	6,5	26,8	17,4	0,2	493,7	292,5 (68,8)	239,9 (105,8)	180,5	126,6 (42,5)	159,2	114,8 (38,7)	-	75,3
14,3	2,2	7,3	2,8	0,8	240,3	183,8 (30,8)	102,5 (134,5)	434,6	281,4 (54,5)	193,0	151,2 (27,6)	-	75,3
13,3	18,2	6,7	21,5	0,7	232,6	175,6 (32,5)	102,5 (126,9)	450,4	281,0 (60,3)	190,3	123,0 (54,7)	-	75,3
13,6	33,5	6,9	40,4	0,7	238,5	175,4 (36,0)	102,5 (132,7)	452,7	281,4 (60,9)	194,1	147,3 (31,8)	-	75,3
42,3	1,1	29,7	4,6	0,7	592,3	312,7 (89,4)	175,8 (236,9)	195,1	126,6 (54,1)	175,1	116,3 (50,5)	-	75,3
43,1	3,4	29,4	10,6	0,8	542,1	319,4 (69,7)	175,8 (208,4)	164,9	126,6 (30,3)	149,7	117,3 (27,6)	-	75,3
41,2	5,9	28,9	16,4	0,8	600,0	314,9 (90,5)	176,0 (240,9)	220,6	126,0 (75,1)	194,4	145,0 (34,1)	-	75,3
14,9	1,5	7,6	2,2	1,1	248,3	179,0 (38,7)	81,1 (206,2)	434,0	281,4 (54,2)	197,4	154,1 (28,1)	-	75,3
14,0	17,0	7,1	20,5	1,1	241,7	171,0 (41,3)	81,1 (198,0)	445,4	281,4 (58,3)	195,1	149,7 (30,3)	-	75,3
14,4	33,4	7,2	40,1	1,2	240,1	173,8 (38,2)	81,1 (196,1)	432,3	281,4 (53,6)	192,5	151,6 (27,0)	-	75,3
40,8	0,1	26,3	2,6	0,3	489,9	274,5 (78,5)	126,4 (287,6)	185,6	126,6 (46,6)	162,7	114,2 (42,5)	-	75,3
42,5	3,5	24,7	7,0	1,5	397,5	318,0 (25,0)	126,4 (214,5)	128,7	126,6 (1,7)	115,8	116,5 (-0,6)	-	75,3
41,7	6,2	28,7	16,9	1,5	567,2	303,7 (86,8)	126,4 (348,7)	199,6	126,6 (57,6)	177,2	115,4 (53,6)	-	75,2

Fortsetzung Adding A Hole

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,2}$ Pa	$\zeta$	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU}^{*soll}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU}^{soll}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ}^{soll}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{tfp}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{tfp}^{soll}$ m <sup>3</sup> /h (%)	A kl. cm <sup>2</sup>	A gr. cm <sup>2</sup>
43,1	6,5	39,8	11,3	0,2	2944,5	1341,0 (119,57)	1061,0 (169,9)	892,2	264,0 (237,9)	810,5	245,0 (230,8)	159,4	308,0
38,1	4,0	22,7	13,2	0,3	195,2	1280,9 (-84,764)	615,0 (-69,7)	91,6	264,0 (-65,3)	76,8	231,0 (-66,8)	242,0	573,6
43,2	6,0	36,9	11,6	0,8	1264,3	1268,0 (-0,3)	615,0 (96,0)	380,6	264,0 (44,1)	346,1	218,0 (58,7)	139,8	308,0
39,3	8,6	23,3	25,9	1,4	16,5	1329,0 (-98,8)	442,0 (-96,5)	7,0	264,0 (-97,3)	6,0	234,0 (-97,4)	242,0	573,6
41,1	0,0	28,9	0,0	0,2	488,5	617,6 (-20,9)	508,0 (-9,2)	180,7	138,0 (30,9)	159,1	125,0 (27,3)	101,3	272,4
41,8	3,8	29,4	9,8	0,4	415,9	665,5 (-37,5)	507,7 (-22,7)	143,9	137,6 (4,6)	128,1	126,0 (1,7)	101,3	272,4
41,4	8,7	23,2	25,3	0,2	303,8	660,0 (-53,9)	507,7 (-43,5)	109,4	137,6 (-20,5)	96,8	125,4 (-22,8)	101,3	343,7
40,4	0,0	23,4	0,0	1,0	442,0	635,7 (-30,5)	296,6 (35,3)	173,2	137,6 (25,9)	150,9	123,9 (21,8)	101,3	343,7
39,6	4,2	24,1	17,7	1,5	632,9	640,4 (-1,2)	296,6 (93,8)	266,0	137,6 (93,6)	228,8	122,6 (86,6)	101,3	343,7
39,7	9,3	23,0	26,1	0,7	495,8	630,4 (-21,4)	296,6 (51,8)	205,5	137,6 (49,3)	177,0	122,9 (44,0)	101,3	343,7
40,9	0,0	24,1	0,0	1,8	439,4	648,1 (-32,2)	206,4 (85,9)	164,1	137,6 (19,3)	144,3	124,8 (15,6)	101,3	343,7
41,1	3,9	24,6	12,9	2,6	465,0	642,2 (-27,6)	206,4 (96,7)	171,4	137,6 (24,6)	151,0	125,0 (20,8)	101,3	343,7
40,4	8,5	23,7	24,5	1,7	476,7	639,8 (-25,5)	206,4 (101,6)	186,6	137,6 (35,6)	162,6	123,9 (31,2)	101,3	343,7

**Tabelle 8:** Messergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Guard Zone-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent  $n=0,65$ .

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,2}$ Pa	$\zeta$ -	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU}^*$ , soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU}$ , soll m <sup>3</sup> /h (%)
1,2	2,8	0,0	0,0	0,2	275,1	334,1 (-17,7)	271,0 (1,5)
1,1	22,9	0,0	0,0	0,2	251,4	326,0 (-22,9)	271,0 (-7,3)
1,1	45,6	0,0	0,0	0,2	256,5	322,9 (-20,6)	271,0 (-5,3)
0,4	9,8	0,0	0,0	0,2	698,1	622,6 (12,1)	507,3 (37,6)
0,6	23,4	0,0	0,0	0,1	693,4	618,4 (12,1)	507,3 (36,7)
0,7	38,1	0,0	0,0	0,2	696,5	621,8 (12,0)	507,3 (37,3)
0,7	9,5	0,0	0,0	0,7	667,3	604,8 (10,3)	324,7 (105,5)
0,8	23,5	0,0	0,0	0,8	661,0	606,2 (9,0)	324,7 (103,6)
0,9	37,5	0,0	0,0	0,8	660,0	602,5 (9,6)	324,7 (103,3)
0,9	9,4	0,0	0,0	1,3	712,9	596,2 (19,6)	220,9 (222,7)
0,8	39,6	0,0	0,0	1,8	678,0	605,0 (12,1)	221,0 (206,8)
0,5	3,8	0,0	0,0	0,2	148,5	178,5 (-16,8)	143,9 (3,2)
0,2	27,2	0,0	0,0	0,2	149,7	173,2 (-13,6)	143,9 (4,0)
0,6	43,5	0,0	0,0	0,2	148,6	172,4 (-13,8)	143,9 (3,3)
0,5	9,1	0,0	0,0	0,2	290,7	292,9 (-0,8)	239,9 (21,2)
0,9	28,1	0,0	0,0	0,3	300,6	299,2 (0,5)	239,9 (25,3)
0,7	39,4	0,0	0,0	0,2	292,1	291,7 (0,1)	239,9 (21,8)
0,7	0,0	0,0	0,0	0,2	119,6	659,0 (-81,9)	538,0 (-77,8)
0,6	24,8	0,0	0,0	0,4	776,7	665,4 (16,7)	537,7 (44,5)
0,5	49,3	0,0	0,0	0,2	760,1	660,7 (15,0)	537,7 (41,4)



Fortsetzung Guard Zone									
$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,2}$ Pa	$\zeta$ -	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU}^*$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)		
0,5	3,4	0,0	0,0	0,8	146,6	183,6 (-20,1)	102,5 (43,1)		
0,4	25,2	0,0	0,0	0,7	143,7	175,1 (-17,9)	102,5 (40,2)		
0,4	46,0	0,0	0,0	0,7	145,1	174,6 (-16,9)	102,5 (41,5)		
0,5	10,1	0,0	0,0	0,7	310,7	315,6 (-1,6)	175,8 (76,7)		
0,2	25,7	0,0	0,0	0,8	313,7	315,6 (-0,6)	175,8 (78,4)		
0,7	40,0	0,0	0,0	0,8	316,0	316,0 (0,0)	176,0 (79,6)		
0,3	0,0	0,0	0,0	1,0	771,7	634,8 (21,6)	326,6 (136,3)		
0,4	24,4	0,0	0,0	1,5	754,9	635,9 (18,7)	326,6 (131,1)		
0,7	48,3	0,0	0,0	0,7	717,2	630,3 (13,8)	326,6 (119,6)		
0,4	2,6	0,0	0,0	1,1	149,2	177,0 (-15,7)	81,1 (84,0)		
0,5	23,6	0,0	0,0	1,1	141,0	171,0 (-17,6)	81,1 (73,8)		
0,5	46,7	0,0	0,0	1,2	1465,4	173,3 (-16,1)	81,1 (79,2)		
0,0	6,9	0,0	0,0	0,3	315,5	281,0 (12,3)	126,4 (149,6)		
0,9	26,6	0,0	0,0	1,5	322,7	320,3 (0,8)	126,4 (155,3)		
-0,1	38,0	0,0	0,0	1,5	301,8	298,2 (1,2)	126,4 (138,8)		
0,3	0,0	0,0	0,0	1,8	783,1	647,1 (21,0)	236,4 (231,3)		
0,3	24,6	0,0	0,0	2,6	777,6	634,3 (22,6)	236,4 (229,0)		
0,7	46,0	0,0	0,0	1,7	733,3	632,8 (15,9)	236,4 (210,2)		

**Tabelle 9:** Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Deduktions-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent  $n=0,65$ .

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,2}$ Pa	$\zeta$ -	$V_{ZU}^*$ $m^3/h$	$V_{ZU}^* \text{ soll}$ $m^3/h$ (%)	$V_{ZU} \text{ soll}$ $m^3/h$ (%)	$V_{HZ}$ $m^3/h$	$V_{HZ} \text{ soll}$ $m^3/h$ (%)
49,3	2,6	0,0	0,0	0,2	427,1	331,5 (28,9)	271,0 (57,6)	292,4	603,7 (-51,6)
51,3	24,0	0,0	0,0	0,2	581,9	327,3 (77,8)	271,0 (114,7)	137,1	603,7 (-77,3)
49,8	45,1	0,0	0,0	0,2	489,0	322,6 (51,6)	271,0 (80,4)	374,6	603,7 (-38,0)
50,4	9,7	0,0	0,0	0,2	689,2	622,4 (10,7)	507,3 (35,9)	203,7	287,2 (-29,1)
50,4	22,8	0,0	0,0	0,1	695,1	617,0 (12,7)	507,3 (37,0)	212,2	287,2 (-26,1)
50,6	37,3	0,0	0,0	0,2	706,8	620,6 (13,9)	507,3 (39,3)	193,4	287,2 (-32,7)
50,7	9,2	0,0	0,0	0,7	667,6	599,7 (11,3)	324,7 (105,6)	258,7	287,2 (-9,9)
50,7	23,3	0,0	0,0	0,8	679,2	605,1 (12,3)	324,7 (109,2)	246,3	287,2 (-14,3)
50,9	37,4	0,0	0,0	0,8	685,6	785,0 (-12,7)	507,3 (35,2)	241,2	287,2 (-16,0)
50,8	9,7	0,0	0,0	1,3	794,7	601,9 (32,0)	220,9 (259,8)	171,4	287,2 (-40,3)
50,9	21,8	0,0	0,0	1,8	775,6	578,4 (34,1)	220,9 (251,1)	191,6	287,2 (-33,3)
50,8	38,6	0,0	0,0	1,8	686,6	601,0 (14,3)	221,0 (210,7)	230,9	287,2 (-19,6)
50,4	3,6	0,0	0,0	0,2	150,8	177,3 (-14,9)	143,9 (4,8)	182,2	281,4 (-35,3)
50,0	27,2	0,0	0,0	0,2	167,8	173,2 (-3,1)	143,9 (16,6)	121,3	281,4 (-56,9)
50,3	45,2	0,0	0,0	0,2	183,3	172,9 (6,0)	143,9 (27,4)	94,6	281,4 (-66,4)
50,5	7,8	0,0	0,0	0,2	278,1	289,1 (-3,8)	239,9 (15,9)	70,8	126,2 (-43,9)
50,8	26,7	0,0	0,0	0,3	283,7	297,7 (-4,7)	239,9 (18,3)	72,1	126,2 (-42,9)
50,6	37,6	0,0	0,0	0,2	276,3	290,6 (-4,9)	239,9 (15,2)	73,3	126,4 (-42,0)
50,8	0,0	0,0	0,0	0,2	119,2	659,0 (-81,9)	538,0 (-77,9)	29,2	138,0 (-78,9)
50,6	24,7	0,0	0,0	0,4	782,4	665,1 (17,6)	537,7 (45,5)	175,6	137,6 (27,6)
50,6	48,2	0,0	0,0	0,2	758,9	659,3 (15,1)	537,7 (41,1)	204,5	137,6 (48,7)

Fortsetzung Deduktion										
$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,2}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,2}$ Pa	$\zeta$ -	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU}^*$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h (%)
50,4	3,2	0,0	0,0	0,8	156,7	181,1 (-13,5)	102,5 (52,9)	168,9	281,4 (-40,0)	
50,2	23,6	0,0	0,0	0,7	149,9	240,5 (-37,7)	102,5 (46,3)	160,4	281,0 (-42,9)	
50,2	44,6	0,0	0,0	0,7	138,6	173,5 (-20,1)	102,5 (35,2)	160,2	281,4 (-43,1)	
50,5	10,5	0,0	0,0	0,7	301,4	318,1 (-5,3)	175,8 (71,4)	46,8	126,2 (-62,9)	
50,0	25,3	0,0	0,0	0,8	311,3	314,5 (-1,0)	175,8 (77,1)	36,3	126,2 (-71,3)	
50,6	38,0	0,0	0,0	0,8	298,7	312,4 (-4,4)	176,0 (69,7)	60,3	126,0 (-52,1)	
50,2	0,0	0,0	0,0	1,0	739,2	635,7 (16,3)	326,6 (126,3)	222,8	137,6 (61,9)	
50,3	24,5	0,0	0,0	1,5	744,3	636,3 (17,0)	326,6 (127,9)	196,1	137,6 (42,5)	
50,7	46,2	0,0	0,0	0,7	700,9	623,8 (12,4)	326,6 (114,6)	243,6	137,6 (77,0)	
50,3	2,5	0,0	0,0	1,1	179,8	226,8 (-20,7)	81,1 (121,7)	114,1	281,4 (-59,4)	
50,3	23,2	0,0	0,0	1,1	177,9	170,3 (4,5)	81,1 (119,4)	120,3	281,4 (-57,2)	
50,4	44,1	0,0	0,0	1,2	166,0	170,8 (-2,8)	81,1 (104,7)	154,7	281,4 (-45,0)	
49,9	6,4	0,0	0,0	0,3	308,0	275,5 (11,8)	126,4 (143,6)	38,4	126,2 (-69,5)	
50,7	24,3	0,0	0,0	1,5	303,7	312,0 (-2,7)	126,4 (140,3)	59,2	126,2 (-53,1)	
50,4	37,4	0,0	0,0	1,5	291,9	297,1 (-1,8)	126,4 (131,0)	64,1	126,2 (-49,2)	
50,2	0,0	0,0	0,0	1,8	758,2	648,1 (17,0)	236,4 (220,7)	208,3	137,6 (51,4)	
50,2	23,0	0,0	0,0	2,6	752,8	622,5 (20,9)	236,4 (218,4)	209,1	281,4 (-25,7)	
50,6	45,3	0,0	0,0	1,7	731,2	629,9 (16,1)	236,4 (209,3)	245,7	281,4 (-12,7)	

**Tabelle 10:** Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Erweiterte Opening A Door-Methode.  
Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent n=0,65.

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,2}$ Pa	$\zeta$ -	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU,1}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZZ2,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ2,1}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)
12,3	1,9	2,9	0,2	43,9	235,5 (-81,4)	115,3	52,3 (120,5)	159,1	297,4 (-46,5)
12,3	18,2	24,0	0,2	210,9	235,4 (-10,4)	41,0	49,2 (-16,7)	251,9	297,6 (-15,4)
12,2	34,8	45,0	0,2	121,4	235,7 (-48,5)	54,1	45,6 (18,7)	175,5	296,8 (-40,9)
41,7	0,9	10,0	0,2	146,7	203,9 (-28,0)	23,7	36,5 (-35,1)	170,4	262,5 (-35,1)
41,6	0,1	23,7	0,1	158,6	205,0 (-22,6)	3,0	23,2 (-87,1)	161,6	262,2 (-38,4)
41,5	6,1	38,6	0,2	157,9	204,1 (-22,6)	30,4	45,9 (-33,7)	188,3	261,6 (-28,0)
49,4	0,1	24,0	0,2	58,3	123,9 (-53,0)	5,6	19,7 (-71,7)	63,8	262,5 (-75,7)
12,0	1,8	2,7	0,8	120,6	147,2 (-18,1)	180,2	122,3 (47,3)	300,8	295,0 (2,0)
12,4	18,3	24,1	0,8	111,2	146,5 (-24,1)	100,7	121,3 (-17,0)	211,9	299,0 (-29,1)
41,2	1,0	9,6	0,7	106,8	135,7 (-21,3)	56,7	91,3 (-37,9)	163,5	260,8 (-37,3)
41,3	3,7	24,0	0,8	106,4	134,7 (-21,0)	73,5	113,4 (-35,2)	179,9	261,3 (-31,2)
41,0	6,3	38,9	0,8	109,1	137,3 (-20,5)	81,0	115,2 (-29,7)	190,1	260,1 (-26,9)
12,0	18,4	23,8	1,5	127,4	107,3 (18,8)	141,5	165,0 (-14,2)	268,8	294,0 (-8,6)
41,0	1,0	9,6	1,3	68,3	90,3 (-24,3)	82,8	121,2 (-31,7)	151,1	260,2 (-41,9)
40,8	3,5	22,5	1,6	87,6	91,3 (-4,0)	95,6	143,2 (-33,3)	183,2	259,7 (-29,5)
41,8	6,6	39,2	1,8	73,3	86,2 (-15,0)	98,9	158,1 (-37,5)	172,1	241,0 (-28,6)
48,3	0,0	23,7	0,4	75,2	87,6 (-14,2)	11,1	33,8 (-67,3)	86,3	260,0 (-66,8)

Fortsetzung Erweiterte Opening A Door, Fall 1

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,2}$ Pa	$\zeta$ -	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZU,1}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{ZZ2,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ2,1}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ}$ soll m <sup>3</sup> /h (%)
15,0	18,2	26,6	0,2	110,2	119,3 (-7,7)	23,5	24,3 (-3,2)	133,7	154,0 (-13,2)
13,8	31,9	46,8	0,2	196,7	121,4 (62,0)	-0,5	24,7 (-102,0)	196,2	148,0 (32,6)
41,1	4,3	29,0	0,2	85,1	100,3 (-15,1)	14,4	24,6 (-41,6)	99,4	115,0 (-13,5)
41,2	6,5	40,1	0,2	97,3	99,7 (-2,4)	0,5	21,7 (-97,6)	97,9	115,0 (-14,9)
13,3	18,2	25,5	0,7	136,4	86,9 (56,9)	54,2	61,9 (-12,4)	190,6	146,0 (30,5)
13,6	33,5	47,1	0,7	155,3	86,5 (79,5)	1,6	61,9 (-97,4)	156,9	147,0 (6,7)
43,1	3,4	27,1	0,8	69,5	62,8 (10,6)	21,9	52,9 (-58,5)	91,4	117,0 (-21,9)
41,2	5,9	39,4	0,8	95,8	71,3 (34,4)	9,0	54,5 (-83,5)	104,8	114,7 (-8,6)
14,0	17,0	23,6	1,1	93,3	67,7 (37,8)	71,3	76,4 (-6,7)	164,6	150,0 (9,7)
42,5	3,5	25,9	1,5	34,2	46,6 (-26,8)	50,2	71,4 (-29,7)	84,4	117,0 (-27,9)
41,7	6,2	40,6	1,5	97,9	49,3 (98,4)	3,6	72,7 (-95,1)	101,5	115,0 (-11,7)

**Tabelle 11:** Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 2: Erweiterte Opening A Door-Methode (Z→Z2). Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent n=0,65.

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ,1}$ Pa	$\zeta$	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ,1}$ m <sup>3</sup> /h
36,2	26,3	9,9	6,3	0,4	270,0	117,0	82,0	128,0	113,0	230,0	269,0	117,0	117,0
45,5	45,0	0,5	20,6	2,6	94,0	131,0	71,0	190,0	25,0	118,0	114,0	114,0	114,0
8,8	8,5	0,3	8,8	0,2	104,0	119,0	4,0	37,0	3,0	34,0	49,0	36,0	36,0
30,6	28,5	2,1	4,0	0,3	133,0	99,0	18,0	78,0	21,0	58,0	91,0	79,0	79,0
37,7	36,5	1,2	13,0	1,5	148,0	120,0	73,0	238,0	20,0	142,0	317,0	161,0	161,0

**Tabelle 12:** Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 2: Erweiterte Opening A Door-Methode (Z2 → Z). Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent  $n=0,65$ .

$\Delta p_{HZ,1}$ Pa	$\Delta p_{HZ2,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,1}$ Pa	$\Delta p_{ZZ2,2}$ Pa	$\zeta$	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU,1}$ soll m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZU,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ2,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{ZZ2,1}$ soll m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{Z2U}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{Z2U}$ soll m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ2,1}$ m <sup>3</sup> /h	$\dot{V}_{HZ2,1}$ soll m <sup>3</sup> /h
12,6	26,6	26,6	20,4	0,7	76,0	63,0	76,0	143,0	126,0	126,0	50,0	68,0	67,0
37,5	43,3	43,3	24,3	1,5	68,0	35,0	68,0	118,0	132,0	132,0	64,0	67,0	139,0
4,1	4,4	4,4	2,3	0,7	72,0	70,0	72,0	81,0	80,0	80,0	8,0	225,0	92,0
38,4	40,4	40,4	21,0	0,3	69,0	103,0	69,0	111,0	82,0	82,0	14,0	38,0	36,0
8,7	15,2	15,2	11,0	1,1	29,0	46,0	29,0	118,0	76,0	76,0	47,0	106,0	106,0

## D Bild- und Tabellenverzeichnis

### Abbildungsverzeichnis

1	Maße und Volumina des Daches. . . . .	3
2	Montage des neuen Daches . . . . .	3
3	Schematische Darstellung des Daches . . . . .	4
4	Verlauf der Luftdichtheitsschicht. . . . .	5
5	Schematische Darstellung eines Schnitts durch ein Gefach. . . . .	5
6	An allen Stirnseiten der Dachelementen steht die Folie ca. 20 cm über. . . . .	6
7	Transportbefestigung der Folie . . . . .	6
8	Knickstellen von Folien . . . . .	7
9	Dehnung der Folie . . . . .	8
10	Folienüberlappung . . . . .	8
11	Faltung der Folienüberstände . . . . .	9
12	Folie auf den Giebel falten . . . . .	9
13	Folienüberstand des Dachelements . . . . .	9
14	Eckanschluß Giebel/Geschoßdecke/Dachfläche . . . . .	10
15	Flightcase mit Laptop . . . . .	11
16	Darstellung der Leckageverteilung für Fall 1 . . . . .	13
17	Leckageverteilung für Fall 2. . . . .	14
18	Schematische Darstellung der Druckdifferenzen und Verteilung der Leckagen für Fall 1 und 2. . . . .	15
19	Variation und Kombination der Parameter. . . . .	16
20	Prinzipskizze des Laborprüfstands für Luftdichtheit. . . . .	16
21	Schematische Darstellung der Leckagevolumenströme für Fall 1 . . . . .	18
22	Windgeschwindigkeit und -richtung für alle Meßtage. . . . .	20
23	Ergebnisse Opening A Door (a) . . . . .	22
24	Ergebnisse Opening A Door (b) . . . . .	23
25	Ergebnisse Adding A Hole . . . . .	24
26	Ergebnisse Guard Zone . . . . .	25



---

27	Ergebnisse Deduktion . . . . .	26
28	Variation I . . . . .	28
29	Variation II . . . . .	29
30	Variation III . . . . .	30
31	Fehlinterpretation . . . . .	31
32	Bezeichnungen für die erweiterte Meßmethode Opening A Door	33
33	Relativer Fehler des Ist-Volumenstroms Zone/Zone 2 . . . . .	34
34	Relativer Fehler des Ist-Volumenstroms Zone/Umgebung . . . . .	35
35	Relativer Fehler des Ist-Volumenstroms Zone/Gebäude . . . . .	35
36	Leckageverteilung und Nomenklatur für Fall 2 . . . . .	36
37	Druckdifferenzen $\Delta p_{HZ,1}$ und $\Delta p_{HZ2,1}$ . . . . .	37
38	Relativer Fehler in Abhängigkeit der Strömungsrichtung . . . . .	38
39	Durchströmung eines Bauteils, Querströmung im Bauteil nach [10]. . . . .	40
40	Prinzipieller Aufbau des in situ-Meßgerätes mit Meß- und Regelgrößen. . . . .	41
41	Spalt für Vergleichsmessungen . . . . .	42
42	Versuchsanordnung für die Vergleichsmessungen. . . . .	43
43	Ist-Volumenstrom in Abhängigkeit des Soll-Volumenstroms. . . . .	44
44	Prozentuale Abweichung in Abhängigkeit der Spalthöhe . . . . .	44
45	Sechseckige Grundstruktur der großen in situ Kammer. . . . .	45
46	Die Vakuumsauger sind in die Dichtebene integriert. . . . .	47
47	Abdichtungen der Eckbereiche mit Klebeband. . . . .	47
48	Anschlußelement . . . . .	48
49	Anlaufverhalten . . . . .	49
50	Unterdruckmessung . . . . .	50
51	Das in situ-Meßgerät als Doppelkammersystem im "Einsatz".	52
52	Das in situ-Meßgerät 'in Aktion'. . . . .	54
53	Leckageverteilung für Fall 1 und Fall 2. . . . .	55

## Tabellenverzeichnis

1	Herstellerangaben Fehler von Meßfühlern . . . . .	12
2	Zusammenstellung der Volumenströme . . . . .	19
3	Zusammenstellung der Versuchsbedingungen. . . . .	42
4	Daten des in situ-Meßgerätes. . . . .	46
5	Zusammenstellung der Volumenströme bei 50 Pa Differenzdruck über den Spalt. . . . .	53
6	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Opening A Door-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	63
7	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Adding A Hole-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	66
8	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Guard Zone-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	69
9	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Deduktions-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	71
10	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 1: Erweiterte Opening A Door-Methode. Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	73
11	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 2: Erweiterte Opening A Door-Methode ( $Z \rightarrow Z2$ ). Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	75
12	Meßergebnisse der Vergleichsmessungen von Fall 2: Erweiterte Opening A Door-Methode ( $Z2 \rightarrow Z$ ). Die Auswertung erfolgt mit dem Druckexponent $n=0,65$ . . . . .	76

