

1. Einführung

Mit steigendem Wärmedämmstandard kommt neben der Minimierung von Wärmebrücken vor allem der Verringerung der Lüftungswärmeverluste eine sehr große Bedeutung zu; denn: mit steigendem Wärmedämmstandard wachsen die Lüftungswärmeverluste relativ zu den Transmissionswärmeverlusten stark an. Bei Gebäuden mit Niedrigenergiehaus-Standard können die Lüftungswärmeverluste durchaus größer als die Transmissionswärmeverluste werden. Lüftungswärmeverluste können auf zwei Arten hervorgerufen werden:

- unkontrollierte Lüftungswärmeverluste infolge Luftundichtheiten des Gebäudes
- Lüftungswärmeverluste über gezielte Lüftungsvorgänge zur Sicherstellung eines behaglichen Innenraumklimas

Unverzichtbare Voraussetzung, Lüftungswärmeverluste wirkungsvoll zu verringern, ist die konsequente Realisierung einer luftdichten Gebäudehülle. Dies gilt ganz besonders für den Fall, daß Lüftungsanlagen mit zentraler Zuluftführung und Wärmerückgewinnung eingebaut werden sollen, da sonst die prinzipielle Leistungsfähigkeit eines solchen Systems nicht ausgenutzt und darüber hinaus unnötig elektrischer Strom verbraucht wird.

Aus diesem Grund werden im SynergieHaus-Projekt konkrete Anforderungen an die Luftdichtheit gestellt und diese wird durch eine Luftpichtigkeitsmessung an jedem Förderobjekt überprüft.

Üblicherweise wird die Luftdichtheit eines Gebäudes anhand des Luftwechsels bei 50 Pa Druckdifferenz zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung, dem n_{50} -Wert, angegeben. Für Gebäude mit Lüftungsanlage ist ein n_{50} -Wert kleiner $1,0 \text{ h}^{-1}$ anzustreben, um einen energetisch sinnvollen Betrieb der Lüftungsanlage zu ermöglichen.

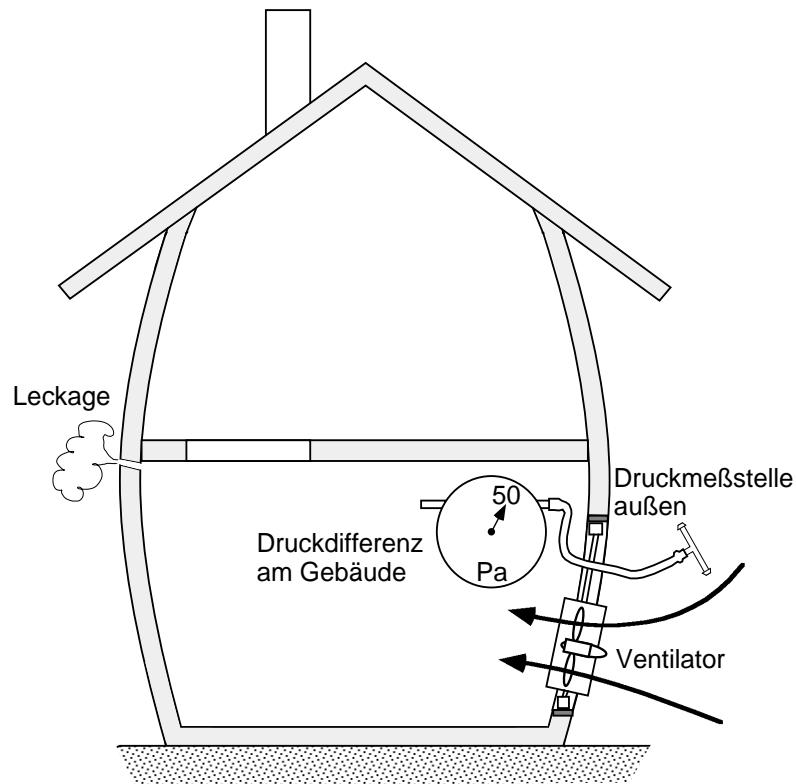
Da für die Realisierung luftdichter Gebäudehüllen in der Bundesrepublik nur wenig Erfahrung vorliegt, sind die Grenzwerte für die Luftdichtheit im SynergieHaus-Projekt höher angesetzt worden. Eine für die Förderung hinreichende Luftdichtheit wird wie folgt festgelegt:

Im Mittel zwischen Unter- und Überdruck soll der Luftwechsel bei 50 Pascal nicht mehr als das 2,5-fache des Luftvolumens der beheizten Räume pro Stunde betragen. Beim Einbau von zentralen Lüftungsanlagen ist ein 1,5-facher Luftwechsel einzuhalten.

Bindend ist die im **Fördervertrag** für das SynergieHaus Projekt genannte Forderung für den n_{50} -Wert.

Um einen ordnungsgemäßen Betrieb der Lüftungsanlage sicherzustellen und vor allem den gewünschten Energiesparbeitrag im Betrieb auch zu erreichen, empfehlen wir die Einhaltung eines Luftwechsels bei 50 Pa Druckdifferenz von $1,0 \text{ h}^{-1}$. Dies entspricht auch den Anforderungen des Teils 'Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen' der DIN 4108, welcher derzeit im Entwurf vorliegt. Der Gesetzgeber wird diese Anforderung vermutlich in eine neue Wärmeschutzverordnung übernehmen.

Luftdichtheitsmessungen anhand von Differenzdruckmethoden werden bei Gebäuden allgemein mit einer Blower Door durchgeführt.



Um derartige Messungen miteinander vergleichen zu können, muß sichergestellt werden, daß die Messungen und auch die Auswertung möglichst gleich durchgeführt werden.

Im folgenden werden die im Rahmen des SynergieHaus-Projekts für Blower Door Messungen zugrunde zu legenden Randbedingungen festgelegt. Für das SynergieHaus-Projekt beinhaltet die Luftdichtheitsmessung u.a. eine detaillierte Leckageortung, anhand derer die gravierendsten Mängel in der Luftdichtheitsschicht lokalisiert werden sollen. Mit dieser Kenntnis kann das Gebäude ggf. nachgebessert und eine hinreichende Luftdichtheit erzielt werden.

2. Durchführung der Messung

2.1 Vorbereitung

Vor der Festlegung eines Termines für die Luftdichtheitsmessung sollte der Baufortschritt detailliert überprüft werden. Weiterhin sollten vollständige Unterlagen über das Gebäude vorliegen.

2.1.1 Gebäudezustand/Baufortschritt

Folgender Punkt ist mit der Bauleitung vor dem Festlegen des Meßtermins abzuklären. Soweit möglich, sollte das Objekt vor festlegung des Meßtermins begangen werden, um sicherzustellen, daß an dem vereinbarten Termin eine sinnvolle Messung möglich ist.

"Die Luftdichtheitsebene bzw. -schicht muß komplett fertig sein"

Fehlt bei dem Gebäude ein geschlossenes, nachvollziehbares Konzept zur Luftdichtheit, welches diese Aussage zuläßt, kann die Forderung durch Einhalten folgender Punkte in hinreichendem Maße erfüllt werden:

- der **Estrich** muß aufgebracht sein.
- der **Innenputz** muß angebracht sein.
- die **Fenster** müssen fertig eingebaut und sollten vor allem auch schon **korrekt eingestellt** sein (in Bezug auf das Spiel der Scharniere). Die Dichtungen der Fenster sind nach Möglichkeit von Baurückständen zu befreien.
- **Türen zu unbeheizten Räumen** sollten vorhanden sein. Mindestens jedoch sollte die Türzarge bereits eingebaut sein (bzw. muß eine provisorische Abdichtung möglich sein).
- **Durchbrüche** (Installationen etc.) zwischen unbeheizten Räumen bzw. der Umgebung und dem restlichen Gebäude sollten im endgültigen Zustand, zumindest aber in einem im Hinblick auf die Luftdichtheit gleichwertigen 'Ersatzzustand' (ggf. provisorisch abgedichtet) sein.
- sofern **Rolläden** vorhanden sind, sollten diese eingebaut sein und der Rolladenkasten sollte in Bezug auf die Luftdichtheit im endgültigen Zustand sein.
- evtl. vorhandene **Luken** zum Spitzboden sollen eingebaut und im vorgesehnen Endzustand sein.
- die **Hauseingangstür** sollte eingebaut sein, sowie evtl. zusätzlich vorhandene verglaste Flächen bzw. offensichtliche Teile sollten eingebaut bzw. vorläufig abgedichtet sein. Insbesondere ist bei Haustürelementen darauf zu achten, daß Fußboden- und Wandanschlüsse schon im endgültig Zustand sind.
- im beheizten **Dachboden/Spitzboden** sollten die Durchbrüche durch die Dachhaut (z.B. Zu- und Abluftrohre der Lüftungsanlage, Antennenmast etc.) im fertigen Zustand sein bzw. vorübergehend abgedichtet werden.

- **Wasserleitungen und Abflußrohre** müssen abgedichtet sein (Deckel, abkleben, Siffon mit Wasser füllen).
- **Leerrohre**, die in den unbeheizten, durch **bereits installierte** Türen/Klapplukken abgetrennten Keller/Dachboden/Spitzboden führen, sollten abgedichtet werden.
- **Mehrfamilienhäuser:** die Türen (eventuell temporäre) zu den einzelnen Wohneinheiten müssen eingebaut sein.

Prinzipiell gilt: Je früher die Messung durchgeführt werden kann, desto eher ist es möglich, eventuelle Schwachstellen noch nachzubessern.

Um aussagekräftige, mit anderen Messungen vergleichbare Kennzahlen zu erhalten, muß die Gebäudehülle in einem als möglichst endgültig zu betrachtenden Zustand sein. Viele Undichtheiten können für die Messung temporär abgedichtet werden, manche nicht.

Kein Problem bereiten i.a.

- nicht angeschlossene Lüftungskanäle, sofern sie zugänglich sind.
- Rohrdurchbrüche für Dunstabzugshauben.
- noch nicht eingebaute Kellertüren, wenn die Zargen bereits eingebaut sind (vorsicht, eine einfache, dünne Folie genügt meist nicht).
- sämtliche Öffnungen ohne durchgelegte Leitungen etc., die einen sauberen, staubfreien Rand haben.

Problematisch sind

- noch nicht eingebaute Kellertüren, wenn die Zargen ebenfalls noch nicht eingebaut sind.
- generell alle Mauerdurchbrüche mit Rohren, Leitungen etc. ohne sauberen, staubfreien Rand, an dem eine Abklebung haften kann.

2.1.2 Abzuklebende Öffnungen

Alle Öffnungen, die im fertiggestellten Gebäude nicht mehr vorhanden sind bzw. sein sollten sowie Küchenabzugsöffnungen, Kamine und dergleichen sind vor der Messung abzukleben oder luftdicht zu verstopfen. Alle derartigen Maßnahmen sind bei 50 Pa Unterdruck auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen.

Im Protokoll sind alle vorgenommenen temporären Abdichtungen zu vermerken und es ist jeweils ein **Foto der Abklebung/Verstopfung** zu machen.

2.1.3 Lüftungsanlage

Zu- und Abluftöffnungen der Lüftungsanlage werden abgeklebt. Idealerweise geschieht diese Abklebung außen, an der Zu- bzw. Abluftöffnung. Ist dies nicht möglich, sollte die Abklebung am Wärmetauscher erfolgen. Ist dies ebenfalls nicht möglich, müssen die Zu- und Abluftöffnungen raumweise verschlossen werden. Vorsicht: Wird die Lüftungsanlage an den raumseitigen Öffnungen abgeklebt, können Leckagen im Rohrsystem für eine Erhöhung der gemessenen Luftundichtheit sorgen.

Soll in dem Gebäude eine Abluftanlage eingebaut werden, müssen die Zuluftelemente raumweise temporär abgedichtet werden.

2.1.4 Temporäre Abdichtungen

Häufig müssen für Messungen Abklebungen unterschiedlichster Öffnungen vorgenommen werden. Als Hilfestellung für die Wahl geeigneter Klebebänder und Vorgehensweisen folgen einige Hinweise, die bei Abklebungsmaßnahmen im Rahmen von Luftdichtheitsprüfungen beachtet werden sollten.

- **Welches Klebeband wofür?**

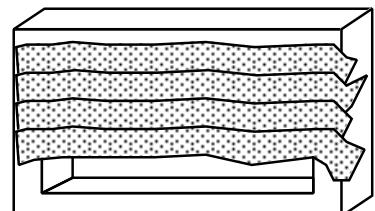
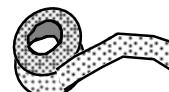
Verkleben von	mit bzw. auf	geeignetes Klebeband
PE-Folie	Tapete	feines Kreppband
PE-Folie	Metall oder Kunststoff	PVC-Band
PE-Folie	sich selbst	PVC-Band
PE-Folie	Beton/Estrich ¹⁾	grobes Kreppband
Metall oder Kunststoff	sich selbst	PVC-Band
Holz	Beton/Estrich	grobes Kreppband
Metall oder Kunststoff	Beton/Estrich	grobes Kreppband

1) Beton bzw. Estrich muß in jedem Fall staubfrei gemacht werden

- **Wie soll abgeklebt werden?**

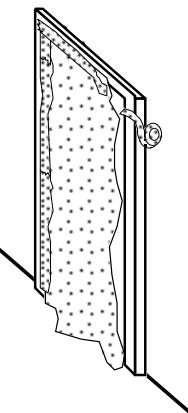
Kleinere Öffnungen mit glatter, umlaufender Kante sind am besten durch mehrere Streifen geeignetes Klebeband abzudichten

Beispiele: Zuluftöffnungen, Küchenabzugsöffnungen außen



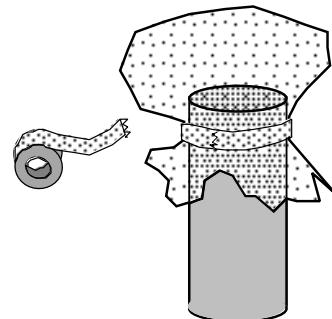
Größere Öffnungen am besten mit einer Folie abdecken und am Rand rundum festkleben. Vorsicht, ohne zusätzliches Vorstellen oder Auflegen einer Platte werden derartige Abklebungen bei 50 Pa Druckdifferenz nicht halten.

Beispiele: Kellertüren, Spitzbodenlukens



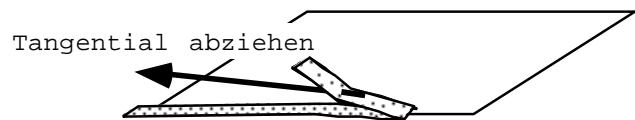
Rohre sind am besten mit einer PE-Folienhülle abzudichten. Kleine Kunststofftragetaschen leisten hier ebenfalls gute Dienste.

Beispiele: Zu-/Abluftrohre von Lüftungsanlagen



- **Wie werden Abklebungen entfernt?**

Das Klebeband grundsätzlich tangential abziehen (vgl. Skizze). Nie zu schnell abziehen. Je anfälliger der Untergrund für eventuelle Beschädigungen ist (Lack, Tapete), desto sorgfältiger bei der Entfernung von Abklebungen vorgehen.



2.2 Messung

2.2.1 Einbau der Blower Door

Bei der Wahl des Einbauortes der Blower Door sind die folgenden Punkte zu beachten:

- a) Es muß ein luftdichter Einbau des Meßsystems gewährleistet werden.
Wichtig: Je dichter das untersuchte Gebäude ist, desto wichtiger ist ein sorgfältiger Einbau der Blower Door in die gewählte Gebäudeöffnung. Gegebenenfalls ist der Einbau durch geeignete Materialien, wie Schaumprofilschnur und Klebeband (grobes Kreppband eignet sich am besten), abzudichten.
- b) Der Ventilator muß frei ausblasen bzw. ansaugen können. Das heißt, daß mindestens 1,5 m Platz vor und hinter dem Ventilator sein muß.

2.2.2 Leckageortung

Die Blower Door wird so eingestellt, daß 50 Pa Unterdruck im Gebäudeinneren vorliegt. Das gesamte Gebäude wird bei dieser Druckdifferenz abgegangen und verdächtige Stellen werden mit der Hand nach eventuellen Leckagen abgefühlt. Steht ein empfindliches Hitzdrahtannemometer zur Verfügung (Ansprechgeschwindigkeit $< 0,1 \text{ m/s}$), kann im Zweifel mit diesem Meßgerät verifiziert werden.

Sind in dem Gebäude bereits Innentüren vorhanden, kann für jeden Raum als erste grobe Einschätzung die Türe bis auf einen Spalt von ca. 0,5 bis 1 cm geschlossen werden. Die Stärke der Strömung durch diesen Spalt zeigt sofort, ob in dem jeweiligen Raum größere Leckagen vorhanden sind oder nicht.

Gefundene Leckagen sind mit Beschreibung von Leckageort und ungefährer Ausdehnung sowie fotografischer Dokumentation zu protokollieren.

Gegebenenfalls sollen Details, die typischerweise Leckagen aufweisen, als 'dicht' protokolliert werden, wenn keine Leckage festgestellt werden kann. In diesem Fall soll eine Beschreibung der Konstruktion beigefügt werden.

Werden bei der Leckageortung Leckagen entdeckt, die gemäß Kapitel 2.1.2 temporär abzudichten wären, müssen diese Leckagen vor der Messung entsprechend abgedichtet werden

2.2.3 Messung der meteorologischen Randbedingungen

Es sind grundsätzlich die Bedienungsanleitungen der einzelnen Meßgeräte zu beachten. Geräteunabhängig sind die folgenden Punkte besonders wichtig.

Windgeschwindigkeit: In ca. 1,5 – 2 m Höhe über dem Boden. Ungefähr 10 – 20 m entfernt von allen umliegenden Gebäuden messen. Das verwendete Meßgerät sollte über min. 10 Sekunden mitteln, ca. 2 Minuten messen und Minimal- und Maximalgeschwindigkeit aufschreiben.

Bei Windgeschwindigkeiten über 5 m/s sollte **nicht** gemessen werden

Windrichtung: Möglichst an einer Stelle bestimmen, die frei liegt. Nicht direkt bei einem Gebäude, wegen eventueller Umlenkungseffekte kann dort keine korrekte Bestimmung erfolgen.

Lufttemperatur außen: Bei der Bestimmung der Lufttemperatur außen ist insbesondere darauf zu achten, daß **nicht** in der Sonne gemessen wird. Unbedingt auf der **Nordseite**, jedoch nicht zu dicht am Gebäude messen. Der Temperaturfühler darf keiner direkten Strahlung ausgesetzt sein.

Bei Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen größer 5 K bzw. bei Temperaturdifferenzen größer 5 K zu den Kalibrationsbedingungen des Volumenstrommeßgerätes **müssen** die gemessenen Volumenströme **temperaturkorrigiert** werden

2.2.4 Messung der Druckdifferenz am Gebäude

Der Referenz-Umgebungsdruck muß aus 4 Meßstellen gemittelt werden. Hierzu werden gemäß Bild 1 die Meßstellen aus 4 Schläuchen gleicher Länge um das Gebäude herum verteilt und bei der Blower Door zusammengefaßt. An jedem Schlauchende ist ein T-Stück anzubringen, damit keine Staudruckmessung erfolgt.

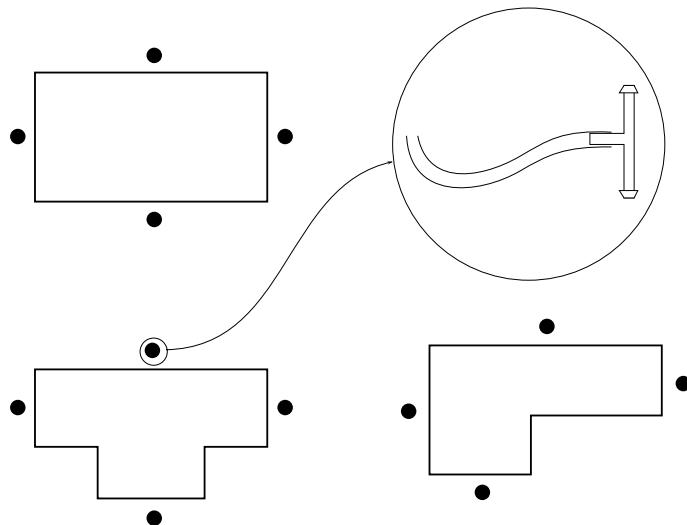


Bild 1: Verteilung der Druckentnahmestellen für den Umgebungsdruck; T-Stück jeweils an das Schlauchende jeder Druckentnahmestelle [CAN/CGSB-149.10-M86].

2.2.5 Messung der Gebäudedichtheit

Der Zustand des Gebäudes, vor allem der internen Türen, jeglicher Klappen an Öffnungen zur Umgebung sowie etwaige temporäre Abdichtungsmaßnahmen sind auf dem Erfassungsbogen der Meßdaten genau zu protokollieren.

Bei der Messung sind sowohl für die Unterdruckmessung als auch für die Überdruckmessung mindestens die Druckstufen 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55 und 60 Pa einzustellen und die korrespondierenden Volumenströme zu protokollieren.

Es ist sicherzustellen, daß vor dem Ablesen eines Meßwertes das entsprechende Meßgerät "eingeschwungen" ist.

2.2.6 Quantitative Beschreibung einzelner Leckagen

Die Quantifizierung einzelner Leckagen ist ohne zusätzliche Messungen nicht möglich. Die Strömungsgeschwindigkeit an einer Leckage läßt ohne exakte Kenntnis des Strömungsquerschnittes und der Geometrie der Leckage **keine** quantitative Aussage über den an dieser Stelle eintretenden Volumenstrom zu.

Die Strömungsgeschwindigkeit an einer Leckage gibt
keine quantitative Information
über den hier eintretenden Luftvolumenstrom

Quantitative Aussagen über die Leckage einzelner Außenbauteile sind ermittelbar, sofern die jeweiligen Undichtheiten mit einer temporären Abdichtung versehbar sind. Es muß jedoch gewährleistet werden können, daß keinerlei Querströmungen in der Bauteilebene möglich sind. Werden Messungen einzelner Außenbauteile durchgeführt, müssen dem Prüfbericht entsprechende Skizzen und Fotos beigelegt werden, die erkennen lassen, ob diese Bedingung erfüllt ist.

Beispiel: Türen in massiven Wänden (die Zarge muß meist ebenfalls abgedichtet werden)

2.3 Auswertung

Die Auswertung der Messung für den zu erstellenden Bericht kann gemäß der Berechnungsvorschrift in Kapitel 5 durchgeführt werden. Es wird jedoch empfohlen, die Auswertung mit dem Programm 'Blower Door-Assistent[©]' durchzuführen.

2.4 Bericht

Für den Bericht ist das im Anhang enthaltene Formblatt zu verwenden.

3. Meßtechnik für Reihen- und Mehrfamilienhäuser

Bei Reihen- und Mehrfamilienhäusern können Leckagen zwischen Nutzeinheiten nicht immer ausgeschlossen werden. Diese Leckagen und damit verbundenen Volumenströme verfälschen das Ergebnis einer Blower Door Messung. Es ist bei derartigen Objekten daher häufig notwendig, eine aufwendigere Meßtechnik einzusetzen. Im folgenden wird ein kurzer Überblick gegeben, in welchen Fällen derartige aufwendigere Messungen notwendig sind.

3.1 Grundlegendes

Um Reihen- und Mehrfamilienhäuser korrekt messen zu können, werden meist zusätzliche Geräte benötigt. Diese sind im besonderen

- mindestens ein Differenzdruckmeßgerät mit einem Meßbereich von ca. 0 - 60 Pa
- ein zweiter regelbarer Ventilator bzw. ein komplettes zweites Blower Door System.

Weiterhin werden zusätzliche Schläuche, Verlängerungskabel etc. benötigt.

3.1.1 Reihenhäuser

Zunächst muß bei Reihenhäusern überprüft werden, ob die Nutzeinheiten strömungstechnische Verbindungen aufweisen

Ergibt die Überprüfung, daß zwischen den Nutzeinheiten der aneinander gereihten Gebäude keinerlei Verbindungen bestehen (z. B. durch Pfetten, Kanäle, Installationen, etc.), können die Nutzeinheiten wie freistehende Häuser betrachtet und die Luftdichtheitsmessung gemäß Kapitel 2 durchgeführt werden. In Bild 2 ist skizziert, wo beispielsweise beim Dach Verbindungen bestehen können.

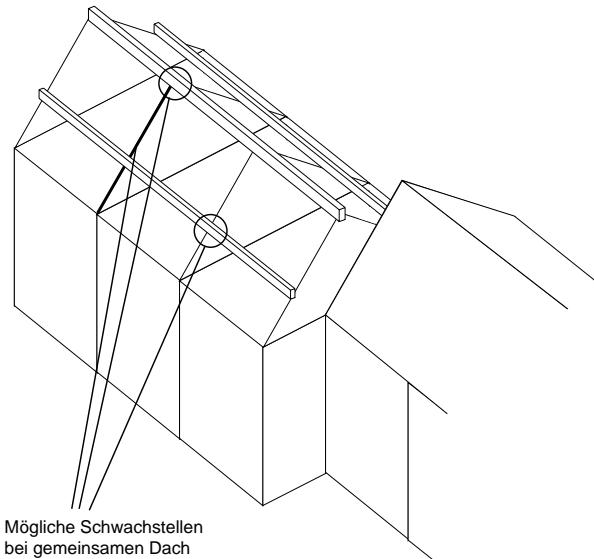


Bild 2: Mögliche Verbindungen zwischen den Einzelhäusern eines Reihenhauses. Derartige Verbindungen müssen ausgeschlossen werden können, wenn Reihenhäuser wie freistehende Häuser gemessen werden sollen.

Durch folgende Schritte kann anhand zusätzlicher Differenzdruckmessungen vorab sichergestellt werden, daß derartige Verbindungen nicht bestehen.

Die zu untersuchende Nutzeinheit wird hierfür auf 50 Pa Unterdruck gebracht. Die Druckdifferenz(en) zwischen der untersuchten und der (den) angrenzenden Nutzeinheit(en) wird gemessen. Hierbei sind in den angrenzenden Nutzeinheiten ebenfalls alle Fenster und Türen geschlossen.

Liegt diese Druckdifferenz bei 50 Pa und nimmt die aufgebrachte Druckdifferenz von 50 Pa in der untersuchten Nutzeinheit durch das Öffnen von Fenstern und Türen in der (den) angrenzenden Nutzeinheit(en) im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht ab bzw. nimmt der zu fördernde Volumenstrom im Rahmen der Meßgenauigkeit nicht zu, können die Nutzeinheiten als voneinander getrennt betrachtet werden. Andernfalls müssen zusätzliche Messungen ('Opening A Door' oder Schutzzonen Methode) durchgeführt werden.

Liegt die Druckdifferenz zwischen der untersuchten Nutzeinheit und der (den) angrenzenden Nutzeinheit(en) zwischen 10 und 45 Pa und nimmt der zu fördernde Volumenstrom durch das Öffnen von Fenstern und Türen in einer angrenzenden Nutzeinheit um mindestens 150 m³/h zu, kann eine 'Opening A Door' Messung durchgeführt werden. Andernfalls muß nach der Schutzzonen Methode gemessen werden.

3.1.2 Mehrfamilienhäuser

Bei der Messung von Mehrfamilienhäusern (MFH) und anderen Gebäuden mit mehr als 2 Etagen muß die Temperaturdifferenz zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung gering sein.

Ist das Produkt aus Gebäudehöhe in m und Temperaturdifferenz größer als 150, ist von einer Messung abzusehen.

Auf diese Weise kann sichergestellt werden, daß die Druckdifferenz zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung aufgrund von Temperaturunterschieden hinreichend gering ist.

Messungen an MFH und anderen Gebäuden mit mehr als 2 Etagen sollen nicht bei Windgeschwindigkeiten über 3 m/s durchgeführt werden.

Es wird zunächst das gesamte Gebäude gemessen, nicht die einzelnen Wohneinheiten. Bei der Leckageortung ist insbesondere zu untersuchen, ob die einzelnen Wohneinheiten stark unterschiedliche Leckagen aufweisen.

Prinzipielle Vorgehensweise: den Ventilator so einstellen, daß 50 Pa Unterdruck im Gebäudeinneren bestehen. Die Verbindungstüren zu den Wohneinheiten müssen bereits eingebaut sein oder es muß eine temporäre Abdichtung möglich sein. Die Türe jeder Wohneinheit bis auf einen Spalt von ca. 0,5 cm zuziehen und anhand dieser Methode eine erste grobe Einschätzung der einzelnen Wohneinheiten vornehmen.

Wird für eine oder mehrere Wohneinheiten eine überdurchschnittliche Leckage festgestellt, müssen zusätzliche Messungen durchgeführt werden.

Zunächst werden in diesen Wohneinheiten die einzelnen Leckagen gesucht und ggf. größere Leckagen temporär abgedichtet.

Die Wohnungseingangstüre zu dieser Wohnung schließen, die Druckdifferenz zwischen der Wohnung und dem restlichen Gebäude bestimmen (vgl. Prinzipskizze 'Opening A Door'). Hierbei soll das restliche Gebäude gegenüber der Umgebung einen Unterdruck von 50 Pa haben.

Liegt die so bestimmte Druckdifferenz zwischen 10 und 45 Pa und reduziert sich der zu fördernde Volumenstrom um mindestens 150 m³/h, so kann die Wohneinheit anhand der Meßmethode 'Opening A Door' gemessen werden. Andernfalls muß eine Schutzzonen Messung vorgenommen werden.

3.2 Opening A Door Methode (OAD)

Die Meßmethode 'Opening A Door' beruht auf den Druckverhältnissen entlang serieller Leckagen. Unter seriellen Leckagen sind derartige Leckagen zu verstehen, bei denen die Luft durch mindestens zwei voneinander unabhängige Schichten strömt.

Vorgehensweise:

1. Die Verbindung zu dem zu untersuchenden Gebäudebereich bzw. Fenster und Türen der (des) Nebengebäude(s) schließen.
2. Das Gebäude nacheinander auf 30, 40, 45, 50, 55 und 60 Pa Unterdruck bringen.
3. Zu jeder Druckdifferenz über die Gebäudehülle die sich einstellende Druckdifferenz zwischen dem Gebäude und dem betrachteten Gebäudebereich bzw. dem Nebengebäude messen ($\Delta p_{HZ,i}$). Die Volumenströme festhalten ($\dot{V}_{1,i}$).
4. Die Türe zu dem Gebäudebereich bzw. Fenster und Türen der (des) Nebengebäude(s) öffnen und erneut die Volumenströme bei 30, 40, 45, 50, 55 und 60 Pa Unterdruck festhalten ($\dot{V}_{2,i}$).
5. Die Volumenstromdaten aus Schritt 3 und 4 gemäß Berechnungsvorschrift auswerten.
6. Die Druckdifferenzwerte $\Delta p_{HZ,i}$ und $\Delta p_{HU,i}$ aus Schritt 3 sind anhand einer Ausgleichsgeraden entsprechend auszuwerten.
7. Die Volumenstromdifferenz $\Delta \dot{V} = (\dot{V}_2 - \dot{V}_1)$ für 50 Pa Unterdruck berechnen.
8. Die Druckdifferenz Δp_{HZ} für $\Delta p_{HU} = 50$ Pa mit der Auswertung gemäß Schritt 6 berechnen.
9. Aus dem Diagramm in Bild 5 oder Bild 6 für Reihenhäuser bzw. Bild 7 oder Bild 8 für Mehrfamilienhäuser anhand der Druckdifferenz bei geschlossener Verbindung (Schritt 8) den Umrechnungsfaktor bestimmen und die Volumenstromdifferenz aus Schritt 7 mit diesem Faktor multiplizieren.

Zur Verdeutlichung der Bezeichnungen können die Skizzen in Bild 3 für Reihenhäuser und Bild 4 für Mehrfamiliengebäude herangezogen werden.

Für **Reihenhäuser** entspricht der so ermittelte Volumenstrom der über Verbindungen zwischen der untersuchten Nutzeinheit und der angrenzenden Nutzeinheit. Dieser Volumenstrom muß zur Bildung des n_{50} -Wertes der untersuchten Nutzeinheit von dem Volumenstrom bei 50 Pa Druckdifferenz aus Schritt 3 abgezogen werden.

Für **Mehrfamiliengebäude** ist der auf diese Weise ermittelte Volumenstrom die über die Außenwand des untersuchten Gebäudebereiches strömende Luftmenge bei 50 Pa Unterdruck. Dieser Wert wird bei Mehrfamiliengebäuden für die Bestimmung des n_{50} -Wertes des untersuchten Bereiches angesetzt.

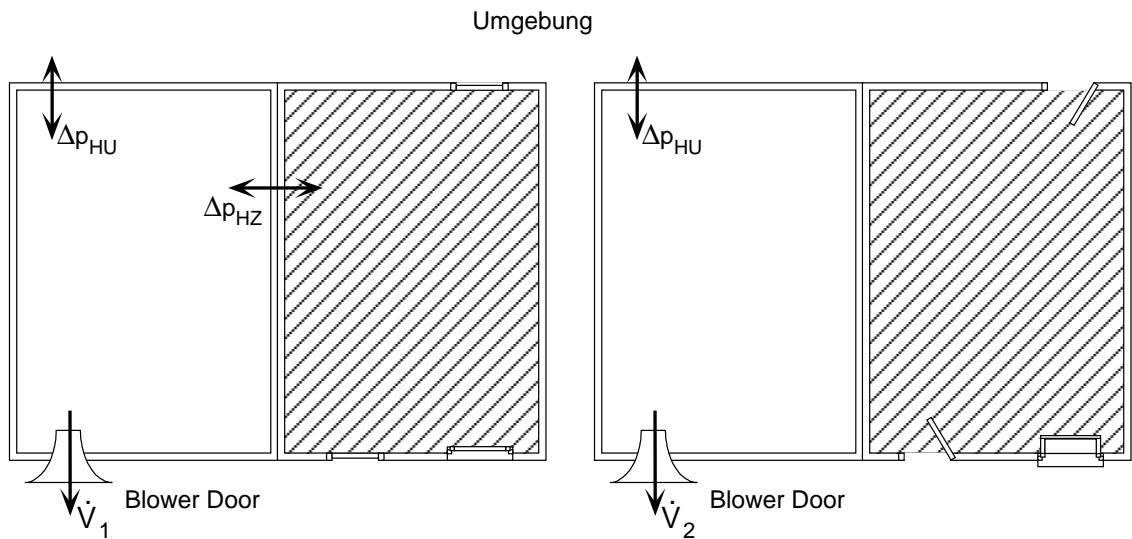


Bild 3: 'Opening A Door', Skizze zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei Reihenhäusern.

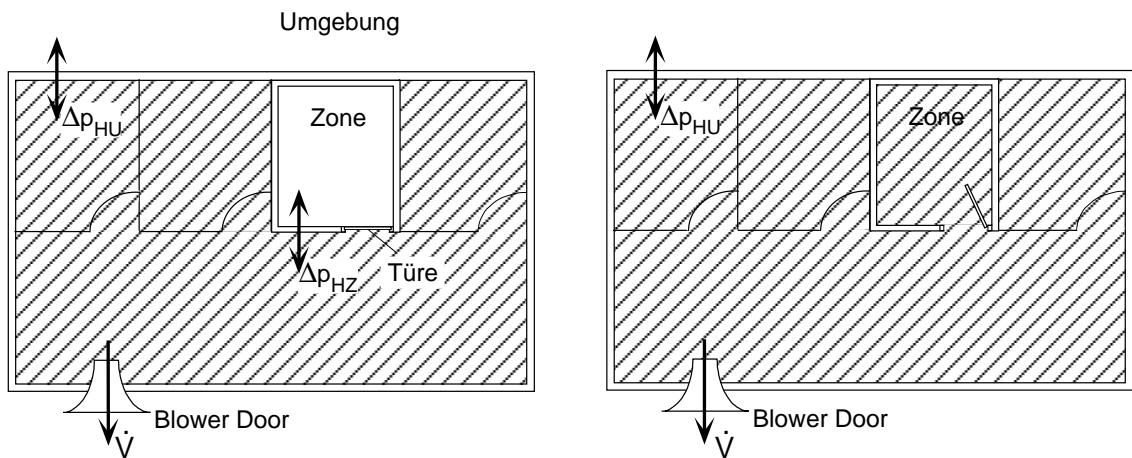


Bild 4: 'Opening A Door', Skizze zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei Mehrfamilienhäusern.

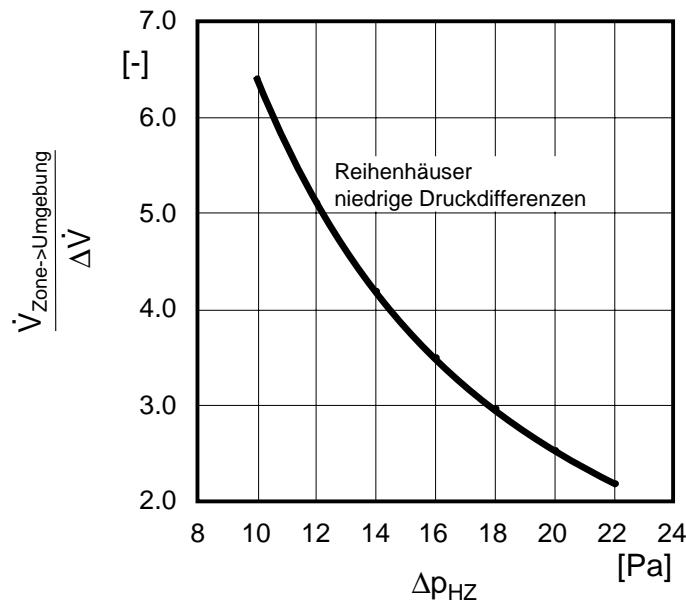


Bild 5: Diagramm zur Bestimmung der Faktoren für die Meßmethode 'Opening A Door' bei **Reihenhäusern**; Bereich **niedriger** Druckdifferenzen [1].

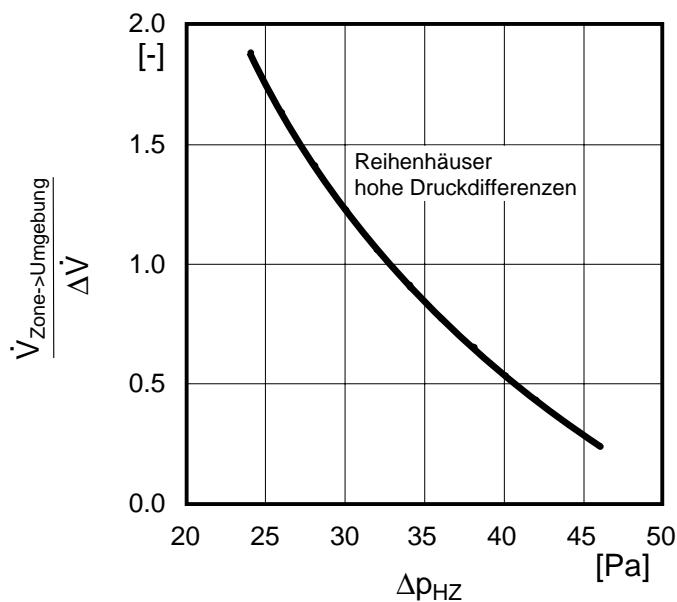


Bild 6: Diagramm zur Bestimmung der Faktoren für die Meßmethode 'Opening A Door' bei **Reihenhäusern**; Bereich **hoher** Druckdifferenzen [1].

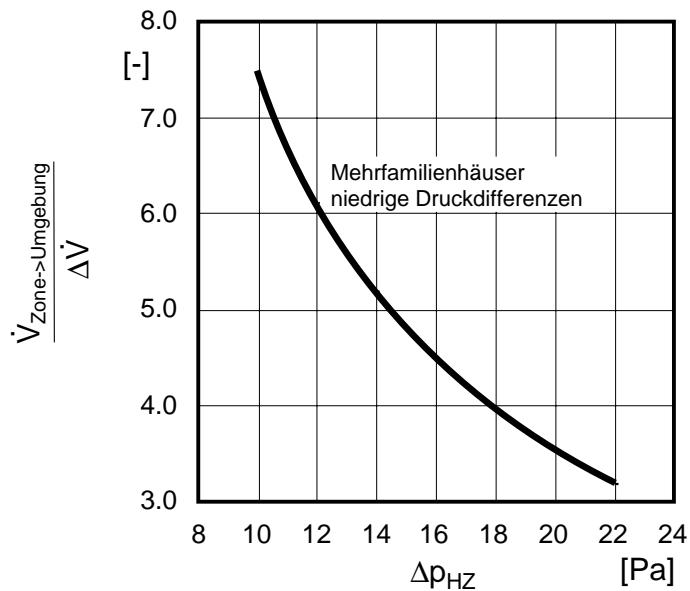


Bild 7: Diagramm zur Bestimmung der Faktoren für die Meßmethode 'Opening A Door' bei **Mehrfamilienhäusern**; Bereich **niedriger** Druckdifferenzen [1].

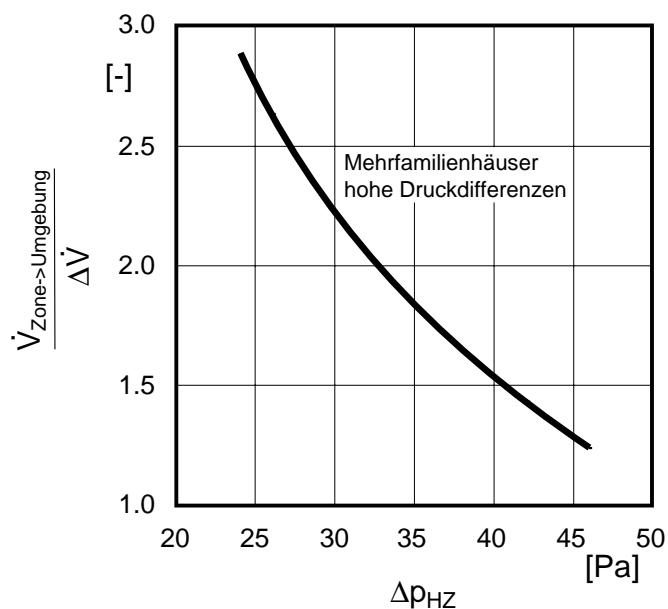


Bild 8: Diagramm zur Bestimmung der Faktoren für die Meßmethode 'Opening A Door' bei **Mehrfamilienhäusern**; Bereich **hoher** Druckdifferenzen [1].

3.3 Schutzzonen Methode (Guard Zone Technique, GZ)

Die Schutzzonen Methode eignet sich insbesondere dafür, einzelne Räume oder Bereiche eines Gebäudes oder auch Außenwände auf ihre Luftdichtheit hin zu untersuchen. Bei dieser Methode benötigt man mindestens zwei Ventilatoren, die so eingeregelt werden, daß über Gebäudeteile, die nicht untersucht werden sollen, keine Druckdifferenz besteht. Alle für diese Meßmethode eingesetzten Ventilatoren müssen daher stufenlos einstellbar sein. Weiterhin wird für die Messung der Druckdifferenz zwischen der Schutzone und dem untersuchten Gebäudeteil jeweils ein zusätzliches Differenzdruckmeßgerät benötigt.

In Bild 9 ist die Anordnung der Ventilatoren für Schutzzonenmessungen von Reihenhäusern skizziert. Die Ventilatoren werden so eingestellt, daß die Druckdifferenz zwischen den Nutzeinheiten null wird. Der Volumenstrom \dot{V}_2 ist dann ebenfalls gleich null.

Immer mit **zusätzlichem** Differenzdruckmessgerät die Druckdifferenz zwischen den Bereichen/Gebäuden bestimmen!
Nicht die Bereiche/Gebäude anhand der Blower Door Manometer auf gleiche Druckdifferenz einregeln!

Soll ein Reihenmittelhaus mit dieser Methode gemessen werden, müssen ggf. drei stufenlos einstellbare Ventilatoren zur Verfügung stehen bzw. nacheinander die Anbindung zu den Nebengebäuden quantifiziert werden.

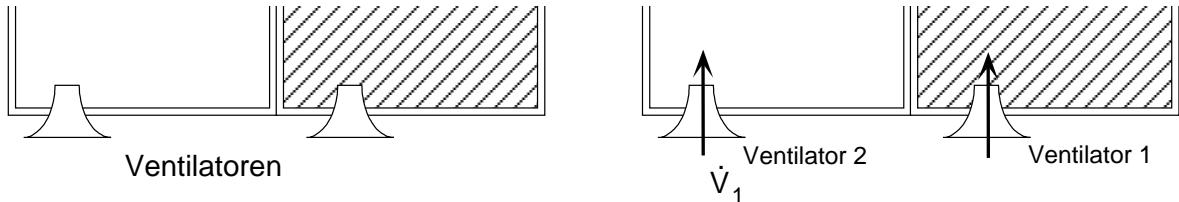


Bild 9: Schematische Darstellung des Meßprinzips 'Schutzzonen Methode' für Reihenhäuser.

In Bild 10 ist als Beispiel aufgezeigt, wie die Anordnung der Ventilatoren für Mehrfamilienhäuser gewählt wird, um die Luftdurchlässigkeit der Außenwand der untersuchten Nutzeinheit zu ermitteln. Die Druckdifferenz zwischen der in Bild 10 links schraffiert dargestellten Schutzone und der untersuchten Nutzeinheit wird durch eine entsprechende Einstellung der Ventilatoren auf null gehalten. Somit muß "Ventilator 2" in Bild 10 nur

diejenige Luftmenge fördern, die durch Wände und Decken der untersuchten Nutzeinheit entweicht welche nicht an die Schutzzone grenzen (in Bild 10 mit \dot{V}_a ausgewiesen) [2].

Die Volumenströme \dot{V}_2 , \dot{V}_3 und \dot{V}_4 sind unter diesen Bedingungen gleich null.

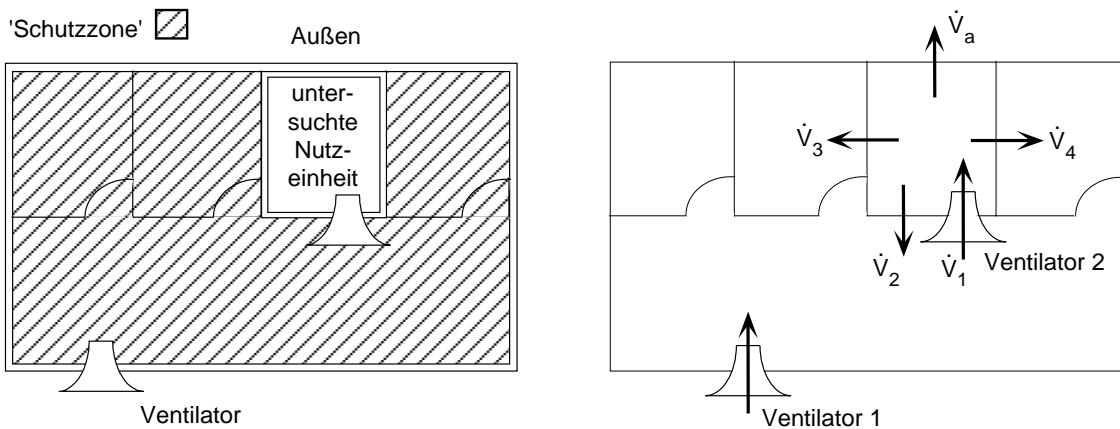


Bild 10: Schematische Darstellung des Meßprinzips 'Schutzzonen Methode' für Mehrfamilienhäuser [2].

Die Ventilatoren 1 und 2 müssen so eingestellt werden, daß die Druckdifferenz zwischen der Schutzzone und dem gemessenen Bereich null wird. In der Praxis läßt sich diese Druckdifferenz auf ungefähr ± 1 Pa genau regeln. Es sollten aus diesem Grund keine Einzelpunktmessungen durchgeführt, sondern grundsätzlich eine Kennlinie mit möglichst vielen Punkten ermittelt werden.

Der durch den Ventilator 2 geförderte Volumenstrom entspricht in beiden Fällen, also sowohl bei Reihen- als auch bei Mehrfamilienhäusern, dem gesuchten Volumenstrom.

Literaturhinweise

- [1] Michael Blasnik and Jim Fitzgerald, *In Search of the Missing Leak*, Home Energy, 6, November/December (1992)
- [2] C.A. Roulet, L. Vandaele. *Air flow patterns within buildings measurement techniques*. Technical Report 34, AIVC, Dec. 1991.

4. Berechnungsvorschrift für Meßdatenanpassung und Fehlerrechnung

Die Auswertung der Meßwerte und die durchzuführenden Fehlerabschätzungen können alternativ zu der folgend gegebenen Berechnungsvorschrift mit dem PC-Programm 'Blower Door-Assistent[®]' durchgeführt werden.

Aus den Meßwertepaaren Druckdifferenz über die Gebäudehülle $\Delta p_{Gebäude}$ und dem Volumenstrom \dot{V} müssen für die Gleichung

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p_{Gebäude}^n \quad (1)$$

die Koeffizienten C und n bestimmt werden.

Nachfolgend ist eine geeignete Möglichkeit, diese Koeffizienten aus den gemessenen Werten zu bestimmen, aufgeführt. Die Auswertung entspricht ISO-DIS 9972, Annex C.

1. Zunächst werden die natürlichen Logarithmen der Meßwerte gebildet:

$$\begin{aligned} x_i &= \ln(\Delta p_{Gebäude,i}) \\ y_i &= \ln(\dot{V}_i) \quad \text{für } i = 1 \dots N \end{aligned} \quad (2)$$

Gleichung 1 wird damit zu

$$y = \ln(C) + n \cdot x \quad (1a)$$

2. Anschließend werden die folgenden Größen berechnet:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \\ \bar{y} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \\ S_x^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \\ S_y^2 &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \\ S_{xy} &= \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \end{aligned} \quad (3)$$

3. Die besten Schätzungen für n und ln(C) ergeben sich damit zu

$$n = \frac{S_{xy}}{S_x^2} \quad (4)$$

$$\ln(C) = \bar{y} - n \cdot \bar{x}$$

und C berechnet sich schließlich zu

$$C = e^{(\bar{y} - n \cdot \bar{x})} \quad (5)$$

4. Die Varianzen (σ) von n und $\ln(C)$ ergeben sich aus

$$S_n = \frac{1}{S_x} \left(\frac{S_y^2 - n \cdot S_{xy}}{N - 2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$S_{\ln(C)} = S_n \left(\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}$$

5. Das Konfidenzintervall (für eine Studentsche t -Verteilung) ergibt sich aus der Varianz um die Regressionsgerade (Gleichung 1a)

$$S_y(x) = S_n \left\{ \frac{N-1}{N} S_x^2 + (x - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

zu

$$I_y(x) = S_y(x) T(p, N-2) \quad (8)$$

Damit liegt der mit Gleichung 1 berechnete Volumenstrom für jede Druckdifferenz mit der Wahrscheinlichkeit p im Intervall

$$(\dot{V} \cdot e^{-I_y(\ln(\Delta p))}, \dot{V} \cdot e^{I_y(\ln(\Delta p))}) \quad (9)$$

6. Der Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz (n_{50} -Wert) berechnet sich schließlich zu

$$n_{50} = \frac{C_{\text{Unterdruck}} \cdot \Delta p^{n_{\text{Unterdruck}}} + C_{\text{Überdruck}} \cdot \Delta p^{n_{\text{Überdruck}}}}{2 \cdot \text{Nettogegebäudevolumen}} \quad (10)$$

Damit können die Fehlerschranken (oberer und unterer Grenzwert) bestimmt werden. $I_y(\ln(\Delta p))$ wird für die Wahrscheinlichkeit p = 95% gebildet.

$$n_{50,\text{min}} = \frac{n_{50,\text{Unterdruck}} \cdot e^{-I_{y,\text{Unterdruck}}(\ln(\Delta p))} + n_{50,\text{Überdruck}} \cdot e^{-I_{y,\text{Überdruck}}(\ln(\Delta p))}}{2} \quad (11)$$

$$n_{50,\text{max}} = \frac{n_{50,\text{Unterdruck}} \cdot e^{I_{y,\text{Unterdruck}}(\ln(\Delta p))} + n_{50,\text{Überdruck}} \cdot e^{I_{y,\text{Überdruck}}(\ln(\Delta p))}}{2}$$

Tabelle 1: Zweiseitige Konfidenzintervalle $T(p, N)$ für die Studentsche t -Verteilung

N	p					
	0,8	0,9	0,95	0,99	0,995	0,999
1	3,0780	6,3138	12,7060	63,6570	127,3200	636,6190
2	1,8860	2,9200	4,3027	9,9248	14,0890	31,5980
3	1,6380	2,3534	3,1825	5,8409	7,4533	12,9240
4	1,5330	2,1318	2,7764	4,6041	5,5976	8,6100
5	1,4760	2,0150	2,5706	4,0321	4,7733	6,8690
6	1,4400	1,9430	2,4470	3,7070	4,3170	5,9590
7	1,4150	1,8946	2,3646	3,4995	4,0293	5,4080
8	1,3970	1,8595	2,3060	3,3550	3,8330	5,0410
9	1,3830	1,8331	2,2622	3,2498	3,6897	4,7810
10	1,3720	1,8125	2,2281	3,1693	3,5814	4,5870
∞	—	1,6450	1,9600	2,5760	2,8070	3,2910

Bronstein/Semendjajev, S. 74

5. Berechnung des Nettogebäudevolumens

Das zur Bildung der Kennzahl n_{50} , dem Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz notwendige Nettogebäudevolumen wird wie folgt festgelegt:

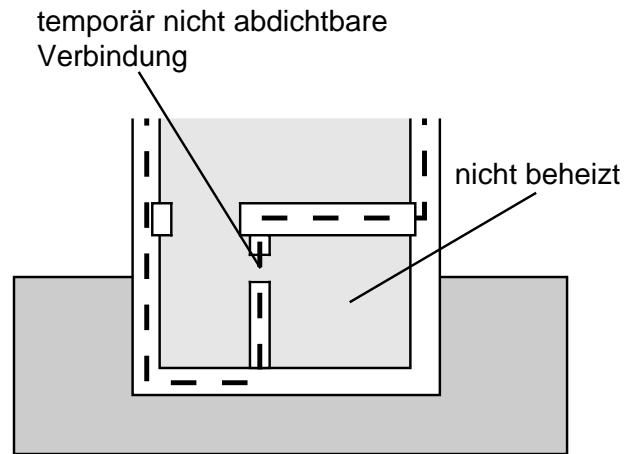
- Das gemessene Volumen, im Idealfall entspricht dies dem beheizten Nettovolumen, ist anhand der lichten Innenmaße zu bestimmen. Volumen von Verkehrs- und Funktionsflächen und Volumen von Räumen mit Dachschrägen gehören zu 100 % zu dem Nettovolumen, sofern diese im gemessenen Bereich des Gebäudes liegen.
- Möbel, Einbauten etc. werden nicht abgezogen.

das Nettovolumen ist **nicht** das beheizte Bauwerksvolumen nach WSchVO

- Das Volumen muß detailliert aus den lichten Innenmaßen bestimmt werden.

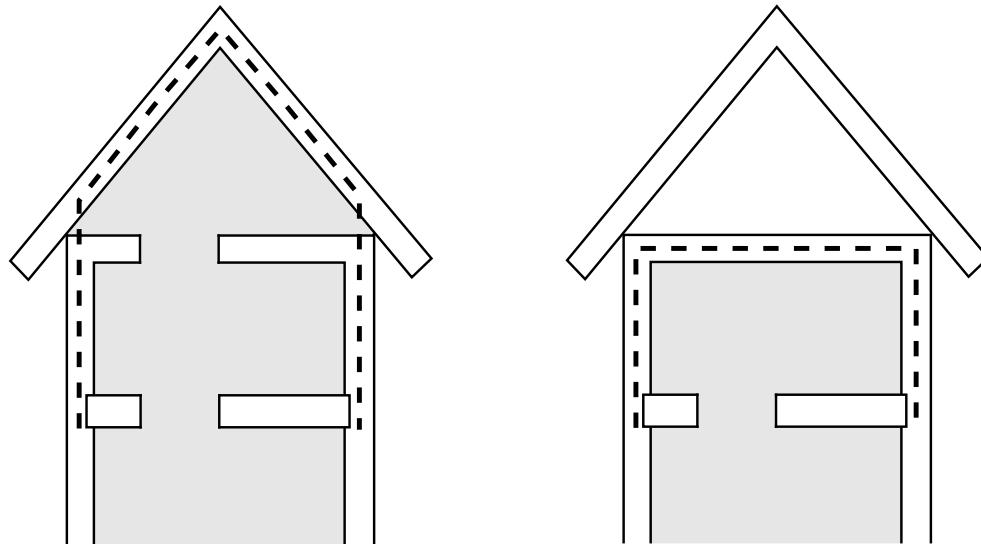
Wenn ein nicht beheizter Teil des Gebäudes nicht von der Messung ausgeschlossen werden kann, **muß** er mit in das Volumen aufgenommen werden.

Beispiel: Der Keller eines Gebäudes wird im fertiggestellten Zustand nicht beheizt. Zum Zeitpunkt der Messung sind zwar Türen zu den Kellerräumen vorhanden, jedoch sind noch größere, aufgrund durchgelegter Leitungen und fehlender glatter, staubfreier Umrandung nicht temporärabdichtbare Öffnungen zum beheizten Teil des Gebäudes vorhanden (vgl. Skizze).



==> **In diesem Beispiel muß der gesamte Keller, auch der nicht beheizte Teil, bei der Volumenberechnung berücksichtigt werden.**

Wenn die Luftdichtheitsebene im Dach verläuft, nicht in der Kehlbalkenlage bzw. obersten Geschoßdecke, muß die Verbindung zum Dachraum/Spitzboden geöffnet werden und das Volumen entsprechend berechnet werden. Siehe Skizze, linkes Bild.



6. Ausrüstung

Die folgend genannten Ausrüstungsgegenstände müssen zur Verfügung stehen. Im Laufe der Messung und nach der Messung beim Verpacken der Ausrüstung sollten gewohnheitsmäßig alle Ausrüstungsteile durchgecheckt und ggf. Notizen zu nötigen Reparaturen/Ersatzbeschaffungen gemacht werden.

6.1 Blower Door

Die eingesetzte Blower Door muß in der Lage sein, 60 Pa Druckdifferenz zwischen dem Gebäudeinneren und der Umgebung aufzubauen. Der hierzu notwendige Volumenstrom muß bestimmbar sein. Druckdifferenz und Volumenstrom müssen mit einer Genauigkeit von insgesamt $\pm 5\%$ des Meßbereiches bestimmbar sein.

6.2 Klimameßgeräte

Windgeschwindigkeit, Lufttemperaturen außen sowie innen und der Luftdruck müssen bestimmt werden können. Wird die Windgeschwindigkeit mit einem Hitzdrahtanemometer gemessen, kann dieses auch zur Leckageortung bzw. Verifizierung von Leckagen eingesetzt werden. Die quantitative Beschreibung von Leckagen ist damit jedoch **nicht** möglich (siehe auch 'Quantitative Beschreibung von Leckagen', 2.3.6). Die Lufttemperatur muß auf $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen werden können.

6.3 Sonstiges

- Schere, Folie für Abklebungen, diverse Klebebandsorten (grobes und feines Kreppband, PVC–Klebeband).
- Kabeltrommel 50 m, 10 m sowie 2 m Kabel mit Mehrfachsteckdose.
- Dichtschnur aus geschlossenzelligem Schaumstoff für temporäre Abdichtungsmaßnahmen und Abdichtung des Blower Door-Einbaus.
- einfaches Werkzeug; Schlitz- und Kreuzschlitzschraubenzieher, Zange, Zollstock, 10 m Maßband, Taschenlampe, ...
- Fotoapparat mit Zoom-Objektiv und Blitz
- mindestens 100 Meter Schlauch mit 4 mm Innendurchmesser, in unterschiedlich (5 – 25 m) langen Stücken.
- Kompaß, um die Windrichtung sowie ggf. die Gebäudeausrichtung bestimmen zu können.
- großer Meterstab oder entsprechendes für die Foto-Dokumentation; als Orientierungshilfe und Maßstab in den Bildern.
- ein Vordruck 'Vor-Ort-Protokoll' mit einer ausreichenden Anzahl an Leckageprotokoll-Seiten (F3).
- Kurzbeschreibungen

Anhang

- I Vor-Ort-Protokoll für die Messung**
- II Formular Berichtsbogen**
- III Kurzbeschreibungen**
 - 1) Ausrüstung
 - 2) Gebäudezustand
 - 3) Messung
 - 4) Blower Door Minneapolis Model 3
- IV Flußdiagramm Luftdichtheitsmessung**
- V Kurzübersicht Anforderungen**

Literaturhinweise

- | | |
|-----------------------|---|
| /Energy Conservatory/ | Handbuch zur Blower Door 'Minneapolis Model 3' |
| /ISO 9972/ | Thermal Insulation – Determination of building airtightness –
Fan pressurization method, Entwurfsfassungen 1989/95 |
| /CAN/CGSB-149.10-M86/ | Determination of the Airtightness of Building Envelopes by
the Fan Depressurization Method |

A Allgemeine Daten**1. Auftraggeber:****2. Auftragsausführender:****3. Datum der Messung:****B** Beschreibung des Meßobjektes**Gebäude****1. Projektbezeichnung:****2. Standort (Anschrift):****3. Baujahr:****4. Typ (Massiv EFH, Holzrahmen MFH, ...):****5. Nettogebäudevolumen:****6. Öffnungen in der Gebäudehülle:**
(nur Öffnungen angeben, die nicht im endgültigen Zustand sind)**Lüftungsanlage****7. Ventilatorleistung:****8. Anordnung der Luftschächte und Rohre:**
ja nein
Pläne liegen bei

Untersuchte Bauteile¹⁾**9. Beschreibung des Bauteils:****10. Lage des Bauteiles im Gebäude:****11. Einbausituation des Bauteils:****12. Sonstige relevante Informationen:**

ja nein
 einzelne Bauteile wurden untersucht
 → Pläne/Beschreibung liegen bei

1) Die Punkte 9 - 12 sind ggf. auf einem gesonderten Blatt beizufügen

C Meßgeräte**1. Eingesetzte Meßgeräte:**

Meßgröße	Hersteller	Bezeichnung	Kalibration am	angeg. Genauigkeit
ϑ [°C]				
u [m/s]				
Δp [Pa]				
\dot{V} [m ³ /h]				

2. Angewandte Meßprinzipien (kurze Beschreibung):**D Meßwerte + Kennzahlen**

Wird das PC-Programm 'Blower-Door-Assistent' für die Auswertung eingesetzt, kann für Punkt 'D' der Ergebnisausdruck beigelegt werden

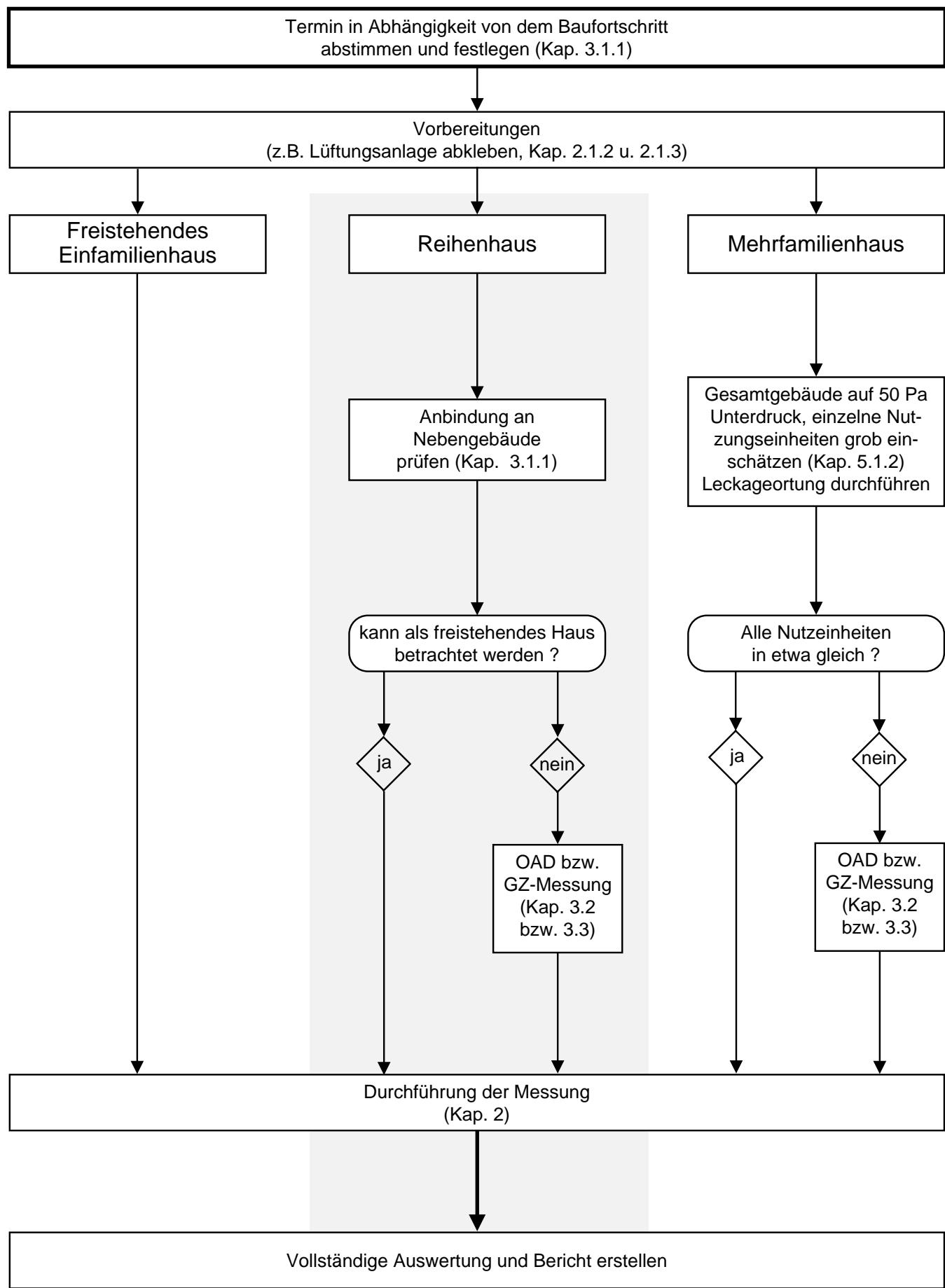
- Auswertung durch das Programm 'Blower-Door-Assistent'
 Auswertung auf Formblatt 'Meßwerte und Kennzahlen'

E Leckagen

Die Bearbeitung folgender Punkte sind auf gesonderten Blättern beizulegen

1. Auflistung aller gefundenen Leckagen, Fotodokumentation
2. Verbesserungsvorschläge zu den wesentlichen Leckagen
3. ggf. allgemeine Verbesserungsvorschläge zu dem gewählten Luftdichtheitskonzept.

Flußdiagramm Luftdichtheitsmessung



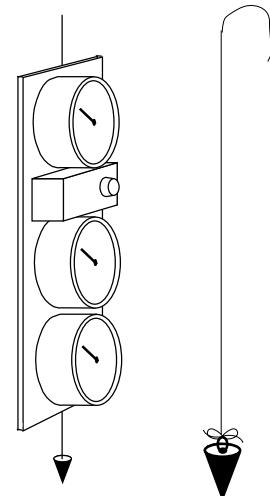
Kurzbeschreibung

Minneapolis Blower Door Model 3

1. Einbau

- Eine Außentüre oder ein Fenster mit umlaufender, ebener Kante von mindestens 2 cm Breite muß vorhanden sein.
- Die Manometer müssen **lotrecht** montiert und nach Möglichkeit fixiert werden. Die Manometer sind nur für diese Lage kalibriert (siehe untenstehende Skizze).
- Die Manometer müssen in Augenhöhe montiert werden, um beim Ablesen Parallaxefehler zu vermeiden.
- Es muß möglich sein, die Manometer abzulesen ohne in dem direkten Luftstrom des Ventilators stehen zu müssen.
- Der Ventilator muß frei ansaugen und ausblasen können. Das heißt, vor und hinter dem Ventilator müssen mindestens 1,5 m Platz sein.

Beachten: Die Manometer der 'Minneapolis Blower Door Model 3' müssen **lotrecht** montiert und nach Möglichkeit fixiert werden (mit Klebeband am Blower Door Rahmen).



2. Messen

- Die mit diesem Blower Door-Modell gelieferten Manometer sind stark gedämpft. Hierdurch können Ableseungenauigkeiten entstehen. Es empfiehlt sich, vor jedem Ablesen **leicht** auf die Manometer zu **klopfen** um sicherzustellen, daß diese sich eingeregelt haben.
- Die am **Ventilator** gemessenen Druckdifferenzen müssen **über 25 Pa** liegen.
- Ein Wechsel des eingesetzten Ringes während einer Messung ist zu vermeiden. Ist ein Wechsel unumgänglich, muß bei der Druckdifferenz bei der dieser Wechsel stattfindet der Volumenstrom anhand **beider** eingesetzter Ringe bestimmt und protokolliert werden.
- Die Volumenströme auf den Ventilatordruck-Manometern sind **nicht** in m^3/h angegeben. Generell müssen die Druckdifferenzen protokolliert werden.

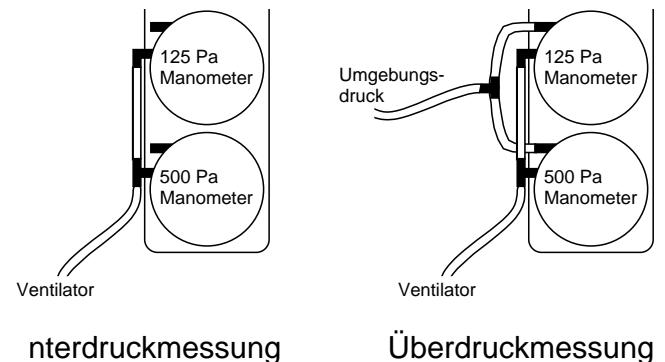
Die Multiplikationsfaktoren der Ring-Kalibriergleichungen müssen jeweils mit **1,7 Multipliziert** werden, um den Volumenstrom in m^3/h zu erhalten.

Die korrekten Faktoren lauten:

Ring	a	n
keiner	818,14	0,4945
A	301,59	0,4948
B	95,47	0,5065
C	34,55	0,5275
D	11,58	0,5074
E	4,83	0,4972

- Der Ventilatordruck muß immer gegen die **Saugseite** des Ventilators gemessen werden (siehe Anschlußskizze).

Beachten: Der Ventilatordruck muß immer gegen die **Saugseite** gemessen werden. Die auf den Manometern angegebenen Volumenströme sind **nicht** in m^3/h .



- Vor jeder Meßreihe, d.h. vor jeder stufenweisen Erhöhung der Druckdifferenz, muß mit **geschlossenem** Ventilator die Nullstellung der Manometer überprüft und ggf. mit einem kleinen Schraubenzieher an der entsprechenden Schraube eingestellt werden.

