

Luftdichtheits-Messung von Hochhäusern



Autoren:
Søren Peper
Dr. Jürgen Schnieders
Passivhaus Institut
September 2019

Luftdichtheits-Messung von Hochhäusern

1. Hilfestellungen zur Durchführung der Messung

Aufgrund der besonders starken Wind- und Thermikeinflüsse bei Hochhäusern müssen für Blower Door Messungen besondere Regeln berücksichtigt werden. Die Normen EN 13829 bzw. ISO 9972 geben dazu keine ausreichenden Hinweise.

In [Rolfsmeier/Simons 2017] sind praktische Erfahrungen aus einer Messung eines Hochhauses mit 16 Geschossen (Höhe ca. 60 m) geschildert. Dort zeigen sich der deutliche Windeinfluss sowie die ausgeprägte Auswirkung der Thermik mit einer natürlichen Druckdifferenz zwischen EG und 16. OG von etwa 30 Pa (rechtes Bild). Bei schlechten Windbedingungen (Bild links) sind die Druckverhältnisse uneindeutig. Die Messstellen sind, je nach Himmelsrichtung, unterschiedlich stark vom Wind beeinflusst.

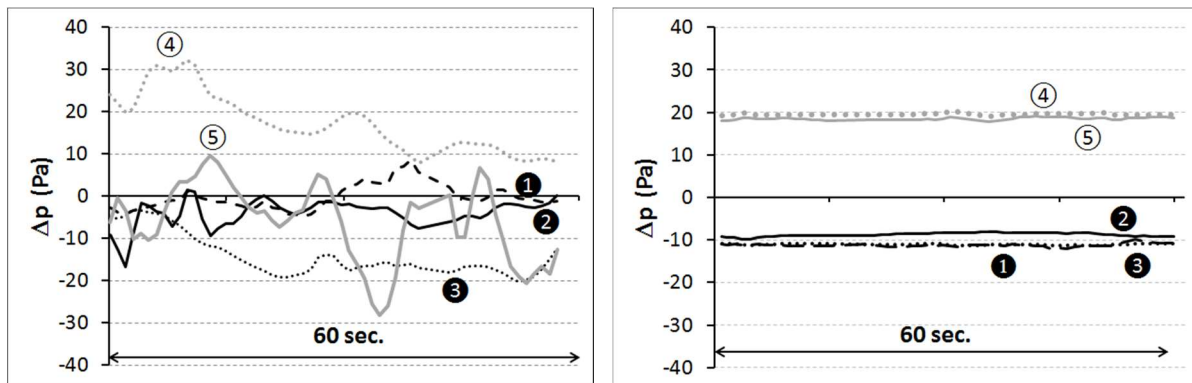


Abbildung 1: Messungen der natürlichen Druckdifferenzen am Hochhaus mit 16 Geschossen an drei Seiten im untersten Geschoss (1, 2 und 3) sowie im obersten Geschoss (4 und 5). Links: Windstärke 4, Temperaturdifferenz 9°C. Rechts: Windstärke 0-1, Temperaturdifferenz 14°C (aus [Rolfsmeier/Simons 2017])

Die günstigste Situation für eine Luftdichtheits-Messung von großen Gebäuden sind daher Windstille und eine geringe Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Da die Messung in den Bauablauf integriert werden muss, sind diese Bedingungen allerdings in der Regel nicht gegeben.

Der Einfluss der Temperaturdifferenz und der Höhe des Gebäudes auf die Größe der Druckdifferenz zwischen unten und oben (Thermik) wird exemplarisch in Abbildung 2 gezeigt. So beträgt die Druckdifferenz z.B. bei einem 80 m hohen Gebäude und einer Temperaturdifferenz von 15 K etwa bis 24 Pa. Der Ausgangspunkt dafür ist die druckneutrale Ebene, vereinfacht bei gleichmäßiger Leckagenverteilung die halbe Höhe des Gebäudes. Vom EG bis in das oberste OG beträgt die Druckdifferenz damit $2 \times 24 \text{ Pa} = 48 \text{ Pa}$. Es stellen sich also Druckdifferenzen ein, welche für die Messung nicht mehr zu vernachlässigen sind.

Nach den Normen ISO 7792 bzw. EN 13892 ist das Fünffache der natürlichen Druckdifferenz als unterster Messpunkt der Messreihe zu wählen. Das wären hier bereits $5 \times (-24 \text{ Pa}) = -120 \text{ Pa}$, was nicht mehr umzusetzen ist¹.

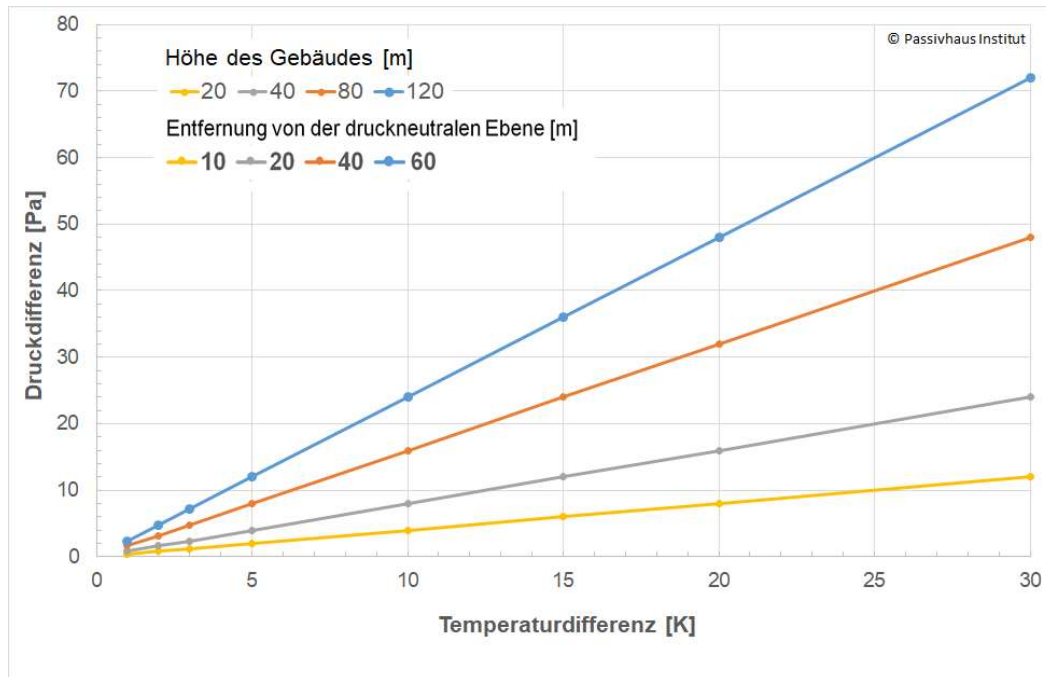


Abbildung 2: Berechnung der Druckdifferenz aufgrund der Thermik (Ausgangspunkt: druckneutrale Ebene) in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen für unterschiedliche Gebäudehöhen. Die Berechnung bezieht sich auf Meereshöhe.

Die dafür angewandte Formel zur Abschätzung der natürlichen Druckdifferenzen durch Thermik lautet nach [Zeller 2012]:

$$\Delta p_{Th} = 0,04 \text{ Pa}/(\text{K m}) * h * \Delta T$$

Δp_{Th} : Differenzdruck zwischen innen und außen durch Thermik in Pa,

h: Höhe ab der druckneutralen Ebene in m,

ΔT : Temperaturdifferenz zwischen innen und außen in K.

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Formel ist eine offene Verbindung der Luft Räume im gesamten Gebäude ohne relevanten Druckabfall (Behandlung als „ein Raum“).

Unter der vereinfachten Annahme der gleichmäßigen Leckageverteilung über das Gebäude stellt sich die druckneutrale Ebene in der Mitte der Gebäudehöhe ein. Ohne Berücksichtigung des Windes herrscht im unteren Teil Unter- und im oberen Überdruck (Voraussetzung: innen wärmer als außen) (Abbildung 3).

¹ Aus der Norm geht nicht eindeutig hervor ob die gemessene oder die erzeugte Druckdifferenz gemeint ist. Der Unterschied ist gering, wir gehen hier davon aus, dass sich die Norm auf die gemessene Druckdifferenz bezieht.

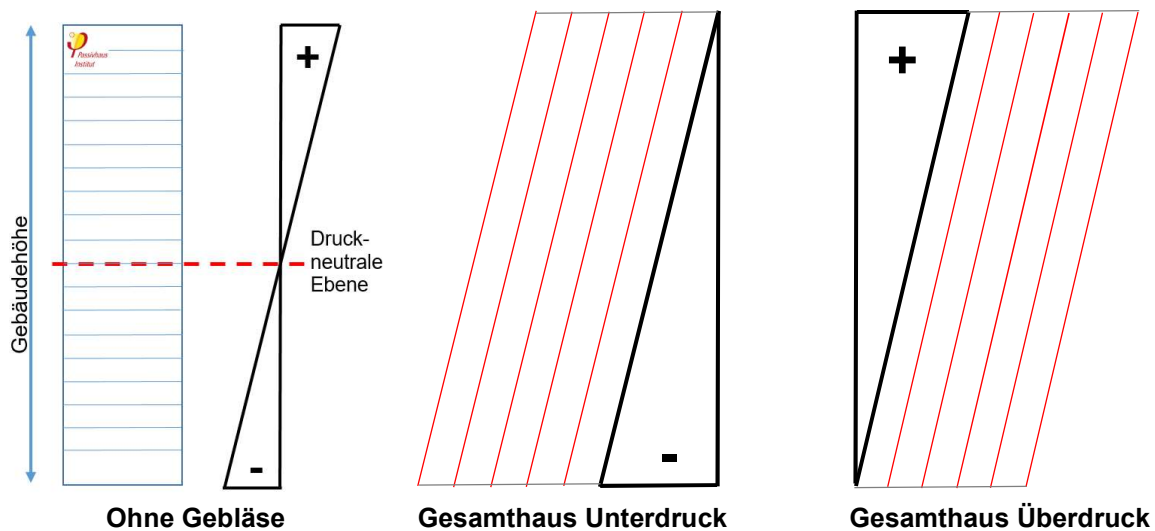


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Druckverhältnisse in einem Hochhaus aufgrund der Thermik (links) und bei erzeugtem Unter- bzw. Überdruck im gesamten Gebäude (Mitte und rechts). Die roten durchgezogenen Linien stellen die unterschiedlichen Druckstufen einer Unter- bzw. Überdruckmessung dar.

Wichtig zu beachten:

Merke: Für die Auswertung dürfen nur die Messpunkte verwendet werden, bei deren Aufnahme im gesamten Gebäude Unter- bzw. Überdruck bestand. Die Messpunkte, bei denen dies nicht gesichert ist, werden weggelassen. Bei diesen Messpunkten werden einige Leckagen falsch herum durchströmt, dadurch kann der Infiltrationsvolumenstrom nicht korrekt gemessen werden.

Wichtig für alle Betrachtungen ist die Unterscheidung der „gemessenen“ und der „erzeugten“ Druckdifferenz.

Gemessene Druckdifferenz: Wert der Druckdifferenz zwischen innen und außen, welcher am Messgerät abgelesen wird. Zum Beispiel eine natürliche Druckdifferenz von -20 Pa.

Erzeugte Druckdifferenz: Die Druckdifferenz, die der Ventilator zusätzlich zur natürlichen Druckdifferenz erzeugt. Beträgt z.B. die natürliche Druckdifferenz -20 Pa, und man liest am Messgerät eine Druckdifferenz innen/außen von 0 Pa ab, beträgt die die erzeugte Druckdifferenz $+20$ Pa.

1.1 Kontrolle der natürlichen Druckdifferenz

In der Norm ISO 9972 ist unter Punkt „5.3.3 Natürliche Druckdifferenz“ u.a. die Abweichung der positiven Δp_{01+} und negativen Δp_{01-} Druckwerte zu berechnen (entsprechend nach der Messung Δp_{02+} und Δp_{02-}). Die Beträge dürfen für eine normkonforme Messung nicht größer als 5 Pa sein. Mit der Prüfung soll der Windeinfluss überprüft werden. Aufgrund der Thermik in einem Hochhaus kann diese Prüfung in dieser Form nicht durchgeführt werden. Häufig ist der Betrag des Gesamtmittelwerts der Nulldruckmesswerte bereits größer als 5 Pa. Der Gesamtmittelwert wird bei der Hochhausmessung natürlich weiterhin benötigt.

2. Berechnung für ein Beispielhochhaus

Ein Hochhaus mit $H = 120$ m wird im Herbst bei einer Temperaturdifferenz von 15 K gemessen. Aufgrund der Thermik stellt sich über die Höhe des Gebäudes eine Druckdifferenz von etwa 72 Pa ein. Wenn die druckneutrale Ebene sich auf halber Höhe befindet, werden im EG -36 Pa, im obersten Geschoss +36 Pa herrschen. Für die **Überdruckmessung** muss dann die Blower Door als unterste Druckstufe so eingestellt werden, dass am Einbauort im Erdgeschoss gesichert Überdruck anliegt, z.B. +5 Pa. Für die weiteren Druckstufen bis z.B. 55 Pa kann dann wie üblich vorgegangen werden. Im **obersten Geschoss** liegen dann aufgrund der Thermik

$5 \text{ Pa} + 72 \text{ Pa} = \mathbf{77 \text{ Pa}}$ bis

$55 \text{ Pa} + 72 \text{ Pa} = \mathbf{127 \text{ Pa}}$ an.

Bei der Unterdruckmessung muss sichergestellt sein, dass auch im obersten Geschoss Unterdruck besteht. Setzt man hier wieder einen „Sicherheitsabstand“ von 5 Pa an, ergibt sich für die Einstellung im EG:

$-72 \text{ Pa} - 5 \text{ Pa} = -77 \text{ Pa}$ bis

$-72 \text{ Pa} - 55 \text{ Pa} = -127 \text{ Pa}$

Entsprechend liegen dann im obersten Geschoss -5 bis -55 Pa als Druckdifferenz an; dauerhafter Unterdruck ist damit sichergestellt.

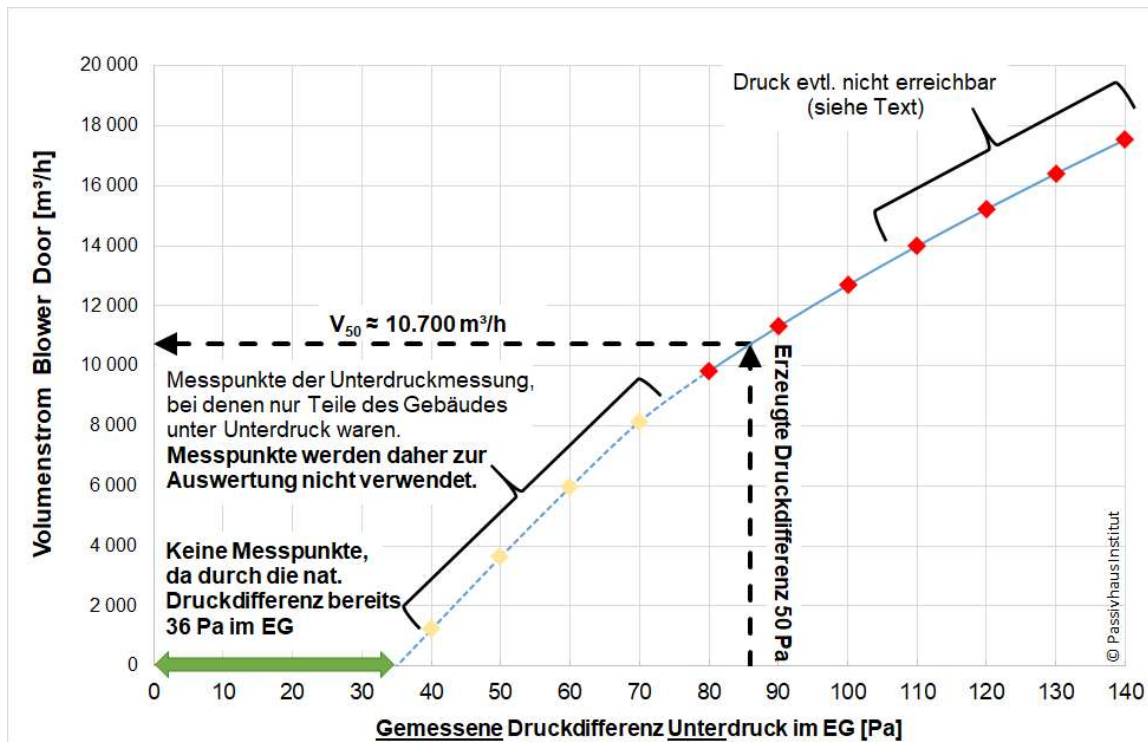


Abbildung 4: Exemplarische Messkurve einer Unterdruckmessung bei dem Beispielhaus aus diesem Abschnitt. Aufgrund der Thermik steht das Gebäude erst ab etwa -72 Pa vollständig unter Unterdruck (gemessen im EG). Daher dürfen die Messpunkte erst ab etwa -80 Pa verwendet werden. Die natürliche Druckdifferenz im EG beträgt -36 Pa, erst bei größerem Unterdruck strömt Luft durch die Blower Door nach außen.

Für derart hohe Drücke sind die Ventilatoren häufig nicht kalibriert. Die Grenzen sind ggf. vom Hersteller zu erfragen bzw. der Anleitung zu entnehmen. In solchem Fall können nur niedrigere Drücke angefahren werden. Für eine aussagekräftige Auswertung kann dies trotzdem ausreichend sein, da für den n_{50} -Wert hauptsächlich Messwerte im Bereich einer erzeugten Druckdifferenz von 50 Pa benötigt werden.

Im Beispiel Abbildung 4 würden dann gemessene Druckdifferenz bis ca. 100 Pa ausreichen.

3. Praktische Hinweise zur Durchführung

Es ist notwendig, dass im gesamten Gebäude annähernd die gleiche Druckdifferenz zwischen innen und außen besteht. Diese Anforderung ist bei einer Hochhausmessung aufgrund der Thermik nicht einzuhalten. In der Norm DIN EN 13829 wurde eine maximale Druckabweichung von 10% gefordert. Mit dem Beispiel wird klar, dass diese Anforderung, überall eine gleichmäßige Druckdifferenz innerhalb der Gebäude-

hülle zu erzeugen, auf keinen Fall einzuhalten ist. Um dennoch eine Hochhausmessung durchführen zu können, leiten sich die unten aufgeführten praktischen Hinweise ab².

1. Der oder die Ventilatoren können in der **Regel alle im EG installiert** werden. Es ist nicht möglich, durch weitere, über die Gebäudehöhe verteilte Ventilatoren die für den Drucktest gewünschte Druckdifferenz in allen Höhen gleichzeitig zu erreichen („ein Raum“). Vom EG können verschiedene Treppenhäuser / Schächte am besten zur Luftverteilung genutzt werden.

Sollten im Gebäude mehrere Bereiche mit nennenswerten Druckverlusten zu überwinden sein (Hintereinander: Tür zum Treppenhaus, Tür zum Geschoss und Tür zur Whg.³), kann es notwendig sein, **mehrere Geräte über die Höhe zu verteilen**. Nur so kann sichergestellt werden, dass sich der Druck ausreichend gut verteilt. Die Regelung erfolgt dann nach der erzeugten Druckdifferenz an einem der Geräte (üblich EG), welches als „Leitstelle“ fungiert .

2. Im EG ist es sinnvoll, nicht nur eine **Messstelle für die Differenzdruck** zu installieren. Es gibt, je nach Gegebenheiten, unterschiedliche Möglichkeiten (siehe Abbildung 5):
 - a) Messungen z.B. mit Kapillarrohr durch die Fensterdichtungen in **unterschiedliche Himmelsrichtungen**. Rechnerische Mittelung der Werte bei der Auswertung.
 - b) Beim Einsatz von **mehreren Geräten** im EG können diese an unterschiedlichen Fassaden positioniert werden. Dann gibt es mehrere Druckdifferenzmessungen außen-innen. Diese können bei der Auswertung gemittelt werden.
3. Es ist mind. eine weitere Messstelle für die Bestimmung der **Druckdifferenz im obersten Geschoss** notwendig (Kapillarrohr durch die Fensterdichtung, siehe Abb. 6). Mit dieser Messung müssen die Druckdifferenzen für alle Druckstufen gemessen und protokolliert werden. Bei nennenswertem **Windeinfluss** ist es ratsam, die Messungen im obersten Geschoss in min. 2 unterschiedliche Himmelsrichtungen durchzuführen. Diese Messung kann herangezogen werden, um die geforderte Druckverteilung im Gebäude nachzuweisen (Erläuterung siehe Abschnitt 4).

² **Anmerkung:** Eine abschnittweise Messung von z.B. jeweils 6-8 Geschossen ist auch eine mögliche Lösung zur Messung von hohen Gebäuden. Dann können diese Messungen analog zu einer normalen Messung durchgeführt werden. Dies setzt aber voraus, dass das Gebäude an den Grenzen der Abschnitte horizontal abgedichtet werden kann (auch Fahrstuhlschacht, Treppenhaus,...). Dies wird im Regelfall mit vertretbarem Aufwand nicht möglich sein.

³ Eine Tür von 2 m² erzeugt bei einem Volumenstrom von 7.000 m³/h einen Druckabfall von weniger als 2 Pa. Werden zwei Gebläse betrieben und es müssen 14.000 m³/h durch die gleiche Öffnung, steigt der Druckabfall bereits auf etwa 6 Pa. Damit wären bei 50 Pa die in der Norm erlaubten 10% Abweichung bereits überschritten. In einem solchen Fall sollte das zweite Gebläse z.B. in einem anderen Raum positioniert werden, welcher ebenfalls über eine Öffnung zum Treppenhaus verfügt.

4. Zur Berechnung der notwendigen Druckdifferenzen ist ein einfaches **Hilfsblatt** (MS Excel) vorhanden, welches zur Einstellung genutzt werden kann.
5. Die **Raumlufttemperatur** in einem Hochhaus ist in der Regel nicht homogen, schon gar nicht während der Bauphase. Daher ist es vorteilhaft die Raumlufttemperatur zumindest im EG und im obersten Geschoss zu messen und zu mitteln.
6. Wenn es technisch umsetzbar ist, kann es hilfreich sein, die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durch langes, **massives Lüften** zu reduzieren (über Nacht, alle Fenster geöffnet). Dieses Vorgehen ist nur zweckmäßig, wenn nicht nur die Luft, sondern auch die Gebäudemassen relevant abgekühlt bzw. aufgewärmt werden.
7. Es ist aufgrund der Thermik davon auszugehen, dass die Werte der **natürlichen Druckdifferenz erheblich höher liegen** als bei Nichthochhäusern.
8. Es müssen zwingend eine **Unter- UND Überdruckmessung** durchgeführt werden. Diese unterscheiden sich ggf. deutlicher als bei kleinen Gebäuden. Nur der Mittelwert ist als Ergebnis nutzbar.
9. Bei **höheren Windstärken** ist damit zu rechnen, dass die Messung nicht zu auswertbaren Ergebnissen führt.
10. Bei der Auswertung großer Gebäude ist es notwendig, immer auch die Hüllfläche zu berechnen (nach ISO 9972), den **hüllflächenbezogenen Leckagewert q_{50}** zu bestimmen und ihn im Protokoll einzutragen.
11. Von der **Unterdruckmessung** dürfen nur die Messpunkte verwendet werden, bei denen im Gesamtgebäude Unterdruck besteht (bei Überdruck entsprechend).
12. Für die Auswertung werden wie üblich die **um den Nulldruck korrigierten Druckdifferenzen** verwendet.
13. Achtung: Bei der Verwendung von **langen Schläuchen**, kann es ggf. lange dauern, bis nach einer automatischen Kalibrierung der Druckdosen die eigentlichen Messwerte wieder erreicht werden. Daher sollte nach einer automatischen Kalibrierung ausreichend lange gewartet werden bis die Werte wieder genutzt werden können.

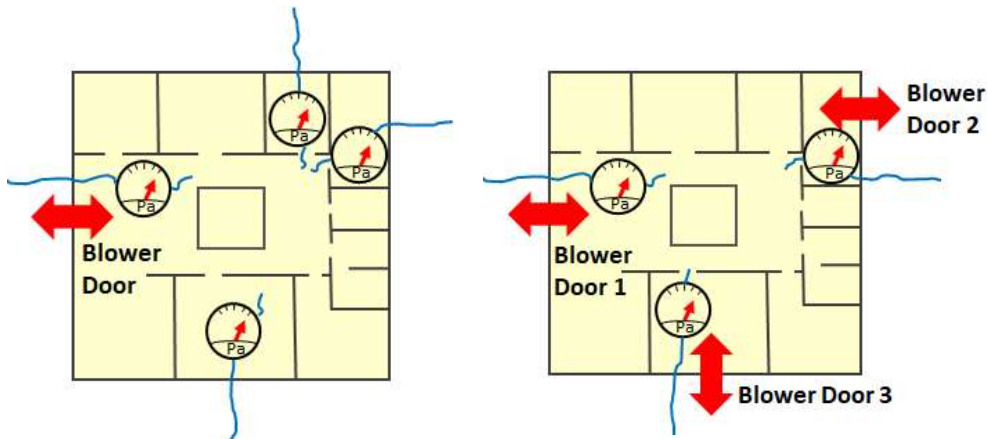


Abbildung 5: Gebäudegrundriss mit unterschiedlichen Möglichkeiten zur Messung der Druckdifferenz außen/innen:

Links: Messungen in vier Himmelsrichtungen mit z.B. Kapillarröhrchen durch die Fensterdichtungen.

Rechts: Messung mit drei Blower Door Geräten. Jedes verfügt über seine eigene integrierte Druckdifferenzmessung innen/außen.



Abbildung 6: Kapillarröhrchen mit Schlauchverbindung zur Druckdifferenzmessung durch eine Fensterdichtung (z.B. für die Messung im obersten Geschoss).

4. Kontrolle der maximalen Abweichung der Druckverteilung

Nach den Normen EN 13829 bzw. ISO 9972 ist bei einer Blower Door Messung dafür zu sorgen, dass das gemessene Gebäude sich bei der Messung wie eine einzelne Zone verhält, d.h. dass die erzeugte Druckdifferenz überall im Gebäude dieselbe ist. DIN EN 13829 forderte (wurde im Dezember 2018 von der ISO 99752 abgelöst), eine maximale Abweichung der gemessenen Druckdifferenzen von 10% einzuhalten. Aufgrund der beschriebenen Einflüsse durch Thermik ist dies - auch bei Windstille - im Regelfall bei Hochhäusern nicht möglich. Sinnvoll ist aber, die erzeugten Druckdifferenzen überall auf 10% genau übereinstimmen.

Eine Kontrolle der gleichmäßigen Druckverteilung im Gebäude kann auch bei Hochhäusern erfolgen. Dafür wird der Einfluss der Thermik berücksichtigt, wobei es zwei unterschiedliche Methoden gibt (siehe Abbildung 7).

4.1 Vorgehen

Messung zwischen Kritischem Raum und Umgebung (siehe Abb. 7, links)

1. Bei der Nulldruckmessung mit geschlossenem Ventilator wird die natürliche Druckdifferenz $p_{nat}(0)$ an der Blower Door (EG) und im obersten Geschoss $p_{nat}(h)$ gemessen und dokumentiert.
2. *Zur Plausibilitätsprüfung kann dieser Wert mit der zu erwartenden natürlichen Druckdifferenz in dieser Höhe (Formel siehe oben) verglichen werden. Mit dieser Differenz über die Gesamthöhe kann die natürliche Druckdifferenz $p_{nat}(h)$ in jeder Höhe des Gebäudes theoretisch berechnet werden (gleichmäßige Leckageverteilung und homogene Temperaturverteilung angenommen).*
3. Soll ein Raum in einer beliebigen Höhe auf Einhaltung der maximalen Abweichung überprüft werden, wird dort zunächst auch die natürliche Druckdifferenz $p_{nat}(h)$ mit Hilfe des Kapillarröhrchens gemessen (bei verschlossenem Gebläse). Danach wird das Gebläse in Betrieb genommen und ein Druckwert im EG eingestellt ($p_{mess}(0)$). Im kritischen Raum in der Höhe h wird dann der Druck innen / außen $p_{mess}(h)$ gemessen.
4. Von dem Messwert $p_{mess}(h)$ im zu untersuchenden Raum wird die natürliche Druckdifferenz, gemessen an derselben Stelle, $p_{nat}(h)$ abgezogen. Davon wird die durch das Gebläse im EG verursachte Druckdifferenz $p_{BD} = p_{mess}(0) - p_{nat}(0)$ abgezogen. Übrig bleibt die Druckabweichung $p_{Abweichung}$, welche 10% von p_{BD} nicht überschreiten sollte.
$$p_{Abweichung} = [p_{mess}(h) - (p_{nat}(h))] - [p_{mess}(0) - p_{nat}(0)].$$
5. Bei dieser Prüfung muss der Windeinfluss auf die Fassade berücksichtigt werden. So kann die Messung im kritischen Raum/Bereich ggf. auf unterschiedlichen Fassaden durchgeführt werden um große Unterschiede auszuschließen (Luv- bzw. Lee-Seite).

Legende:

- $p_{nat}(0)$: Natürliche Druckdifferenz am Einbauort des Gebläses
 $p_{nat}(h)$: Natürliche Druckdifferenz in der Höhe h (Messung mit Kapillarröhrchen)
 $p_{mess}(0)$: Gemessene Druckdifferenz am Einbauort des Gebläses
 $p_{mess}(h)$: Gemessene Druckdifferenz in der Höhe h (Messung mit Kapillarröhrchen)
 p_{BD} : Berechnet sich zu $p_{BD} = p_{mess}(0) - p_{nat}(0)$

4.2 Vorgehen:

Messung der gleichmäßigen Druckverteilung innerhalb des Gebäudes

(siehe Abb. 7, rechts)

Zur Messung der Abweichung der erzeugten Druckdifferenz innerhalb des Gebäudes in z.B. einem „kritischen Raum“:

Verlegung eines Druckschlauches vom EG durch das Treppenhaus in den „kritischen Raum“ (hier z.B. im Dachgeschoss) und Messung der Druckdifferenz zwischen EG und dem DG. Da in dem Schlauch der gleiche Einfluss der Thermik ansteht wie im umgebenden Gebäude, wird die Thermik dabei nicht als Druckdifferenz zwischen oben und unten erfasst. Bei dieser Anordnung wird damit nur die Abweichung der Druckverteilung gemessen. Bei windigem Wetter ist die Methode mit der Innenmessung wesentlich stabiler und besser ablesbar.

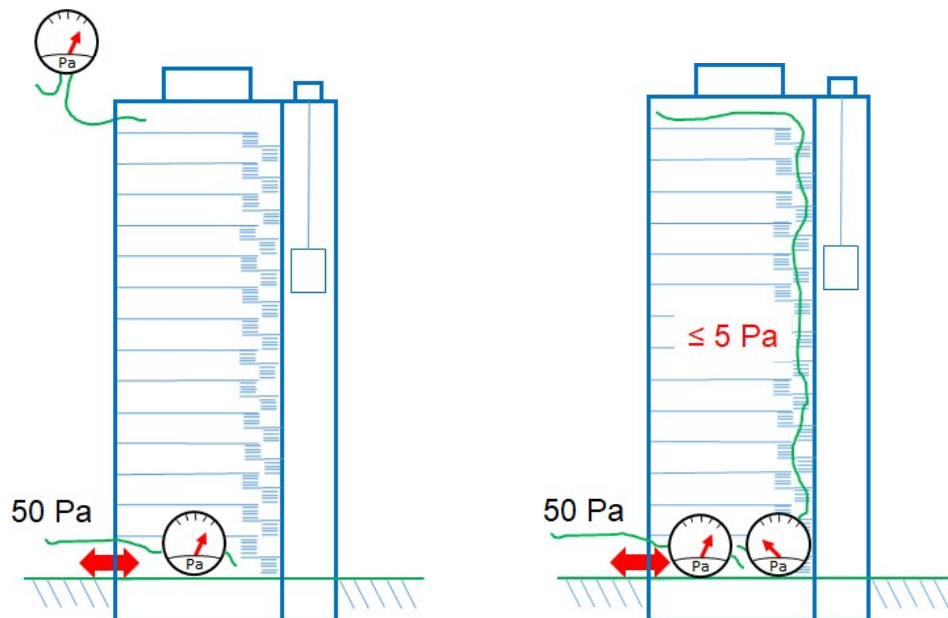


Abbildung 7: Zwei Möglichkeiten zur messtechnischen Prüfung der Druckabweichung im Hochhaus, für ein Beispiel mit der Druckdifferenz innen/außen von 50 Pa im EG.

Im Bild links wird die maximal zulässige Abweichung im „Kritischen Raum“ (hier Beispiel DG) durch Messung der Druckdifferenz zur Umgebung kontrolliert. Dabei muss der Einfluss der Thermik herausgerechnet werden.

Bei der anderen Variante (rechts) wird durch einen Druckschlauch vom EG zum DG (kritischen Raum) die Druckdifferenz im Gebäude erfasst. Da der Schlauch im Gebäudeinneren liegt, ist hier keine Korrektur erforderlich.

5. Messfehler aufgrund der Nichtlinearität der Strömungsformel

Aufgrund der Tatsache, dass bei einem hohen Gebäude der Druck im Gesamtgebäude nicht gleichmäßig hergestellt werden kann, ergeben sich Einflüsse auf den Leckagevolumenstrom. Bei 50 Pa Überdruck im EG werden - im oben genannten Beispiel - die Leckagen im 16. OG mit 122 Pa beaufschlagt. Entsprechend größer wird dort der Leckagevolumenstrom durch Leckagen ausfallen. Bei der Unterdruckmessung ist es entsprechend umgekehrt. Der Leckagevolumenstrom hängt allerdings nicht linear von der Druckdifferenz ab. Nach der Strömungsformel gilt:

$$V_L = C_L \times (dp)^n$$

V_L : Leckagevolumenstrom [m^3/h]

C_L : Leckagekoeffizient [$m^3/(h Pa^n)$]

dp : Druckdifferenz innen-außen [Pa]

n : Strömungsexponent [-]

Eine Leckage wird bei den unterschiedlichen anliegenden Druckdifferenzen der Über- und Unterdruckmessung unterschiedlich stark durchströmt. Dabei wird davon ausgegangen, dass kein dominanter Ventileffekt an den Leckagen auftritt, welcher eine richtungsabhängige Durchströmung verursacht. Aufgrund dieser Nichtlinearität ergibt sich eine Abweichung gegenüber dem Idealfall ohne Temperaturdifferenz zwischen innen und außen.

Solange – wie oben beschrieben – nur Messpunkte zur Auswertung herangezogen werden, für die im gesamten Gebäude Unter- bzw. Überdruck herrscht, ist der entstehende Fehler allerdings nicht relevant gegenüber den übrigen Messfehlern. Damit kann er vernachlässigt werden.

Die Herleitung der Fehlergröße durch die Nichtlinearität des Volumenstromes bei der Durchströmung der Leckagen ist im Anhang dargestellt.

6. Messungen von großen, nicht hohen Häusern

Die beschriebenen Besonderheiten für die Luftdichtheitsmessung gelten für hohe Häuser. Werden Gebäude geprüft, welche lediglich eine große horizontale Ausdehnung haben, wie z.B. Schulen, steht die Thermik nicht im Vordergrund. Dann muss, wie in der Norm gefordert, überprüft werden, ob im drucktechnisch ungünstigsten Raum des Gebäudes die Abweichung vom angelegten Druck nicht mehr als 10% beträgt.

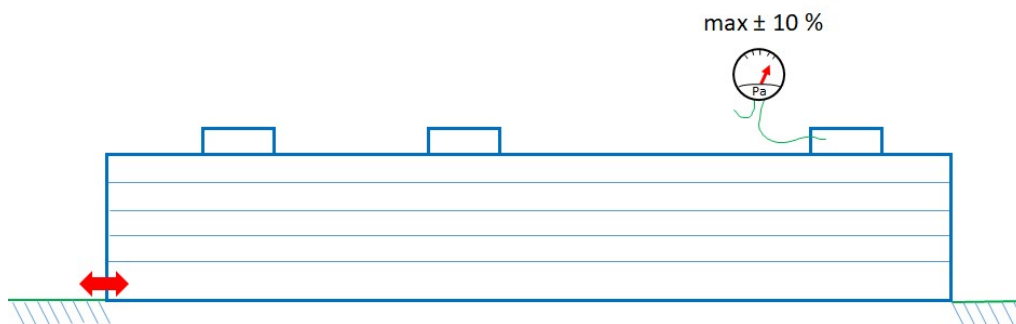


Abbildung 8: Schnitt eines Gebäudes mit großer horizontaler Ausdehnung. Der rote Doppelpfeil soll die Blower Door andeuten. Bei einer solchen Messung muss im drucktechnisch ungünstigsten Raum überprüft werden, ob dort noch min. 90% der erzeugten Druckdifferenz zwischen innen und außen vorhanden sind. Die Thermik spielt hier nur eine untergeordnete Rolle.

7. Quellen

- [Arena/Pratt/Brennan 2017] Arena, Lois; Pratt, Carmel; Brennan, Terry: Whole Building Blower Door Testing Results to Determine Compliance with Passive House Airtightness, Requirements at Cornell NYCTech – H/R Residential. Steven Winter Associates, Inc and Camroden Associates, Inc, Juni 2017
- [Rolfmeier/Simons 2017] Rolfmeier, S.; Simons, P.: Luftdichtheitsmessung in einem großen und hohen Passivhaus (MFH) bei Wind und Thermik. In: Tagungsband der 21. Internationalen Passivhaustagung, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2017
- [Zeller 2012] Zeller, J.: Messung der Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle. In: Fachverband Luftdichtheit im Bauwesen e. V. (Hrsg.), Gebäude-Luftdichtheit. Band 1, zweite aktualisierte Auflage, Berlin: Selbstverlag, 2012

8. Anhang: Einfluss von Nichtlinearitäten auf die Messergebnisse

8.1 Übersicht

In Hochhäusern kann es aufgrund des Kamineffekts zu bedeutenden Druckdifferenzen zwischen innen und außen kommen. Die Unterschiede im statischen Druck können im Winter Bereich von 0,5 bis 1 Pa/m liegen, bei einer Gebäudehöhe von z.B. 100 m kann dadurch im EG und/oder DG eine Druckdifferenz entstehen, die den üblichen Druck von 50 Pa bei Gebäudedichtheitsmessungen übersteigt.

Im Folgenden wird diese Thematik näher beleuchtet.

Wichtig zunächst: Das korrekte Messergebnis, das durch die Messung ermittelt werden soll, ist eindeutig bestimmt. Bei gleicher Temperatur innen und außen sowie Windstille ergibt sich aus dem Drucktest der n_{50} -Wert, mit dem sich die Luftdichtheit des Gebäudes charakterisieren lässt.

8.2 Annahmen und Konventionen

Die hier verwendeten Formelzeichen weichen z.T. vom Haupttext ab. Für die folgenden Herleitungen wird vorausgesetzt:

- Das Gebäude hat eine homogene **Innentemperatur T_i** .
- Das Gebäude besitzt die **Gesamthöhe H** .
- Im Gebäude entsteht während des Drucktests kein relevanter Druckabfall aufgrund von Luftströmungen, es wird behandelt wie ein Raum. Der Einbauort der Blower Door spielt daher keine Rolle. *Zur Orientierung: Ein typisches Gebläse mit 7.000 m³/h verursacht an einer 2 m² großen Türöffnung einen Druckabfall von weniger als 2 Pa. Bei zwei Gebläsen mit zusammen 14.000 m³/h steigt der Druckabfall bereits auf etwa 6 Pa. Dann wäre es notwendig, dass zweite Gebläse anderswo im Gebäude einzubauen.*
- Die Windgeschwindigkeit ist vernachlässigbar klein.
- Die Leckagen sind von gleicher Art und gleichmäßig über die Höhe des Gebäudes verteilt. Insbesondere gibt es keine relevanten Leckagen im Bereich des Daches oder der Bodenplatte.
- Überdruck im Gebäude wird positiv gerechnet.
- Die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen wird positiv gerechnet, falls die Innentemperatur höher ist als die Außentemperatur.
- Der Volumenstrom durch die Leckagen hängt von der Druckdifferenz ab gemäß

$$\dot{V} = c(\Delta p)^n \text{ mit } 0,5 < n < 1$$

Positive Werte bezeichnen demnach eine Luftströmung von innen nach außen durch die Leckagen, bzw. von außen nach innen an der Blower Door.

Die Druckdifferenz zwischen innen und außen wird während der Messung in der Höhe h_p über Grund gemessen. Dieser **Messwert der Druckdifferenz** wird mit Δp_0 bezeichnet.

8.3 Luftwechsel während der Messung

Die statische Druckdifferenz zwischen innen und außen wächst mit der Höhe gemäß

$$\Delta p = \rho g \frac{\Delta T}{293 \text{ K}} \Delta h$$

bzw.

$$\Delta p = 0,04 \frac{\text{Pa}}{\text{K m}} \Delta h \Delta T$$

Bei einer **Temperaturdifferenz ΔT** von 20 K ergeben sich beispielsweise ca. 0,8 Pa/m. Den **Druckanstieg pro Meter** bezeichnen wir nachfolgend mit $\frac{dp}{dh}$.

Die Druckdifferenz über die Gebäudehülle beträgt somit

$$\Delta p(h) = \Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh}$$

Hängt die Druckdifferenz nicht von der Höhe ab, gilt für den Drucktestluftwechsel der bekannte Zusammenhang

$$n_{mess} = n_{50} \left(\frac{\Delta p}{50 \text{ Pa}} \right)^n$$

mit $0,5 \leq n \leq 1$. Dieser lässt sich auch pro Meter Gebäudehöhe angeben, wobei die Druckdifferenz von der Höhe abhängen kann. Man erhält einen differentiellen Beitrag zum Exfiltrationsluftwechsel in der Höhe h über Grund:

$$n'(h) := \frac{n_{50}}{H} \left(\frac{\Delta p(h)}{50 \text{ Pa}} \right)^n \quad \text{für } \Delta p(h) > 0$$

$$n'(h) := -\frac{n_{50}}{H} \left(\frac{-\Delta p(h)}{50 \text{ Pa}} \right)^n \quad \text{für } \Delta p(h) < 0$$

Dann beträgt der an der Blower Door insgesamt gemessene Luftwechsel

$$n_{mess} = \int_0^H n'(h) dh$$

Sind die Leckagen wie vorausgesetzt gleichmäßig verteilt, gilt für die **Höhe h_0 der druckneutralen Ebene**

$$0 = \Delta p_0 + (h_0 - h_p) \frac{dp}{dh}$$

und somit

$$h_0 = h_p - \frac{\Delta p_0}{\frac{dp}{dh}}$$

Dies gilt auch bei Betrieb der Blower Door. Auch während der Messung kann sich die druckneutrale Ebene u.U. innerhalb des Gebäudes befinden, d.h. ein Teil des Gebäudes (für $\Delta T > 0$ der obere) steht unter Überdruck, der andere unter Unterdruck.

Wir betrachten im Folgenden nur den häufigeren Fall $\Delta T > 0$. Damit ist auch $\frac{dp}{dh} > 0$.

Für den gemessenen Volumenstrom bei Betrieb der Blower Door sind dennoch mehrere Fälle zu unterscheiden:

a) $0 < h_0 < H$

$$\begin{aligned}
 n_{mess} &= - \int_0^{h_0} \frac{n_{50}}{H} \left(\frac{-(\Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh})}{50 Pa} \right)^n dh + \int_{h_0}^H \frac{n_{50}}{H} \left(\frac{\Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^n dh \\
 &= \left[\frac{n_{50} 50 Pa}{H(n+1) \frac{dp}{dh}} \left(\frac{-(\Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh})}{50 Pa} \right)^{n+1} \right]_0^{h_0} \\
 &\quad + \left[\frac{n_{50} 50 Pa}{H(n+1) \frac{dp}{dh}} \left(\frac{\Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^{n+1} \right]_{h_0}^H \\
 &= \frac{n_{50} 50 Pa}{H(n+1) \frac{dp}{dh}} \left\{ \left(\frac{-(\Delta p_0 + (h_0 - h_p) \frac{dp}{dh})}{50 Pa} \right)^{n+1} - \left(\frac{-(\Delta p_0 - h_p \frac{dp}{dh})}{50 Pa} \right)^{n+1} \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{\Delta p_0 + (H - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^{n+1} - \left(\frac{\Delta p_0 + (h_0 - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^{n+1} \right\}
 \end{aligned}$$

Wegen

$$0 = \Delta p_0 + (h_0 - h_p) \frac{dp}{dh}$$

vereinfacht sich dieser Ausdruck zu

$$n_{mess} = \frac{n_{50} 50 Pa}{H(n+1) \frac{dp}{dh}} \left\{ \left(\frac{\Delta p_0 + (H - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^{n+1} - \left(\frac{-(\Delta p_0 - h_p \frac{dp}{dh})}{50 Pa} \right)^{n+1} \right\}$$

b) $h_0 < 0$. Es herrscht überall im Gebäude Überdruck, der erste Summand im Integral unter a) entfällt. Es bleibt

$$\begin{aligned}
 n_{mess} &= \int_0^H \frac{n_{50}}{H} \left(\frac{\Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^n dh \\
 &= \frac{n_{50} 50 Pa}{H(n+1) \frac{dp}{dh}} \left\{ \left(\frac{\Delta p_0 + (H - h_p) \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^{n+1} - \left(\frac{\Delta p_0 - h_p \frac{dp}{dh}}{50 Pa} \right)^{n+1} \right\}
 \end{aligned}$$

c) $h_0 > H$. Es herrscht überall im Gebäude Unterdruck, der zweite Summand entfällt. Es bleibt

$$n_{mess} = - \int_0^H \frac{n_{50}}{H} \left(\frac{-\left(\Delta p_0 + (h - h_p) \frac{dp}{dh}\right)}{50 \text{ Pa}} \right)^n dh$$

$$= \frac{n_{50} 50 \text{ Pa}}{H(n+1) \frac{dp}{dh}} \left\{ \left(\frac{-\left(\Delta p_0 + (H - h_p) \frac{dp}{dh}\right)}{50 \text{ Pa}} \right)^{n+1} - \left(\frac{-\left(\Delta p_0 - h_p \frac{dp}{dh}\right)}{50 \text{ Pa}} \right)^{n+1} \right\}$$

8.4 Korrekturrechnung

8.4.1 Berechnung von n_{50}

Die Ergebnisse für n_{mess} unter a), b) und c) enthalten den gesuchten Wert für n_{50} lediglich als Faktor. Die Auflösung nach n_{50} ist daher trivial. Im Prinzip wäre eine Korrekturrechnung für alle denkbaren Drücke möglich; da jedoch die für die Herleitung getroffenen Annahmen in der Praxis meist nicht zutreffen werden, wird hiervon abgeraten. Die Anwendung für das folgende Beispiel zeigt außerdem, dass die sich ergebenden Korrekturen von vernachlässigbarer Größe sind, sofern man den oben gegebenen Empfehlungen zur praktischen Durchführung der Auswertung folgt.

8.4.2 Beispiel

Gemessen wird ein Hochhaus, 100 m hoch, $dp/dh = 0,7 \text{ Pa/m}$, $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$, Exponent $n = 0,66$. Die Blower Door wird im EG eingebaut, dort findet auch die Druckdifferenzmessung statt.

Der Nulldruck bei verschlossener Blower Door ergibt sich zu -35 Pa . Die gemessenen Volumenströme weichen bei Überdruck und Unterdruck extrem voneinander ab:

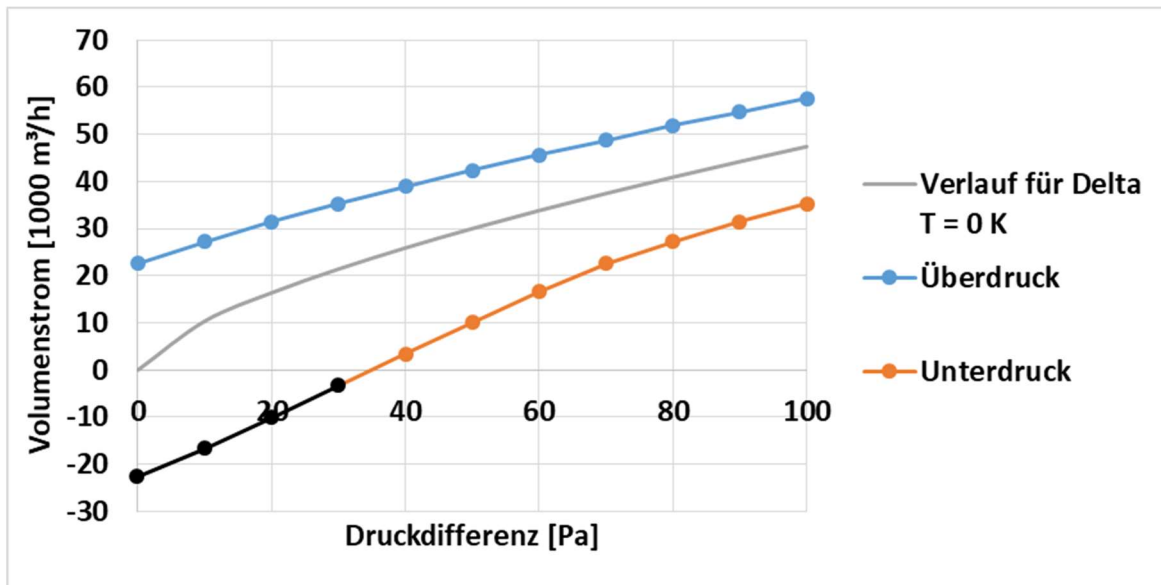


Abbildung 9: Gemessener Volumenstrom und gemessene Druckdifferenz, falls Blower-Door-Einbau und Messung im EG stattfinden. Da der Nulldruck schon -35 Pa beträgt, müsste die Blower Door für geringere Unterdrücke sogar Luft ins Gebäude hinein fördern (schwarze Punkte).

Wenn die aufgetragene Druckdifferenz dagegen wie in Abbildung 10 um den Nulldruck korrigiert wird, lässt sich die Messung unmittelbar auswerten. Gemäß der obigen Berechnung gibt es gewisse Abweichungen von dem Verlauf, der sich ohne Temperaturdifferenz zwischen innen und außen ergeben würde ("Delta T = 0 K"), die aber für die Bewertung der Gebäudedichtheit unbedeutend sind. Voraussetzung ist, dass das Gebäude komplett unter Unter- bzw. Überdruck steht; hier ist das ab 35 Pa der Fall.

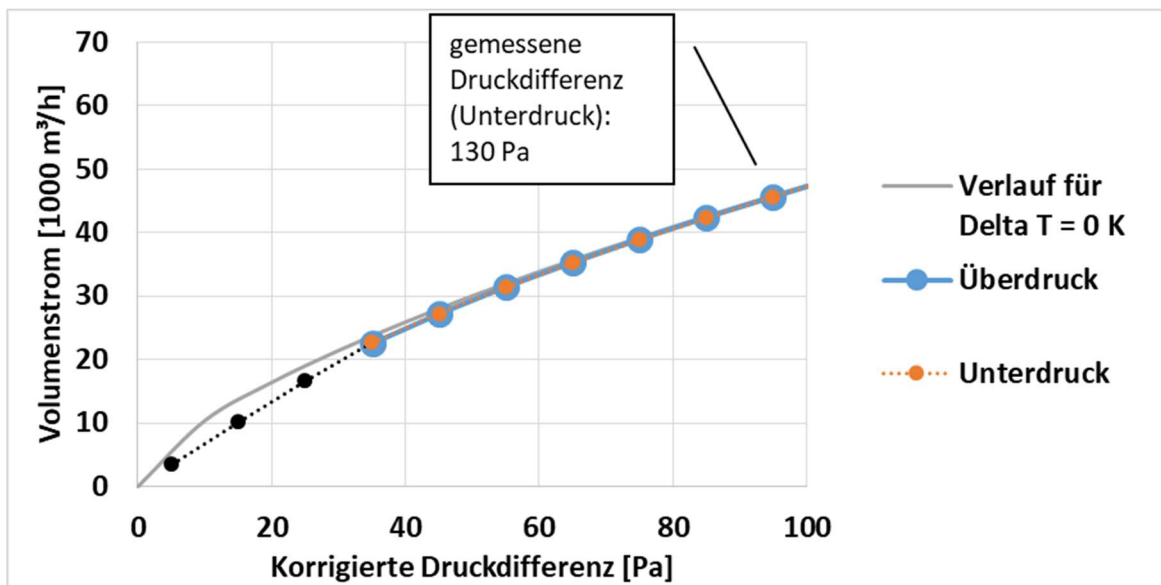


Abbildung 10: Messung wie in Abbildung 6, die Druckdifferenz ist um den Nulldruck korrigiert. Liegt die korrigierte Druckdifferenz unter 35 Pa, herrscht im Gebäude gleichzeitig Unter- und Überdruck (schwarze Punkte).

Während der Messung ist zu beachten, dass ausreichend hohe Druckdifferenzen für die spätere Auswertung erzeugt werden. Um beispielsweise die in Abbildung 10 dargestellten Punkte zu messen, müssen bei der Unterdruckmessung bis zu 130 Pa erzeugt werden.

Bei größeren Gebäudehöhen und Temperaturdifferenzen kann der Messpunkt mit 50 Pa (korrigiertem) Über- bzw. Unterdruck u.U. gar nicht verwendet werden, weil damit noch kein vollständiger Unter- bzw. Überdruck im Gebäude erzielt werden kann. In diesem Fall müssen die auswertbaren Messpunkte extrapoliert werden, um n_{50} zu ermitteln.