

# Genauigkeit von Luftdichtheitsmessungen\*

Achim Geißler, Kassel

Dr.-Ing. Achim Geißler ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel

## Zusammenfassung

Anhand von Fehlerbetrachtungen einzelner Randbedingungen bzw. Parameter bei Luftdichtheitsmessungen mit statischen Differenzdruckverfahren werden Aussagen getroffen, welche Meßgenauigkeit üblicherweise zu erreichen ist. Ein Beispiel zeigt, daß die langfristige Reproduzierbarkeit derartiger Messungen typisch bei ca. 10 bis 50 % liegt. Hierbei sind der Wind und eventuelle tatsächliche Veränderungen der Gebäudedichtheit wesentliche Einflußgrößen.

\* Die diesem Artikel zugrunde liegenden Untersuchungen wurden teilweise im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft geförderten, über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e. V. abgewickelten AIF Forschungsprojektes Nr. 10650 [1] durchgeführt.

## 1 Einführung

Die Luftdichtheit der Gebäudehülle gewinnt mit zunehmendem Dämmniveau an Bedeutung. In einzelnen Bundesländern wird bereits seit einigen Jahren bei Förderprogrammen ein Grenzwert für die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle vorgegeben. Seit Juli 1998 ist über den Bundesanzeiger [2] die Wärmeschutzverordnung [3] mit den in DIN V-4108-7 [4] gegebenen Grenzwerten verbunden; in absehbarer Zeit werden durch die Energieeinsparverordnung (EnEV) endgültig bundesweit Grenzwerte für die Luftdichtheit der Gebäudehülle vorgegeben sein. Dies wird voraussichtlich dazu führen, daß die Anzahl durchgeföhrter Messungen steigt. Die Bedeutung, die den Meßergebnissen zugewiesen wird, kann ebenfalls zunehmen. Nicht nur aus diesem Grund gehört zu jeder Messung eine fundierte Fehlerabschätzung. Ohne Angabe eines Vertrauensintervall hat ein Meßergebnis keinerlei Aussagekraft. Gerade bei Abnahmemessungen oder bei Messungen im Rahmen von Streitfällen ist dies besonders wichtig. Derzeit wird in der Regel den Ergebnissen von Luftdichtheitsmessungen aus verschiedenen Gründen eine zu geringe Unsicherheit zugeordnet.

In vorliegendem Beitrag wird die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit von Luftdichtheitsmessungen mit der Meßmethode 'Blower Door' betrachtet. Hierbei wird anhand der Berechnung der Fehlerfortpflanzung die erreichbare Meßgenauigkeit erörtert. Damit werden notwendige Hintergrundinformationen zur Gewährleistung bzw. Verbesserung der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit gemessener Daten bereitgestellt.

Die Genauigkeit des quantitativen Ergebnisses von Luftdichtheitsmessungen mit Differenzdruck-Methoden hängt von vielen Größen ab. Eine Zusammenstellung dieser Größen kann in zwei Gruppen aufgeteilt werden: In solche, die bei der eigentlichen Messung eingehen, sowie in diejenigen, die bei der Auswertung vorkommen. Diese beiden Gruppen von Größen können wiederum in jene getrennt werden, auf die der Durchführende bzw. Auswertende einer Messung Einfluß hat und solche, auf die er keinen Einfluß nehmen kann.

Unter 'Messung' ist in diesem Zusammenhang die Bestimmung von Massen- bzw. Volumenstrom in Abhängigkeit von einer Druckdifferenz zu verstehen. Einige zu berücksichtigende Einflußgrößen sind

1. beeinflußbare Einflußgrößen:
  - (a) Anzahl und Ort der Umgebungs-Druckentnahmestellen bei Einfamilien-Häusern (EFH)
  - (b) häufig: Einbauort des Blower Door Systems (BD)
  - (c) Wahl der Meßgeräte (Differenzdrucksensoren, Volumenstrombestimmung)

- (d) Anzahl und Verteilung der Druckdifferenz-Meßpunkte (Hand-/Rechnermessung)
  - (e) in Grenzen: meteorologische Randbedingungen (durch Terminverschiebung)
2. nicht beeinflußbare Einflußgrößen:
- (a) Anzahl und Ort der Umgebungs-Druckentnahmestellen bei Mehrfamilien-Häusern (MFH) und Reihenhäusern (RH)
  - (b) meteorologische Randbedingungen bei der Messung
  - (c) Gebäudegeometrie
  - (d) Leckageverteilung
  - (e) Genauigkeit der Meßgeräte selbst (Differenzdrucksensoren, Volumenstrombestimmung)

Unter 'Auswertung' ist die Sichtung und Aufbereitung der gewonnenen Meßdaten sowie die Bestimmung benötigter Bezugsgrößen zu verstehen. Hier können zum Beispiel folgende (beeinflußbare) Einflußgrößen genannt werden:

- Wahl des Verfahrens und Durchführung einer Korrektur der Luftdichte.
- Wahl und Bestimmung einer Kenngröße bzw. notwendiger Bezugsgröße.

Wünschenswert hinsichtlich einer Ergebnisbewertung (Fehlerbetrachtung) und insbesondere der Fehlerminimierung wäre es, den Einfluß aller Einzelgrößen auf das Ergebnis einer Messung zu quantifizieren. Aus den Einzelleinflüssen kann so im Anschluß eine Gesamtbetrachtung abgeleitet werden. Eine derartige umfassende Fehlerbetrachtung erlaubt im Idealfall Aussagen hinsichtlich einer 'optimalen' Vorgehensweise bei der Durchführung von Luftdichtheitsmessungen.

## 2 Literatur zur Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit

In der Literatur findet man nur wenig zur Meßgenauigkeit von Differenzdruck-Methoden. In [5] wird die Genauigkeit von Messungen in Zusammenhang mit der Auswertung bei unterschiedlichen Referenz-Druckdifferenzen untersucht. Insbesondere wird erläutert, wie sich das Konfidenz-Intervall in Abhängigkeit von den gewählten Meßpunkten (Anzahl und Lage) sowie der Wahl der Referenz-Druckdifferenz verhält.

In [8] wird ein Ringversuch beschrieben, der das Ziel verfolgt, den System- und Anwendereinfluß auf die Meßgenauigkeit zu quantifizieren. Es werden vier Meßsysteme von drei Anwendern in vier Gebäuden eingesetzt. Die erlaubte Windgeschwindigkeit wird auf 2,2 m/s begrenzt und die Messungen werden innerhalb von 7 bis 9 Tagen durchgeführt. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, daß die Reproduzierbarkeit (Vertrauensbereich 95%) des Volumenstroms bei 50 Pa Druckdifferenz insgesamt (System + Anwender) bei  $\pm 7,5\%$  liegt, der Anwender dabei mit ca.  $\pm 2\%$  beteiligt ist.

Eine sehr interessante Gegenüberstellung einschlägiger Normen zur Durchführung von Luftdichtheitsmessungen ist in [9] gegeben. Grundlage der dargestellten Untersuchung sind Wiederholungsmessungen an einem Versuchsgebäude. Der Untersuchungszeitraum umfaßt Oktober bis April. Durch die unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Auswertung, welche von den verschiedenen Normen vorgegeben ist, werden mittlere Abweichungen über alle Messungen zwischen ca. 6 % und ca. 12 % erhalten.

Mehrere Beiträge in der Literatur behandeln die Änderung der Luftdichtheit in den ersten Jahren des Bestehens eines Gebäudes bzw. jahreszeitliche Schwankungen. Die gefundenen Änderungen in der Luftdichtheit werden i.a. Trocknungsvorgängen zugeschrieben. Es soll hier ein kurzer Überblick über die beiden Arbeiten gegeben werden, die sich auf Gebäude in Deutschland beziehen. In [16] wird eine Untersuchung der Luftdichtheit von 13 Objekten (freistehende Einfamilienhäuser und Reihenhäuser in Holzleichtbauweise) über Zeiträume von 5 bis 16 Monaten beschrieben. Hierbei ist bei vier Objekten eine deutliche 'Jahreskurve' zu erkennen. Bei einem dieser Objekte entspricht die Durchlässigkeit nach einem Jahr im Rahmen der Reproduzierbarkeit wieder dem Ausgangswert. Zwei der Objekte zeigen eine

gewisse wahrscheinliche absolute Erhöhung der Durchlässigkeit von einigen % des Mittelwertes, bei dem vierten Objekt kann eine absolute Verschlechterung der Luftdichtheit um ca. 10 % des Mittelwertes angenommen werden.

In [17] werden sechs Gebäude vorgestellt, welche kurz nach Erstellung (1992) und nach ca. 3 1/2 Jahren (1996) einer Luftdichtheitsmessung unterzogen werden. Es handelt sich dabei um vier in massiver Bauweise (ein Firmengebäude, ein Kindergarten, ein Reihenhaus und ein freistehendes Einfamilienhaus) sowie zwei in Holzleichtbauweise (freistehende Einfamilienhäuser) erstellte Gebäude. Die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehüllen dieser Gebäude erhöht sich in dem genannten Zeitraum um 11 - 218%. Die beobachteten Verschlechterungen werden im wesentlichen auf Schwindvorgänge in Anschlußbereichen zurückgeführt. Genannt werden auch abgerissene dauerlastische Verfugungen.

### 3 Meßgenauigkeit

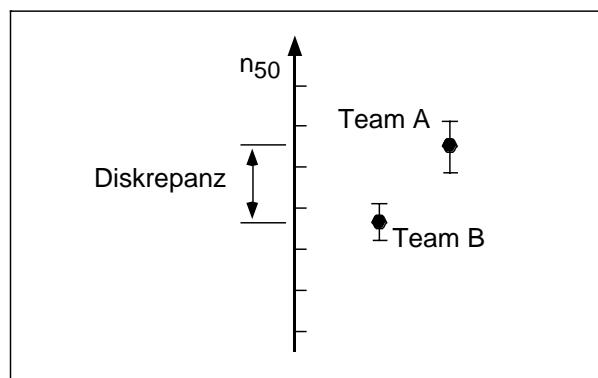
#### 3.1 Allgemeines

Wie werden Meßergebnisse angegeben? Sie sollten grundsätzlich in der Form

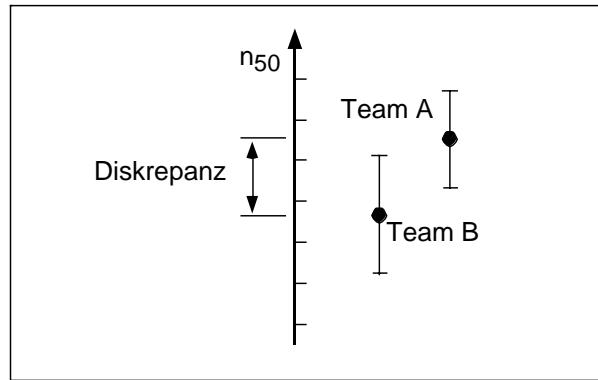
$$\text{"Beste Schätzung"} \pm \text{Unsicherheit}$$

angegeben werden. Es sind nur signifikante Stellen des Ergebniswertes anzugeben. Dabei hängt die Anzahl signifikanter Stellen von der Größe der Meßunsicherheit ab. Ein Beispiel kann dies verdeutlichen: Die Auswertung einer Messung wird mit einem EDV-System durchgeführt. Das Programm berechnet aus den Meßdaten das Ergebniss " $n_{50} = 2,3568$ ". Die eingesetzte Meßtechnik sowie die Randbedingungen bei der Messung führen zu der Abschätzung der Unsicherheit von etwa " $\pm 10\%$ ". Nun sind 10 % von 2,3 ca. 0,2. So ist in genanntem Beispiel eine sinnvolle Ergebnisangabe " $n_{50} = 2,4 \pm 0,2$ ", d.h. nur die signifikante Stellen werden angegeben.

Wann sind zwei Messungen als "im Ergebnis übereinstimmend" zu betrachten? Anhand eines Beispiels soll dies verdeutlicht und einige Begriffe festgelegt werden. Gehen wir von zwei Meßteams (Team A und Team B) aus, die dasselbe Gebäude messen. Die Meßergebnisse liegen etwas auseinander. Nun geben beide Meßteams auch eine Abschätzung des Meßfehlers an. Es können nun grundsätzlich zwei Fälle auftreten: Die Diskrepanz der Ergebniswerte ist größer als die Summe der angegebenen Unsicherheiten (Bild 1) oder die Diskrepanz der Ergebniswerte ist kleiner als die Summe der angegebenen Unsicherheiten (Bild 2). Im ersten Fall ist die Diskrepanz signifikant, d.h. die Meßergebnisse sind tatsächlich als voneinander abweichend zu betrachten, im zweiten Fall können die Meßergebnisse als übereinstimmend erachtet werden [10].



**Bild 1:** Beispiel von Meßergebnissen zweier Meßteams, die eine signifikante Diskrepanz aufweisen [10].



**Bild 2:** Beispiel von Meßergebnissen zweier Meßteams, die eine *nicht* signifikante Diskrepanz auf weisen [10].

Der Gesamtfehler einer Messung setzt sich i.a. aus vermeidbaren, systematischen und zufälligen Fehlern zusammen. Vermeidbare Fehler werden durch Fehlerrechnung nicht behandelt. Die betrachtete Meßunsicherheit faßt systematische und zufällige Fehler zusammen. Der systematische Fehler beinhaltet unvollkommene Meßgeräte, zufällige Fehler werden z.B. durch nicht erkennbare und nicht beeinflußbare Änderungen von Meßgeräten und Umwelteinflüsse verursacht und schwanken bei wiederholten Messungen unter gleichen Bedingungen unregelmäßig in ihrer Größe und im Vorzeichen [10, 11].

Neben der absoluten Meßgenauigkeit ist die Reproduzierbarkeit von Messungen in einem größeren zeitlichen Abstand relevant. Hier kommt bei einem Vergleich von Messungen zweier Meßteams als zusätzliche Unsicherheit hinzu, daß sich die Luftdichtheit von Gebäuden tatsächlich verändern kann. Bei Wiederholungsmessungen mit denselben Geräten ist die absolute Genauigkeit der Geräte nicht mehr relevant (sofern die Meßgeräte keine zeitliche Drift aufweisen). Für eine Fehlerbetrachtung muß nur noch die Reproduzierbarkeit der eingesetzten Meßgeräte betrachtet werden.

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

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

gesucht.

Das in [13] empfohlene Rechenverfahren berücksichtigt keine realen Fehler in den Meßwerten und führt bei der Berechnung des Vertrauensbereiches für die gefundenen Koeffizienten  $a$  und  $b$  im allgemeinen zu kleinen (optimistischen) Werten. Auch "warnt" das Berechnungsverfahren nach [13] nicht, wenn die zugrundeliegenden Daten dem zugrundegelegten Modell nicht gut entsprechen [1].

### 3.2 Meßtechnik

Eine Labor-Vergleichsmessung zeigt, daß typische Standard-Manometer von Blower Door-Systemen eine relativ geringe absolute Genauigkeit und aufgrund einer gewissen 'Nutzerabhängigkeit' (Ablesen) auch eine gewisse Streuung in der Reproduzierbarkeit zeigen. Zwei der drei untersuchten Geräte erreichen erst bei Druckdifferenzen über 30 Pa eine Reproduzierbarkeit besser 5%. Anhand der Untersuchung von drei zur Verfügung stehenden, vom Modell her identischen Blower Door-Ventilatoren wird ersichtlich, daß die Übereinstimmung der Einzelsysteme nicht innerhalb der anhand der Herstellerangaben zu erwartenden Streuung liegen. Damit kann für Luftdichtheitsmessungen abgeschätzt werden, welche Meßgenauigkeit mit einem zur Verfügung stehenden Meßsystem theoretisch erreichbar ist. Es können sowohl die Unsicherheit der eigentlichen Meßwerte sowie diejenige abgeleiteter

Größen betrachtet werden. Die Kalibrationsgenauigkeit der eingesetzten Ventilatoren ist bei Ventilator-Meßdrücken ab ca. 100 Pa nahezu vollständig für die Gesamtunsicherheit des gemessenen Volumenstroms verantwortlich. Bei Luftdichtheitsmessungen anhand von Differenzdruckverfahren werden die gemessenen Druckdifferenzen über die Gebäudehülle und ermittelten Volumenströme zusammen ausgewertet. Für eine Aussage über die Gesamtunsicherheit des Volumenstroms bei 50 Pa Druckdifferenz über die Gebäudehülle beispielsweise, muß also auch der Fehler bzw. die Unsicherheit beider Größen berücksichtigt werden. Die korrekte Berücksichtigung erfolgt durch Ansatz der (Meß-) Unsicherheit beider Größen — Druckdifferenz über die Gebäudehülle und Volumenstrom — bei der Berechnung der Ausgleichsfunktion [1].

### 3.3 Windeinfluß

Über die Wirkung veränderter Druckverhältnisse durch Windanströmung auf die rechnerische Meßgenauigkeit läßt sich folgendes feststellen [15]:

- Die Größe der Gesamtleckage hat einen vernachlässigbaren Einfluß auf den rechnerischen Meßfehler.
- Der Einfluß der vertikalen Leckageverteilung ist gering.
- Die horizontale Leckageverteilung bzw. die Beschränkung der wesentlichen Leckagen auf zwei oder eine Fassade zeigt einen deutlichen Einfluß. Der rechnerische Meßfehler wächst, wenn die Leckagen auf wenige Fassaden verteilt sind.
- Art und Anzahl von Referenzdruckmeßstellen zeigen einen erheblichen Einfluß. Hierbei führen vier Referenzdruckmeßstellen meist zu den geringsten rechnerischen Meßfehlern.
- Die Mittelwertbildung aus Über- und Unterdruckmessung führt nur bei einem Druckexponenten  $n=1,0$  zur Aufhebung des rechnerischen Meßfehlers. Der reale Exponent liegt jedoch für Gebäude im Mittel bei 0,65.

Anhand eines exemplarischen, über einen Zeitraum von 2 x 10 Minuten gemessenen Verlaufes von Windrichtung und -geschwindigkeit werden unterschiedliche Meßstrategien verglichen. Folgende Aussagen werden abgeleitet:

- Ist das Ziel einer Messung ausschließlich die Bestimmung der Leckagegröße bei 50 Pa Druckdifferenz, zeigt die mehrfache Messung des Volumenstroms bei 50 Pa Druckdifferenz intermittierend mit einer Offsetmessung über alle betrachteten Intervallängen die geringste Standardabweichung.
- Der Einsatz von vier Referenzdruckmeßstellen ist zu empfehlen.
- Wird nur eine Referenzdruckmeßstelle eingesetzt, ist diese so auszubilden, daß eine Messung des Gesamtdruckes erfolgt.

Die Größenordnung des Windeinflusses bei einer vor Ort ermittelten Windgeschwindigkeit bis  $v_{Anem.} \approx 3$  m/s ist mit dem Fehler bei der Bestimmung von Druckdifferenzen anhand üblicher Meßgeräte vergleichbar. Für Windgeschwindigkeiten bis  $v_{Anem.} \approx 4,7$  m/s liegt der Einfluß in der Größenordnung der Kalibrationsgenauigkeit heute üblicher Volumenstrombestimmungen. Bei Windgeschwindigkeiten bis  $v_{Anem.} \approx 6$  m/s schließlich ist die Größenordnung vergleichbar mit der Unsicherheit in den Bezugsgrößen. Für ungünstige Situationen hinsichtlich der Leckageverteilung und der Windrichtung kann die durch Windanströmung verursachte Unsicherheit jedoch auch deutlich größer werden [15].

### 3.4 Dichtekorrektur

Tabelle 1 gibt für typische Wertebereiche den prozentualen Einfluß der genannten Größen auf den Dichtekorrekturfaktor  $K_L$  wieder. Weiterhin sind in Tabelle 1 die im Rahmen der in [15] beschriebenen

Messungen festgestellten maximalen Korrekturen infolge von Abweichungen (1%- bzw. 99%-Wert) der Größen Temperatur, Luftdruck und Druckexponent von Standardbedingungen wiedergegeben.

Die in Tabelle 1 genannten maximalen Werte für den Korrekturfaktor  $K_L$  können als Extremwerte erachtet werden. Meist wirken die Einflußgrößen bei realen Daten teilweise gegenläufig auf den Korrekturfaktor und führen damit zu geringeren Korrekturen. Für 108 Messungen ermittelte Korrekturfaktoren  $K_{L,P}$  und  $K_{L,N}$  fallen die überwiegende Mehrheit der Korrekturen deutlich geringer aus, als die in Tabelle 1 genannten Werte [15].

**Tabelle 1:** Maximaler Einfluß von Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und Druckexponent in typischen Wertebereichen auf den Dichtekorrekturfaktor  $K_L$ . Für die Außen-temperatur ( $\vartheta_{Li} = \vartheta_0, P_{abs.} = P_0, n=0,65$ ), den Luftdruck ( $\vartheta_{Li} = \vartheta_{La} = \vartheta_0, n=0,65$ ) und den Druckexponenten ( $\vartheta_{Li} = 20^\circ C, \vartheta_{La} = 0^\circ C, P_{abs.} = P_0$ ) ist die maximale Abweichung im Rahmen der in [15] beschriebenen Messungen gegeben.

Parameter	über dargestellten Bereich			1%-Max. für Messwerte		
	Überdr.	Unterdr.	Mittelw.	Überdr.	Unterdr.	Mittelw.
Temperaturdifferenz	5,8%	8,7%	1,8%	5,0%	8,1%	1,6%
Luftdruck	2,3%	2,3%	2,3%	–	–	1,6%
Luftfeuchte (Druckexponent)	0,23%	0,15%	0,05%	–	–	–
	3,6%	13,0%	5,4%	3,1%	7,1%	1,9%

### 3.5 Bezugsgrößen

Auch die Bestimmung von Bezugsgrößen ist grundsätzlich mit einer Unsicherheit behaftet. Neben Unsicherheiten in der Definition, welche kaum quantifizierbar sind jedoch eine erhebliche Größe haben können, entsteht bei der Berechnung eines Volumens oder einer Fläche durch die Unsicherheit in den Abmessungen ein Fehler. Dieser kann durch Fehlerrechnung abgeschätzt werden. Insbesondere beim Volumen muß zusätzlich mit einer Unsicherheit von 5-10% durch das Fehlen einer exakten Definition zu berücksichtigender Gebäudebereiche gerechnet werden. Ein realistischer Ansatz für die Gesamt-Uunsicherheit bei der Bestimmung der Bezugsgrößen ist für das Volumen ca. 10 % und für die Netto-grundfläche ca. 5 %. Diese Unsicherheit überträgt sich selbstverständlich auf abgeleitete Größen [15].

## 4 Zusammenfassung

Sehr viele Randbedingungen und Parameter beeinflussen die Meßgenauigkeit von Luftpichtheitsmes-sungen mit der Blower Door-Methode. In der Praxis sollte versucht werden, wesentliche Randbedingun-gen einer Messung so vorzugeben, daß die Messung eine möglichst geringe Unsicherheit im Ergebnis hat. Um den Einfluß einzelner Parameter abschätzen zu können, werden umfangreiche Untersuchungs-ergebnisse vorgestellt.

In Tabelle 2 ist anhand eines Beispiels zusammengestellt, welche Unsicherheiten im Meßergebnis aus den einzelnen Einflußgrößen resultieren. Für die Bestimmung der Gesamtfehler wird dabei angenom-men, daß alle Einzelfehler unabhängig voneinander und zufällig sind.

Zusammenfassend kann insgesamt davon ausgegangen werden, daß Luftpichtheitsmessungen mit der Blower Door-Methode bei sorgfältiger Durchführung der Messung derzeit eine Meßgenauigkeit innerhalb einer 10-20% Schranke und i.d.R. eine langfristige Reproduzierbarkeit innerhalb einer 20-40% Schranke haben. Hierbei entfällt ca. die Hälfte der Unsicherheit auf die Messung selbst und die Hälfte auf das Gebäude. Im Einzelfall (Messung bei starkem Wind, starke Austrocknung des Gebäudes, nicht dauerhafte Detaillösungen der Luftpichtheitsschicht) kann besonders auch die langfristige Unsicherheit deutlich größer werden.

**Tabelle 2:** Zusammenstellung zu erwartender Unsicherheiten infolge verschiedener Einflußgrößen von Luftdichtheitsmessungen ( $v_{Met} \leq 6 \text{ m/s}$ , Cp-Werte Fall III, Einzelfehler unabhängig und zufällig).

Quelle der Unsicherheit	min.	max.	
$\Delta p_{Geb.}$	<1	-	3 %
Volumenstrombestimmung	3	-	7 %
Dichtekorrektur	0	-	10 %
Bezugsgröße	5	-	15 %
infolge Wind (horizontale LV auf ...)			
alle Fassaden	7	-	11 %
zwei Fassaden	7	-	13 %
eine Fassade verteilt	17	-	42 %
Setzung/Feuchteschwankung	0	-	30 %
Gesamtunsicherheit			
ohne Wind	6	-	35 %
mit Wind (min.)	9	-	36 %
mit Wind (max.)	21	-	55 %

## Literatur

- [1] Geißler, A. und Hauser, G. *Reproduzierbarkeit von Messungen zur Luftdichtheit von Gebäuden*. Abschlußbericht AiF-Forschungsvorhaben 10650, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel, April 1998.
- [2] Bundesanzeiger Seite 10885, Bekanntmachungen. *Hinweis auf allgemein anerkannte Regeln der Technik zur Wärmeschutzverordnung*, 31. Juli 1998.
- [3] Verordnung über einen energisparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV). vom 16. August 1994.
- [4] DIN V 4108 "Wärmeschutz im Hochbau", Teil 7 "Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen", Vornorm, November 1996.
- [5] Persily, A. und Grot, R. *Accuracy in Pressurization Data Analysis*. ASHRAE Transactions 91 (1985).
- [6] Sherman, M. und Palmeter, L. *Uncertainties in Fan Pressurization Measurements*. In Airflow Performance of Building Envelopes, Components, and Systems (1995), ASTM STP 1255, S. 266–283.
- [7] ASTM E779. *Determining air leakage rate by fan pressurization*, 1987.
- [8] Murphy, W., Colliver, D. und Piercy, L. *Repeatability and Reproducibility of Fan Pressurization Devices in Measuring Building Air Leakage*. ASHRAE Transactions 97 (1991), 2.
- [9] Levin, P., Wilson, D. und Ackerman, M. *Air Leakage in the Perspective of International Standards*. In Airflow Performance of Building Envelopes, Components, and Systems (1995), ASTM STP 1255, S. 231–247.
- [10] Taylor, J. *An Introduction to Error Analysis – The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2 Ed. University Science Books, Sausalito, California, 1997.
- [11] Beitz, W. und Küttner, K.-H., Edn. *Taschenbuch für den Maschinenbau/Dubbel*, 15. korrigierte u. ergänzte Auflage Ed. Springer Berlin; Heidelberg; New York; Tokyo; 1983.
- [12] 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.
- [13] ISO/DIS 9972. *Thermal insulation – Determination of building airtightness – Fan pressurization method*, 1995.
- [14] SS 02 1551. *Svensk Standard Buildings: determination of airtightness*, 1987.
- [15] Geißler, K. J. *Meßergebnisse zur Luftdichtheit von Gebäuden und theoretische Ermittlung der in der Praxis erreichbaren Meßgenauigkeit*. Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, 1998.
- [16] Geißler, A. *Reproduzierbarkeit von Luftdichtheitsmessungen*. wksb 43 (1998), H. 42, S. 24–33.
- [17] Böhmer. *Nachmessung der Luftdichtheit an bewohnten Niedrigenergiehäusern*. In Messung der Luftdichtheit von Gebäuden – Theorie und Praxis (1997), Nr. 8, EUZ Baufachtagung, Energie und Umweltzentrum am Deister e.V.