

Auswertung von Meßergebnissen zur Luftdichtheit von Gebäuden

Achim Geißler

Abstract

Building airtightness measurements lead to integral values for the permeability of the building envelope. Furthermore, leaks can be located during the measurement. Typical leaks are known from the many measurements done in the past. The evaluation of 133 building airtightness measurements and leak searchings shows there is no measurable percentage of window groove rabbets or cavity wall installation parts. It is also not possible to determine a dependency between length of wall and floor joints and total or derived leakage rate. The calculation of air density correction factors based on meteorological boundary conditions from the measurements give typical values of less than 5 % for the correction factor [1].

Kurzzusammenfassung

Die Überprüfung der Luftdichtheit der Gebäudehülle führt zu einem integralen Wert für die Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes sowie zu qualitativen Angaben über festgestellte Leckagen. Die statistische Auswertung von Luftdichtheitsmessungen an 133 Gebäuden unterschiedlicher Bauart und Messungen an Bauteilen führt u.a. zu folgenden Aussagen: Der Leckageanteil der Fensterfalze an der Gesamtleckage ist gering, es ist keine Ventilwirkung von Fenstern zwischen Über- und Unterdruckmessung vorhanden und die Leckage durch Steckdosen und Lichtschalter in Außenwänden von Leichtbauten kann vernachlässigt werden. Für typische Wertebereiche ergibt sich eine maximale Luftdichtekorrektur des Meßwertes von ca. 10 %. Dabei haben die Lufttemperatur und der Druckexponent den größten Anteil. Die Korrekturwerte aus den durchgeführten Messungen liegen zu ca. 95 % unter 4 % [1].

1 Einführung

Auf nicht absehbare Zeit wird die meßtechnische Überprüfung der Luftdichtheit von Gebäuden notwendig sein. Hierfür sind unter anderen folgende Gründe zu nennen: Die notwendige Kontrolle der Bauausführung und ein für eine Förderung geforderter Nachweis. Die Überprüfung der Luftdichtheit von Gebäuden im Rahmen einer Qualitätskontrolle oder der Bauabnahme erfolgt i.d.R. mit einer statischen Differenzdruckmethoden ("Blower Door-Methode", siehe z.B. [2]). Derartige Luftdichtheitsmessungen führen zu einem integralen Wert für die Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes. Die meist im Rahmen der Messung durchgeführte Leckageortung, also die Bestimmung der Stellen im Gebäude, welche direkt feststellbare Undichtheiten aufweisen, soll zu Erkenntnissen führen, die die Verbesserung der Luftdichtheit eines Gebäudes ermöglichen. Aus einer Vielzahl von Messungen, z.B. in [3, 4, 5] sind typische Leckagen bekannt.

Liegt das Meßergebnis nicht im erwarteten oder erwünschten Bereich, wird bei der Ursachenfindung häufig auf zunächst naheliegende und bei der Leckageortung leicht feststellbare Leckagen wie Fenster, Rolladen-Antrieb (Gurt oder auch Kurbel) sowie Elektroinstallationen (Steckdosen und Lichtschalter etc.) fokussiert. Es entsteht dann stets die Neigung, statt an der Ursache dieser Leckagen, meist grundlegenden Fehlern im Luftdichtheitskonzept, nur an den Symptomen Verbesserungen vorzusehen.

In Zusammenhang mit Luftdichtheitsmessungen wird zunehmend auch die Genauigkeit oder Reproduzierbarkeit derartiger Messungen diskutiert (z.B. [6]). Ein Faktor ist dabei die durch [7] bzw. [8] vorgesehene Temperaturkorrektur bzw. Normierung der Meßergebnisse.

In vorliegendem Beitrag wird anhand der detaillierten Auswertung von Luftdichtheitsmessungen an 133 Gebäuden der quantitative Einfluß der Leckagen an verschiedenen Gebäudedetails untersucht. Es werden typische meteorologische Randbedingungen bei den Messungen aufgezeigt und deren Wirkung auf die Korrektur der Luftdichte für die Auswertung diskutiert.

2 Datengrundlage und Auswertungsmethoden

2.1 Allgemeines

Gebäude in unterschiedlichen Holzbauarten sowie Gebäude in Massivbauart werden untersucht. Dabei wird die Luftdichtheit sowohl von Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern als auch von Schulen und Kindertagesstätten, also großvolumigeren Gebäuden, unterschiedlicher Bauart gemessen. Die untersuchten Objekte sind über das gesamte Bundesgebiet verteilt. Die Gebäudepräparation entspricht [9].

2.2 Datenspiegel

Relevante Daten der untersuchten Gebäude werden anhand eines umfangreichen Datenspiegels aufgenommen und festgehalten. Neben den in [7] geforderten Daten wie Lufttemperatur innen und außen vor und nach der Messung, Luftdruck, Windrichtung und -geschwindigkeit, werden von vielen Gebäuden auch die Anzahl von Steckdosen und Lichtschaltern ('Elektroinstallationen') in Außenwänden bzw. der luftdichtenden Hülle und die laufenden Meter Fensterfalz bestimmt. Aus den Planungsunterlagen und ergänzenden Messungen an den Gebäuden selbst werden neben lichtetem Luftvolumen und Nettogrundfläche auch die Gebäudehüllfläche (ohne Bodenplatte) und die laufenden Meter Außenwand/Boden-Anschluß bestimmt. Daten von Messungen an 133 Gebäuden sind in einer Datenbank erfaßt. Die in den folgenden Abschnitten zusammengefaßten Ergebnisse beruhen nicht immer auf allen Datensätzen, da beispielsweise die Gesamtlänge der Fensterfalze nur von einem Teil der Gebäude bestimmt wurde. Die jeweils zugrundeliegende Anzahl von Gebäuden wird im Einzelfall genannt.

2.3 Auswertung der Meßdaten

2.3.1 Allgemeines

Eine Differenzdruckmessung liefert als Ergebnis Druckdifferenzen und dazugehörige Volumenströme. Die Meßwerte werden üblicherweise anhand des im Bauwesen vereinfachten Ansatzes für Spaltströmungen

$$\dot{V} = K C \Delta p^n \quad (1)$$

angepaßt. Treibende Kraft der Strömung ist die Druckdifferenz Δp . C ist der Leckagekoeffizient, der Faktor K ermöglicht eine Korrektur der Eigenschaften des strömenden Mediums (z.B. die Temperaturkorrektur) bzw. den Bezug auf Standardwerte der Dichte der Luft. Der Exponent n beschreibt vereinfacht betrachtet die Art der Spaltströmung. Eine rein laminare Strömung führt zu $n=1,0$, bei rein turbulenter Strömung ist $n=0,5$. Im Bauwesen wird meist von $n=0,65$ bis $0,67$ ausgegangen.

2.3.2 Korrelationskoeffizient

Bei der Auswertung wird die Korrelation zwischen den Meßdaten und den durch die Funktion 1 berechneten Werten ermittelt. Die so berechnete Korrelation ist ein Maß dafür, wie gut die Daten zu dem "Modell" (der Funktion gem. Gl. 1) passen. Den in diesem Beitrag angegebenen Korrelationskoeffizienten liegt die folgende Bestimmungsgleichung zugrunde [10, 11]:

$$r = \frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

2.3.3 Quadrantenkorrelation

Im Rahmen der Auswertung von Meßdaten wird das Vorhandensein von Zusammenhängen zwischen einzelnen Größen und der Luftdichtheit sowie auch zwischen Größen untereinander untersucht. Mögliche Korrelationen werden dabei auf der Basis der Quadranten-Korrelation akzeptiert bzw. abgelehnt. Dieser statistische Test ist der *Median-Test auf Unabhängigkeit* [12]. Der Test prüft, ob zwischen zwei als Meßwerten gegebenen Merkmalen x und y Unabhängigkeit besteht. Die nach x oder y geordneten Paare werden danach aufgeteilt, ob die Paarlinge kleiner oder größer als ihr Median sind. Die Aufteilung der Paarlinge führt zu vier Zahlen; für jeden Quadranten die Anzahl Wertepaare, die die jeweilige Bedingung erfüllt. Liegt eine Korrelation vor, müssen diese Quadrantenwerte diagonal paarweise (a,d und b,c) auf bzw. außerhalb kritischer Punktwerte liegen. Ist dies der Fall, wird die Korrelation auf dem gewählten Niveau akzeptiert, sonst abgelehnt. Bei den folgenden Betrachtungen zur Abschätzung einer möglichen Korrelation zweier Größen werden jeweils die unteren und oberen Quadrantenwerte sowie die Stichprobengröße angegeben.

3 Meßergebnisse

3.1 Bauliche Parameter

3.1.1 Allgemeines

In Bild 1 ist für die hier zugrunde liegenden Gebäude die Häufigkeit typischer Leckagen wiedergegeben. Die Leckagen sind dabei zwangsweise stark kategorisiert.

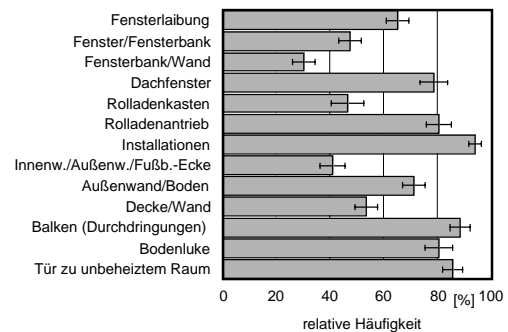


Abbildung 1: Übersicht über die Häufigkeit bestimmter Leckageorte. Wiedergegeben ist jeweils der prozentuale Anteil derjenigen Gebäude, bei denen die genannte Leckage festgestellt wurde, an der Gesamtzahl der Gebäude mit dem betreffenden Detail. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder.

Folgende mögliche Zusammenhänge zwischen baulichen Parametern und der Luftdichtheit sollen anhand der vorliegenden umfangreichen Meßdaten erörtert werden:

- Haben Fensterfalze einen erheblichen Anteil an der Gesamtleckage?
- Kann an Hand der Meßwerte eine Ventilwirkung von Fenstern festgestellt werden?
- Kann ein Zusammenhang zwischen der Gesamtlänge Außenwand/Boden-Anschluß und der Gesamtleckage festgestellt werden?
- Zeigen die Messungen einen Zusammenhang zwischen der Anzahl von Steckdosen und Lichtschaltern in Außenwänden und der Gesamtleckage?

3.1.2 Leckage durch Fensterfalze

Bei insgesamt 75 Objekten wird im Rahmen der durchgeführten Luftdichtheitsmessung die gesamte Falzlänge sämtlicher Fenster inkl. Fenstertüren bestimmt. Anhand dieser Daten kann mit Meßwerten zu typischen Luftdurchlaßkoeffizienten für Fenster aus [13] und den in DIN 18055 [14] genannten Anforderungen (vgl. Tabelle 1) ein theoretischer Leckageanteil von Fensterfalzen an der Gesamtleckage abgeschätzt werden.

In Bild 2 ist dieser theoretische prozentuale Leckageanteil für Meßwerte aus [13] sowie auf der Basis der Grenzwerte aus den Beanspruchungsgruppen A bzw. B-D gemäß DIN 18055 dargestellt. Für den Grenzwert der Beanspruchungsgruppe A entsteht ein maximaler hypothetischer Leckageanteil der Fenster von über 100 %. Die angegebenen Maximalwerte beziehen sich auf Gebäude mit großer Gesamtfalzlänge und relativ geringer Gesamtleckage; die Minimalwerte entsprechend auf Gebäude mit kleiner Gesamtfalzlänge und großer Gesamtleckage.

Es ist ersichtlich, daß bei den hier untersuchten Gebäuden die theoretische Leckage durch die Falze moderner Fenster im allgemeinen keinen signifikanten Anteil an der Gesamtleckage darstellt (die hier aus [13] angesetzten Meßwerte wurden an Fenstern aus den Jahren 1974 - 1982 ermittelt).

In der Energieeinsparverordnung [15] werden – zumindest für Gebäude mit mechanisch betriebener Lüftungsanlage – Fenster verlangt, die hinsichtlich der Dichtheit der Euroklasse 3 genügen. Dies entspricht einem Luftdurchlaßkoeffizienten a von ca. $0,5 \text{ m}^3/(\text{h m daPa}^n)$.

Tabelle 1: Luftdurchlaßkoeffizienten a für Fenster. Meßwerte aus [13] sowie Grenzwerte gemäß DIN 18055 [14] für die Beanspruchungsgruppen A bis D.

Fall	a	
	$\left[\frac{m^3}{h \cdot m \cdot Pa^n}\right]$	$\left[\frac{m^3}{h \cdot m \cdot da \cdot Pa^n}\right]$
gemessen	$0,05 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,2$
Beanspr.-gr. B-D	0,22	1,0
Beanspr.-gr. A	0,43	2,0

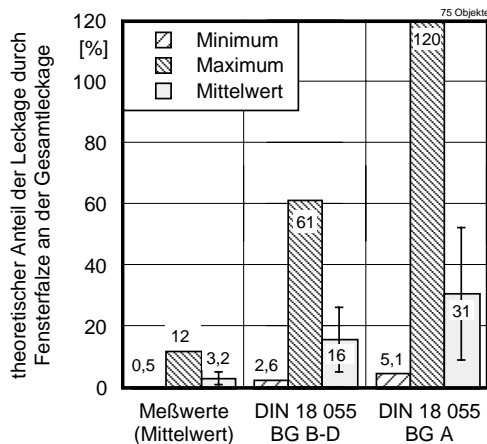


Abbildung 2: Theoretischer Anteil der Leckage durch Fensterfalze. Vergleich zwischen Meßwerten aus [13] und den Maximalwerten für die genannten Beanspruchungsgruppen nach DIN 18055.

3.1.3 Leckage durch Außenwand/Boden-Anschlüsse

Aus Bild 1 geht hervor, daß über 70 % der gemessenen Gebäude die Leckage 'Außenwand/Boden-Anschluß' aufweisen. Anhand einer Betrachtung der Gesamtlänge des Außenwand/Boden-Anschluß-Bereichs über dem nettogrundflächenbezogenen Volumenstrom wird abgeschätzt, ob dieses Detail einen meßbaren Anteil an der Gesamtleckage besitzt.

In Bild 3 ist diese Auftragung wiedergegeben. Die Quadrantenkorrelation führt zu dem Ergebnis, daß aus den zur Verfügung stehenden Meßwerten kein Zusammenhang zwischen der bezogenen Anschlußlänge und der Dichtigkeit der Gebäude bestimmt werden kann.

3.1.4 Leckage durch Steckdosen und Lichtschalter

Anhand von eigenen (Labor-)Messungen an Hohlwand-Installationsdosen und Meßwerten aus [17] sowie den zur Verfügung stehenden Daten über die Anzahl von Steckdosen und Lichtschaltern (Hohlwand-Installationsdosen) in Außenwänden einzelner Gebäude (alle hier zugrunde liegenden Gebäude sind in Holzbauart) kann ein theoretisch möglicher Anteil dieser Hohlwanddosen an der Gesamtleckage berechnet werden. Die Auswertung der zur Verfügung stehenden Meßdaten ergibt keine Korrelation zwischen der Anzahl Hohlwandinstallationsdosen und dem gemessenen Volumenstrom.

Eigene Messungen im Labor haben für herkömmliche Hohlwand-Installationsdosen bei einer Druckdifferenz von 50 Pa über die Installationsdose einen Volumenstrom von ca. 7,5

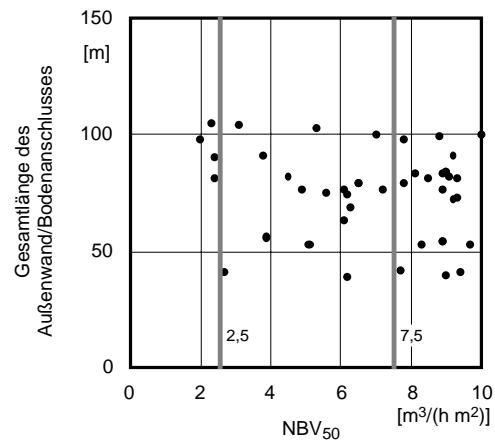


Abbildung 3: Gesamtlänge der Außenwand/Boden-Anschlüsse über dem NBV_{50} -Wert (zur Orientierung sind die in [16] genannten Grenzwerte eingezeichnet). Oberer Punktwert 19, unterer 18, Probengröße 75.

m^3/h pro Element ergeben. Setzt man diesen Wert für jede in einer Außenwand gezählte Hohlwand-Installationsdose an, erhält man einen mittleren Anteil an der Gesamtleckage von ca. 15%. Durch den schichtweisen Aufbau der Wände liegt bei Gebäuden i.d.R. ein stufenweiser Abbau der Gesamtdruckdifferenz von 50 Pa vor. Damit liegt nur ein Teil der Gesamtdruckdifferenz direkt an der Hohlwand-Installationsdose an. Unter der Annahme, daß im Mittel nur 25 Pa Druckdifferenz anliegen, wird der mittlere prozentuale Leckageanteil der gezählten Hohlwand-Installationsdosen auf ca. 10% reduziert. Auch dieser Wert ist vermutlich zu hoch angesetzt.

In [17] werden Luftdurchlässigkeits-Meßwerte vorgestellt, bei deren Bestimmung die Hohlwand-Installationsdosen in ganzen Wandabschnitten eingebaut wurden und somit die Randbedingungen tatsächlichen Gegebenheiten eher entsprechen. Genannt wird ein Maximalwert von $1,5 m^3/h$ bei 50 Pa pro Element. Dieser Wert kann aufgrund des Prüfkörperaufbaus¹ als Extremwert angesehen werden.

In Bild 4 ist für den in [17] genannten Maximalwert von $1,5 m^3/h$ pro Element bei 50 Pa der theoretische Leckageanteil von Elektroinstallationsdosen in der Außenwand an der Gesamtleckage über dem NBV_{50} -Wert wiedergegeben. Mit der Ausnahme von zwei sehr luftdichten Gebäuden mit gleichzeitig sehr großer Anzahl an Elementen in Außenwänden liegt der theoretische Leckageanteil um bzw. unter 5 %.

3.2 Meßtechnische Parameter

3.2.1 Allgemeines

Bei den durchgeführten Messungen vorgefundene meteorologischen Randbedingungen werden betrachtet. Anhand dieser Daten wird untersucht, wie groß der jeweilige Einfluß der Randbedingung auf die Korrektur der Luftdichte und damit auf das Meßergebnis ist.

Im einzelnen wird erörtert,

¹Eine vollgedämmte Holzständerwand, bei der die Hohlwand-Installationsdose in der raumseitigen Gipskartonplatte eingebaut ist und die vollflächige Dampfsperre durchdringt. In der außenseitigen Gipskartonplatte befindet sich eine der Installationsdose gegenüberliegende Bohrung von 20 mm Durchmesser.

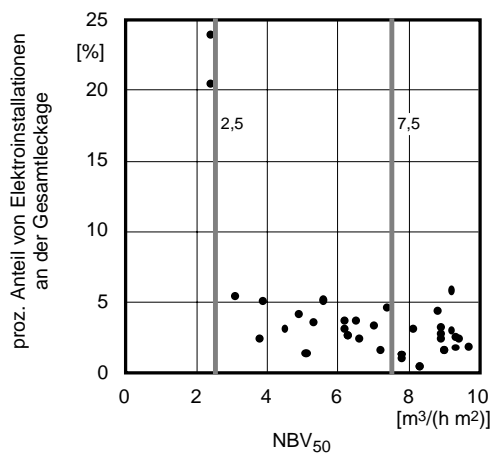


Abbildung 4: Theoretischer Anteil der Leckage durch Steckdosen und Lichtschalter in Außenwänden an der Gesamtleckage über dem NBV_{50} -Wert (zur Orientierung sind die in [16] genannten Grenzwerte eingezeichnet). Volumenstrom für Einzelelemente aus [17].

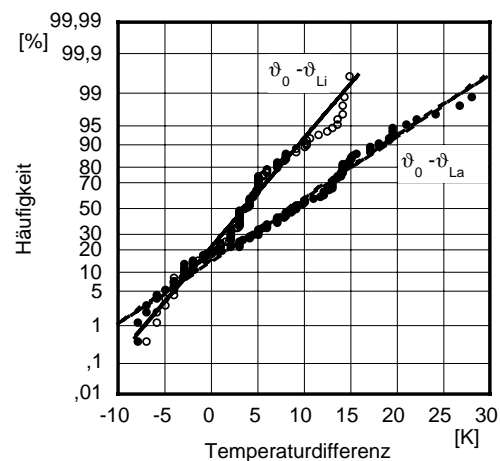


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen Innen- bzw. Außentemperatur und der in [7] genannten Standard-Temperatur $\vartheta_0 = 23^\circ\text{C}$. Temperaturwerte von 131 Luftdichtheitsmessungen.

- welche Windgeschwindigkeiten häufig angetroffen werden und ob die Streuung der Meßwerte bei hohen Windgeschwindigkeiten größer ist,
- welche Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen häufig angetroffen werden,
- welche Werte des unkorrigierten barometrischen Luftdrucks gemessen werden,
- wie sich die vereinfachende Annahme eines einheitlichen Druckexponenten von $n=0,65$ auf den bei 50 Pa Druckdifferenz berechneten Volumenstrom auswirkt und
- inwieweit sich die einzelnen Parameter innerhalb der gefundenen Wertebereiche auf die Luftdichtekorrektur auswirken.

3.2.2 Windgeschwindigkeit

Etwas über 30 % der Messungen wurden bei Windgeschwindigkeiten durchgeführt, die höher liegen als der in [7] genannte Grenzwert von 3 m/s. Zeit- und damit Kostenfaktoren verhindern im Normalfall das Verschieben eines Meßtermins, wenn vor Ort die Bedingungen nicht ideal sind.

3.2.3 Temperaturdifferenz

Die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen liegt für 131 Messungen zwischen -10 K (d.h. die Außentemperatur lag über der Innentemperatur) bis 26 K. Zu ca. 90% liegt die Temperaturdifferenz jedoch zwischen -2 K und 17 K. In Bild 5 ist die Häufigkeitsverteilung der Differenz der Außentemperatur und die der Differenz der Innentemperatur zur Standard-Temperatur $\vartheta_0 = 23^\circ\text{C}$ gegeben. Zu 99 % liegt die Differenz zur Außentemperatur unter 28 K, die zur Innentemperatur unter 14 K.

3.2.4 Druckexponent

In Bild 6 sind die Häufigkeitsverteilungen der aus Messungen an 129 Gebäuden ermittelten Druckexponenten für Über- respektive Unterdruck dargestellt. Mittelwert und Standardabweichung des Druckexponenten aller betrachteten Überdruckmessungen

betragen $n_P = 0,64 \pm 0,087$, die aller betrachteten Unterdruckmessungen $n_N = 0,65 \pm 0,071$. Dies deckt sich mit Angaben in der Literatur. Für unterschiedliche Gebäude wird der mittlere Druckexponent z.B. in [18, 19] zu 0,64 bis 0,67 angegeben.

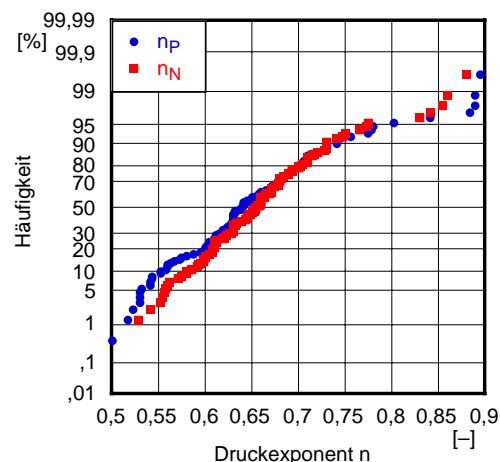


Abbildung 6: Häufigkeitsverteilung der durch Anpassung der Über- bzw. Unterdruck-Meßwerte aus 129 Messungen ermittelten Druckexponenten n .

Die prozentuale Abweichung des aus der Anpassung mit $n=0,65$ berechneten Volumenstroms von dem aus der Anpassung mit freiem n errechneten liegt überwiegend innerhalb $\pm 5\%$. Damit ist die relative Abweichung zwischen den Ergebnissen der Berechnungsmethoden zwar klein, andererseits ist der Berechnungsaufwand für freies n kaum höher. Für normale Auswertungen sollte daher der Druckexponent nicht vorgegeben werden.

3.2.5 Korrektur der Luftdichte

Vergleichbare, von der Dichte der Luft unabhängige Ergebnisse machen eine Umrechnung der gemessenen Volumenströme anhand der bei der Messung vorliegenden Randbedingungen

(Lufttemperaturen, Absolutdruck, Luftfeuchte) auf Standardbedingungen nötig. Sowohl in [7] als auch in [8] wird weiterhin verlangt, den Volumenstrom in den Leakagestrom d.h. den am Ventilator gemessenen Volumenstrom in den Volumenstrom an den Leckagen umzurechnen.

Der resultierende Korrektur- bzw. Normierungsfaktor ergibt sich aus dem strömungsmechanischen Ansatz für eine Blendenströmung zu

$$K_L = \left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right)^{1/2-n} \left(\frac{\mu_1}{\mu_0} \right)^{2n-1} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

worin der Index '0' Standard- bzw. Kalibrationsbedingungen bedeutet [3, 20]. Bei einer Unterdruckmessung bedeuten die Indizes '1' Umgebungs- und '2' Raumlufbedingungen, bei einer Überdruckmessung ist es umgekehrt. Die Dichte als Funktion von Temperatur, Absolutdruck und Luftfeuchte sowie die dynamische Viskosität der Luft werden gemäß [7], Annex I berechnet. Als Standard-Bedingungen werden

$$\vartheta_0 = 23^\circ\text{C}, P_{\text{abs}} = 1013 \text{ hPa und} \\ \varphi_0 = 0 \text{ (trockene Luft)}$$

angenommen. Der Druckexponent 'n' ist kein Parameter der Luftdichte sondern hängt von der Leakagegeometrie ab. Da er jedoch in Gleichung 3 stark eingeht, wird er im folgenden mitdiskutiert und – wenn nicht anders vermerkt – zu $n_P = n_N = 0,65$ gesetzt.

Der Korrekturfaktor K_L liegt bei üblichen Randbedingungen zwischen 0,9 und 1,1 – bewirkt also eine Korrektur von maximal ca. 10 %. In den Bildern 7 bis 8 ist der Korrekturfaktor K_L für die oben angegebenen, aus den Messungen ermittelten typische Wertebereiche über der Differenz zwischen Umgebungstemperatur und Standard-Temperatur sowie dem Druckexponenten aufgetragen. Bild 7 zeigt, daß die Umgebungstemperatur einen großen Einfluß auf K_L hat. Dabei kann jedoch durch Mittelwertbildung aus Über- und Unterdruckmessung der Einfluß deutlich verringert werden. Der barometrische Luftdruck hat einen geringen Einfluß auf den Korrekturfaktor. Er liegt für den Bereich 900 bis 1050 hPa bei ca. +2 bis -0,5 % (nicht dargestellt). Die relative Luftfeuchte hat praktisch keinen Einfluß (nicht dargestellt). Der Druckexponent hat wie die Lufttemperatur einen deutlichen Einfluß auf den Korrekturfaktor (vgl. Bild 8). Auch hier kann durch Mittelwertbildung zwischen Über- und Unterdruckmessung der Einfluß deutlich reduziert werden.

Tabelle 2 gibt für die dargestellten bzw. genannten Wertebereiche den prozentualen Einfluß der betrachteten Größen auf den Korrekturfaktor K_L wieder. Weiterhin sind in Tabelle 2 die im Rahmen der Messungen festgestellten maximalen Korrekturen infolge von Abweichungen der Größen Temperatur, Luftdruck und Druckexponent von den o.a. Standardbedingungen wiedergegeben. Die relative Luftfeuchte wird dabei zu konstant 50 % angenommen.

Die in Tabelle 2 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. In Bild 9 ist die Häufigkeitsverteilung des Betrages der für 108 Messungen ermittelten Korrekturfaktoren $K_{L,P}$ und $K_{L,N}$ gegeben. Es ist ersichtlich, daß die überwiegende Mehrheit der Korrekturen deutlich geringer ausfallen, als die in Tabelle 2 genannten Werte. Rund 95 % der Korrekturen fällt kleiner als 5 % aus.

Tabelle 2: Maximaler Einfluß von Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte und Druckexponent in den dargestellten Bereichen auf den Korrekturfaktor K_L . Für Außentemperatur ($\vartheta_{Li} = \vartheta_0, P_{\text{abs}} = P_0, n=0,65$), Luftdruck ($\vartheta_{Li} = \vartheta_0, n=0,65$) und Druckexponent ($\vartheta_{Li} = 20^\circ\text{C}, \vartheta_{La} = 0^\circ\text{C}, P_{\text{abs}} = P_0$) ist die maximale Abweichung im Rahmen der Messungen gegeben.

Parameter	über dargestellten Bereich			99%-Max. für Messwerte		
	Überdr.	Unterdr.	Mittelw.	Überdr.	Unterdr.	Mittelw.
Temperaturdiff.	5,8%	8,7%	1,8%	5,0%	8,1%	1,6%
Luftdruck	2,3%	2,3%	2,3%	-	-	1,6%
Luftfeuchte	0,23%	0,15%	0,05%	-	-	-
(Druckexponent)	3,6%	13,0%	5,4%	3,1%	7,1%	1,9%

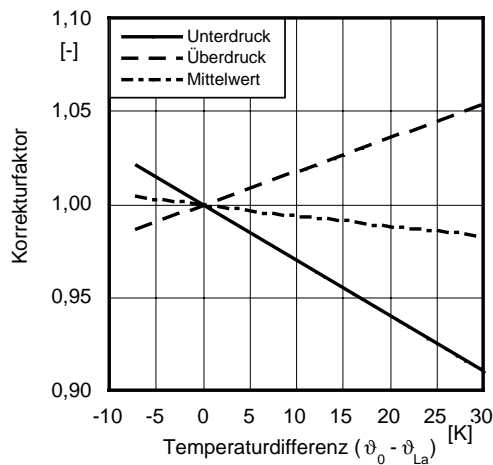


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit des Luftdichte-Korrekturfaktors für Unter- und Überdruckmessungen sowie im Mittel. Hierbei sind $P_{abs} = 1013 \text{ hPa}$, $\vartheta_{Li} = \vartheta_0$, $n_N = n_P = 0,65$, $\varphi = 0$.

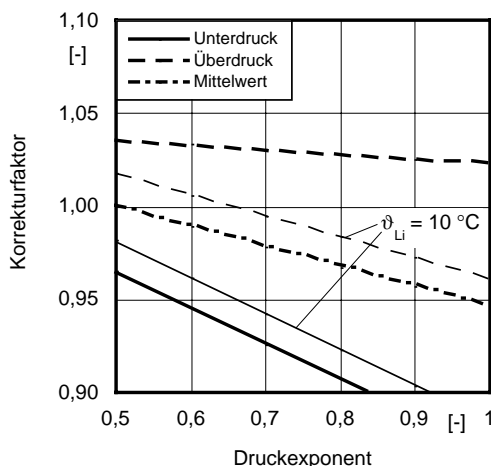


Abbildung 8: Abhängigkeit des Luftdichte-Korrekturfaktors von den Exponenten n_N und n_P für Unter- und Überdruckmessungen sowie im Mittel. Hierbei sind $\vartheta_{Li} = 20^\circ\text{C}$ bzw. 10°C , $\vartheta_{La} = 0^\circ\text{C}$, $P_{abs} = 1013 \text{ hPa}$, $\varphi = 0,5$. Für $\vartheta_{Li} = \vartheta_{La} = \vartheta_0$ ist $K_L = 1$.

4 Zusammenfassung

Aus vielfältigen Gründen wird auf nicht absehbare Zeit die meßtechnische Überprüfung der Luftdichtheit von Gebäuden notwendig sein. Eine Überprüfung der Luftdichtheit der Gebäudehülle erfolgt meist anhand einer statischen Differenzdruckmethode. Derartige Luftdichtheitsmessungen ('Blower Door-Messungen') führen zu einem integralen Wert für die Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes sowie zu qualitativen Angaben über festgestellte Leckagen. Liegt das Ergebnis einer solchen Messung nicht im erwarteten oder erwünschten Bereich, müssen Verbesserungen der zugrundeliegenden Konstruktion bzw. Ausführung vorgenommen werden. Hierbei ist sorgfältig darauf zu achten, daß korrektive Maßnahmen an der Ursache der zu großen Luftdurchlässigkeit, und nicht wie leider oft zu beobachten nur an den Symptomen – im Rahmen der Messungen leicht feststellbaren Leckagen – angreifen.

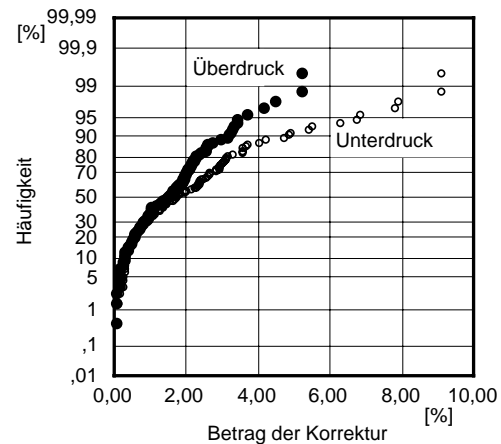


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung des Betrages der Luftdichte-Korrekturfaktoren K_L für Über- und Unterdruck aus 108 Messungen.

Die statistische Auswertung von Luftdichtheitsmessungen an 133 Gebäuden unterschiedlicher Bauart und Messungen an Bauteilen lassen folgende Aussagen zu:

- In Gebäuden mit Fenstern ab Baujahr 1980 ist der Leckageanteil der Fensterfalze an der Gesamtleckage im allgemeinen gering.
- Ein Zusammenhang zwischen der gesamten Fensterfalzlänge von Gebäuden und dem ermittelten Leckagevolumenstrom liegt nicht vor.
- Eine Ventilwirkung von Fenstern zwischen Über- und Unterdruckmessung kann nicht festgestellt werden.
- Es kann kein Zusammenhang zwischen der gesamten Länge vorhandener Außenwand/Boden-Anschlüsse und der Gesamtleckage festgestellt werden.
- Die Leckage durch Steckdosen und Lichtschalter in Außenwänden von Leichtbauten kann i.d.R. vernachlässigt werden.

Die Berechnung des Temperaturkorrekturfaktors gem. [7, 21] für typische Wertebereiche ergibt eine maximale Einfluß von ca. 10 % auf das Ergebnis. Bei ca. 95 % der durchgeführten Messungen liegt der tatsächliche Korrekturfaktor sogar unter 5 %. Dabei haben die Luftfeuchte und der barometrische Luftdruck den geringsten, die Lufttemperatur und der Druckexponent den größten Anteil.

Literatur

- [1] Geißler, K. J. *Meßergebnisse zur Luftdichtheit von Gebäuden und theoretische Ermittlung der in der Praxis erreichbaren Meßgenauigkeit*. Dissertation, Universität Kassel, Fachbereich Architektur, 1998.
- [2] Geißler, A. und Hauser, G. *Messung und Kennzeichnung der Luftdichtheit von Gebäuden*. DBZ 43 (1995), H. 10, S. 213–219.
- [3] Zeller, J., Dorschky, S., Borsch-Laaks, R. und Feist, W. *Luftdichtigkeit von Gebäuden*. Forschungsbericht, IWU/EBÖK/EUZ, August 1995.
- [4] Geißler, A. und Hauser, G. *Luftdichtheit von Holzhäusern bauen mit Holz* (Juli 1996), H. 7, S. 562–568.

- [5] Maas, A., Dönch, M. und Winkler, S. *Wie dicht sind SynergieHäuser? Luftdichtheit von Wohngebäuden in Niedrigenergiebauweise*. DBZ 47 (1999), 1, S. 79–82.
- [6] Geißler, A. *Reproduzierbarkeit von Luftdichtheitsmessungen*. wksb 43 (1998), H. 42, S. 24–33.
- [7] ISO/DIS 9972. *Thermal insulation – Determination of building airtightness – Fan pressurization method*, 1995.
- [8] prEN 13829. *Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method*, 4 2000.
- [9] SS 02 1551. *Svensk Standard Buildings: determination of airtightness*, 1987.
- [10] 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.
- [11] Digi-Soft. *Kaleidagraph Reference Guide*, 1988.
- [12] Sachs, L. *Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden*, 8 Ed. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 1996.
- [13] Schmid, J. et al. *Lüftung im Wohnungsbau*. Forschungsbericht, ift – Institut für Fenstertechnik e.V., Rosenheim, 1983.
- [14] DIN 18055 "Fenster – Fugendurchlässigkeit, Schlagregendichtheit und mechanische Beanspruchung. Anforderungen und Prüfung.", Oktober 1981.
- [15] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung EnEV). *Referentenentwurf*, Bonn, 28. Juni 1999, Bundesministerium für Wirtschaft und Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- [16] DIN V 4108 "Wärmeschutz im Hochbau", Teil 7 "Luftdichtheit von Bauteilen und Anschlüssen", Vornorm, November 1996.
- [17] Schober, K., Fuhrmann, W., Mannsbarth, A. und Haager, M. *Luftdichtheit von Bauteilen*. 1. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt, Österreichisches Holzforschungsinstitut, 1996.
- [18] Blasnik, M. und Fitzgerald, J. *In Search of the Missing Leak*. Home Energy (November/December 1992), 6.
- [19] Orme, M., Liddament, M. und Wilson, A. *An Analysis and data summary of the AIVC's numerical database*. Technical Note AIVC 44, Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwick Science Park, March 1994.
- [20] 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.
- [21] prEN WI 00089005. *Thermal performance of buildings – Determination of air permeability of buildings – Fan pressurization method*, 11 1998.

Nomenklatur

Bezeichner	Einheit	Bedeutung
C	$\text{m}^3/(\text{h Pa}^n)$	Strömungskoeffizient
a	$\text{m}^3/(\text{m h Pa}^n)$	Luftdurchlaßkoeffizient
Δp	Pa	Druckdifferenz
φ	–	relative Luftfeuchtigkeit
K	–	Korrekturfaktor
μ	Ns/m^2	dynamische Viskosität von Luft
N	–	Anzahl Werte-Paare
n	–	Druckexponent
P	hPa	unkorrigierter barometrischer Luftdruck
r	–	Korrelations-Koeffizient (Pearson's r)
ρ	kg/m^3	Dichte von Luft
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	Lufttemperatur
\dot{V}	m^3/h	Volumenstrom
x	–	berechn. Werte
y	–	Meßwerte
\bar{x}, \bar{y}	–	Mittelwert

Index Bedeutung

0	Bezugswert
abs	Absolutdruck
i	Innen (indoor), Laufindex
L	Luft(dichte)
La	Luft außen
Li	Luft innen
N	Unterdruck
P	Überdruck