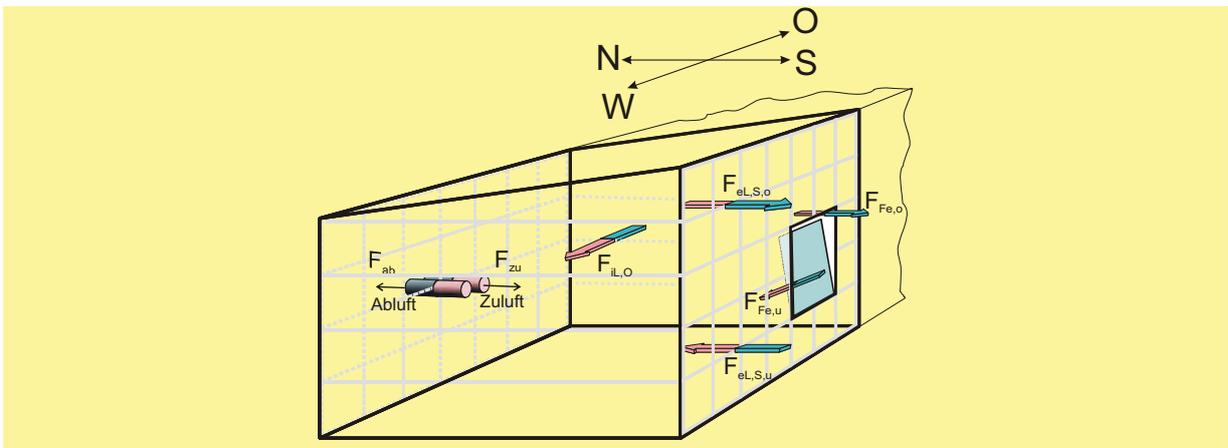


Forschungsprojekt

**Entwicklung energieeffizienter Komfortlüftungsanlagen mit luftqualitätsge-
führter Volumenstromregelung und kontinuierlicher Erfassung des
Fensteröffnungszustandes**



Teilbericht 2

Theoretische Untersuchungen zur Druckdifferenz-Methode

Gefördert durch

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
(über Projektträger Jülich; Förderkennzeichen: 0327398A)

Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Rheinstraße 65; 64295 Darmstadt

Mai 2011

Autoren

Jens Knissel, Marc Großklos

Institut Wohnen und Umwelt, Rheinstraße 65, 64295 Darmstadt

Johannes Werner

Ingenieurbüro ebök, Schellingstr. 4/2, 72072 Tübingen

Reprotechnik: Reda Hatteh

ISBN 978-3-941140-19-6

IWU-Bestellnummer: 03/11

Institut Wohnen und Umwelt

Rheinstraße 65

64295 Darmstadt

www.iwu.de

Inhaltsverzeichnis

1	HINTERGRUND UND AUFGABENSTELLUNG	1
1.1	Prinzipieller Ansatz der Drd-Methode	3
2	BERECHNUNGSMODELL FÜR DIE LUFTSTRÖMUNGEN ÜBER DIE GEBÄUDEHÜLLE	6
2.1	Volumenstrom über ein gekipptes Fenster	9
2.2	Berechnung der treibenden Druckdifferenzen	10
2.2.1	Winddruck	13
2.2.2	Auftriebsdruck	13
2.2.3	Innendruck im Gebäude	14
2.3	Überprüfen des Berechnungsansatzes	15
2.3.1	Abbilden der Undichtigkeiten der Gebäudehülle	16
2.3.2	Lokale Verteilung der Leckagen	17
2.3.3	Abbilden der Lüftungsanlage	20
2.3.4	Abbilden des Fensters	22
2.3.5	Vergleich der Berechnung mit Messungen	22
3	EINSATZRANDBEDINGUNGEN DRD-METHODE	26
3.1	In Parameterstudie verwendetes Gebäude	26
3.2	Grenzdruckdifferenz / Mindestdruckdifferenz	29
3.3	Dichtheit der Gebäudehülle	29
3.4	Außenklima	32
3.5	Luftvolumenstrom der Lüftungsanlage	35

3.6	Lage von Fortluftdurchlass und Außenluftansaugung	37
3.7	Automatische Verschlussklappen	38
3.8	Unterschiedliche Referenzzustände	39
3.9	Referenzdruck bei abgeschalteter Lüftungsanlage	41
3.10	Testsequenz mit Überdruck	42
3.11	Zusammenfassende Bewertung	44
4	EINSATZRANDBEDINGUNGEN DRD-METHODE BEI ABLUFTANLAGEN	46
5	DRD-METHODE UND VERBRENNUNGSLUFTVERSORGUNG VON FEUERSTÄTTEN	49
5.1	Verbrennungsluftversorgung	49
5.1.1	Musterbauordnung	50
5.1.2	Hessische Landesbauordnung	50
5.1.3	DVGW TRGI	51
5.1.4	Bauaufsichtliche Richtlinie über Lüftung fensterloser Küchen, Bäder und Toilettenräume	52
5.1.5	DIN 18017-3: Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster mit Ventilatoren	52
5.1.6	DIN 1946-6:1998-10: Lüftung von Wohnungen	52
5.1.7	Entwurf DIN 1946-6 vom Dezember 2006	53
5.1.8	DIN 1946-6:2009-05: Lüftung von Wohnungen	53
5.1.9	Merkblatt der Schornsteinfegerinnung	54
5.2	Funktionale Betrachtung und Bewertung der Regelungen	54
5.2.1	Allgemeiner Grenzwert 8 Pa Unterdruck	55
5.2.2	Grenzwert 4 Pa Unterdruck in Gebäuden mit Schornstein	55
5.2.3	Zulässige Gebäudedichtheit	56
5.2.4	Einfluss von Disbalance auf den Differenzdruck	57
5.2.5	Bewertung von Überdruck in Gebäuden	58

6	REAKTIONEN DER LÜFTUNGSANLAGE	59
6.1	Automatisches Anpassen des Volumenstroms	59
6.2	Nutzerinformation (Feedback)	65
6.2.1	Bewertungsgröße für die Fensteröffnungshäufigkeit	66
6.2.2	Bewertungsskala	69
6.2.3	Zusätzlicher Heizwärmebedarf und zusätzliche Heizkosten	71
6.2.4	Beispiel für gemessenes Fensteröffnungsverhaltens	74
7	WEITERE ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN DER DRD-METHODE	77
7.1	Luftmassenbilanz der Lüftungsanlage	77
7.1.1	Einfluss des Wetters auf die Luftmassenbilanz	77
7.1.2	Einfluss der Disbalancen auf die Lüftungswärmeverluste	79
7.1.3	Bisherige Verfahren zur Einhaltung der Massenstromkonstanz	80
7.1.4	Massenstromabgleich über die Drd-Methode	81
7.1.5	Einfluss von Messfehlern auf den Drd-Luftmassenabgleich	82
7.1.6	Bewertung	84
7.2	Überprüfen der Fensterstellung beim Verlassen des Gebäudes	85
7.3	Sichern eines Mindestluftwechsels	85
7.4	Erkennen des Betriebs von Abluft-Dunstabzugshauben bzw. Abluft-Wäschetrocknern	86
8	LITERATUR	88

1 Hintergrund und Aufgabenstellung

In energieeffizienten Gebäuden mit mechanischen Lüftungsanlagen und Wärmerückgewinnung (z.B. Passivhäusern) können die Lüftungswärmeverluste des Gebäudes wesentlich durch zusätzlich geöffnete Fenster beeinflusst werden. Hierdurch kann ein nennenswerter Anstieg des Heizenergiebedarfs hervorgerufen werden [Ebel et al. 2003].

Diese Tatsache führt in der öffentlichen Diskussion häufig zu der Schlussfolgerung, dass in energieeffizienten Gebäuden/Passivhäusern die Fenster nicht geöffnet werden dürfen. Die Aussage ist in dieser Absolutheit jedoch nicht richtig. Im Gegenteil ist es bei höheren Außentemperaturen unproblematisch bzw. gewünscht, über die Fenster zu lüften. Im Sommer kann die Lüftungsanlage sogar abgeschaltet bzw. der Volumenstrom reduziert werden. Die Anforderung an möglichst geringe Fensteröffnungszeiten bezieht sich also nur auf den Winter bzw. auf Zeiten mit geringen Außentemperaturen. Bei niedrigen Außentemperaturen die Fenster geschlossen zu halten entspricht dem natürlichen Fensterlüftungsverhalten der Bewohner [Ebel et al. 2003]. In Gebäuden mit mechanischen Lüftungsanlagen ist dies ohne eine unzulässige Verschlechterung der Luftqualität möglich, da die mechanischen Lüftungsanlagen für die erforderliche Außenluftzufuhr sorgen.

Die energetische Relevanz von geöffneten Fenstern ist also von der jeweiligen Außentemperatur abhängig. Für einen Laien ist dieser Zusammenhang nur schwer nachzuvollziehen, bzw. in seinem täglichen Fensteröffnungsverhalten zu berücksichtigen. Dies kann zu Verunsicherungen und zu einer Skepsis gegenüber mechanischen Lüftungsanlagen führen.

Ziel dieses Teilaspektes des Forschungsvorhabens ist es, den Bewohnern eine bewertete Rückmeldung ihres Fensteröffnungsverhaltens zu geben. Über eine einfache Ampelanzeige wird dargestellt, ob die Fensteröffnungshäufigkeit unter energetischen Gesichtspunkten im „grünen“, „gelben“ oder „roten“ Bereich liegt. Diese Anzeige soll einerseits einer Verunsicherung der Bewohner in Bezug auf die Zulässigkeit der Fensteröffnung entgegenwirken, andererseits die Nutzer dahingehend beeinflussen, dass sie bei niedrigen Außentemperaturen die Fenster überwiegend geschlossen halten.

Der Erfolg von Feedback-Strategien in Bezug auf eine Verhaltensänderung ist aus verschiedenen Bereichen bekannt. So wurde z. B. in [Flade et al. 2003] die Feedback-Methode erfolgreich bei der Energieeinsparung beim Haushaltsstrom in Wohngebäuden eingesetzt. Da die Information zur Fensteröffnung in der Regel nicht verfügbar ist, werden Feedback-Methoden zur Beeinflussung des Fensteröffnungsverhaltens derzeit noch nicht eingesetzt.

Bisher kann die Fensteröffnung nur über Fensterkontakte identifiziert werden. Der Einbau der Kontakte und die Übermittlung der Information an eine zentrale Auswerteeinheit sind jedoch aufwändig. Entsprechend werden diese Systeme in der Regel nur in Modellprojekten eingesetzt. Vor diesem Hintergrund wurde in dem Forschungsprojekt „Wohnen in Niedrigenergie- und Passivhäusern“ [Ebel et al. 2003] ein Verfahren entwickelt, mit dem die Öffnungsstellung der Fenster eines Gebäudes mit hoher Genauigkeit über die Lüftungsanlage kontinuierlich

ermittelt werden kann [Großklos 2002]. Hierzu werden in regelmäßigen Abständen von der Lüftungsanlage Testsequenzen durchfahren, in denen die Zu- und Abluftvolumenströme modifiziert werden. Durch die Messung der sich aufbauenden Druckdifferenzen konnten in [Großklos 2002] mit einer Sicherheit von über 99 % Aussagen über den Fensteröffnungszustand einer Passivhauswohneinheit gemacht werden.

Die folgende Abbildung zeigt Messergebnisse aus diesem Forschungsprojekt. Dargestellt ist die Fensteröffnungsdauer pro Tag, ermittelt zum einen über die Drd-Methode und zum andern über Fensterkontakte.

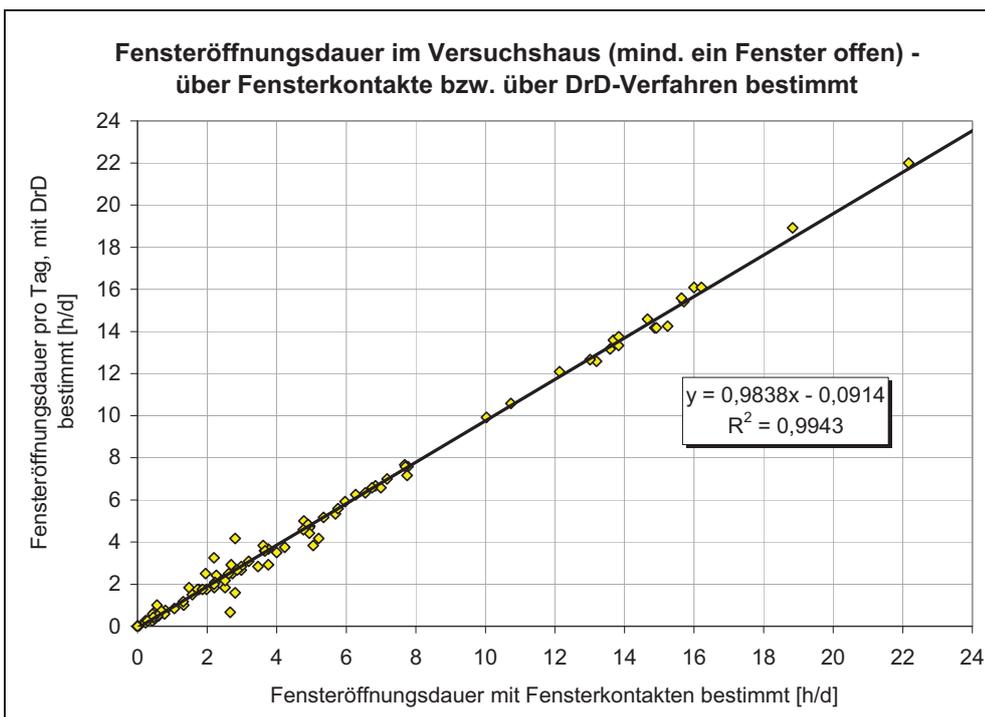


Abb. 1-1: Fensteröffnungsdauer ermittelt über Fensterkontakte und die Drd-Methode entsprechend Messdaten aus [Großklos 2002]

Die Messungen in Wiesbaden-Dotzheim [Großklos 2002] zeigen, dass die Drd-Methode in Passivhäusern mit hoher Dichtheit (gegen Außenluft und Nachbarwohneinheiten) mit hoher Zuverlässigkeit geöffnete Fenster identifizieren kann. Damit ist die prinzipielle Eignung der Druckdifferenzmethode belegt.

In diesem Forschungsprojekt soll die Ermittlung der Fensteröffnungsstellung über die Drd-Methode weiter entwickelt werden. So werden im vorliegenden Teilbericht 2 theoretischen Untersuchungen zum Einsatzbedingungen der DrD-Methode durchgeführt. Geklärt werden hierdurch insbesondere Fragen der erforderlichen Gebäudedichtheit und der anlagentechnischen Eigenschaften. Anhand eines Berechnungsmodells wird im Rahmen einer Parameter-

studie der Einfluss unterschiedlicher Gebäudeparameter betrachtet und damit Aussagen zu den Einsatzgebieten getroffen.

1.1 Prinzipieller Ansatz der Drd-Methode

Der Ansatz der **Druckdifferenz-Methode** – im Folgenden mit Drd-Methode abgekürzt – geht von der These aus, dass der Unterdruck, der sich in einem Gebäude nach Abschalten des Zu-
luftventilators einstellt, unterschiedlich sein wird, je nachdem, ob alle Fenster geschlossen
oder mindestens ein Fenster geöffnet ist. Aus dem sich einstellenden Unterdruck kann also
auf die Fensteröffnungsstellung (zu – auf) geschlossen werden. Dabei wird eine mechani-
schen Zu- und Abluftanlage unterstellt.

Um die Fensteröffnung zu bestimmen, wird in regelmäßigen Abständen eine Testsequenz
durchfahren. Diese wird im Folgenden kurz erläutert, wobei zunächst von der Sequenz ausge-
gangen wird, wie sie in [Großkloß 2002] realisiert wurde. In Abschnitt 3 werden weitere mög-
liche Ausprägungen der Testsequenz untersucht.



Abb. 1-2: Prinzipielle Darstellung der im Rahmen der Drd-Methode ermittelte Druckdifferenz von Gebäudeinnendruck und Außendruck

Um den Fensteröffnungszustand festzustellen wird die Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnendruck (Innenmessstelle) und einem Außendruck (Außenmessstelle) gemessen. Diese Druckdifferenz (im Weiteren wird vereinfacht nur vom Gebäudeinnendruck gesprochen) wird für zwei Betriebszustände der Lüftungsanlage bestimmt:

1. Normalbetrieb - Anlage abgeglichen: Im Normalbetrieb wird über die Lüftungsanlage (Zu- und Abluftanlage wird vorausgesetzt) genauso viel Luft in das Gebäude hinein transportiert wie hinaus befördert wird. Dies wird als abgeglichener Betriebszustand bezeichnet. In dem Fall wird der Druck im Gebäude lediglich durch das aktuelle Wetter (Außentemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung) beeinflusst. Der Gebäudeinnendruck (gegenüber der Außenmessstelle) im Normalbetrieb wird als **Referenzdruck** bezeichnet.
2. Testsequenz - Zuluftventilator abgeschaltet: In Rahmen der Testsequenz wird der Zuluftventilator abgeschaltet. Da nun von der Lüftungsanlage nur noch Luft aus dem Gebäude hinaus transportiert wird, wird sich ein leichter Unterdruck aufbauen. Dieser

Unterdruck (gegenüber Außenmessstelle) wird gemessen. Er wird als **Testdruck** bezeichnet. Sofern erforderlich, kann die Leistung des Abluftventilators im Rahmen der Testsequenz bis auf den Maximalwert angehoben werden.

Zur Ermittlung des Fensteröffnungszustands wird die Differenz zwischen Referenz- und Testdruck gebildet. Diese wird im Folgenden als „Druckdifferenz“ oder „Änderung des Innendrucks im Gebäude“ bezeichnet.

$$\text{Referenzdruck} - \text{Testdruck} = \text{Druckdifferenz} \\ \text{(oder Änderung des Innendrucks im Gebäude)}$$

Liegt die Änderung des Innendrucks im Gebäude durch das Abschalten des Ventilators über einer bestimmten Grenzdruckdifferenz Δp_{Grenz} , wird davon ausgegangen, dass alle Fenster geschlossen sind. Wird die Grenzdruckdifferenz nicht erreicht, wird unterstellt, dass zumindest ein Fenster offen ist.

$$| \text{Referenzdruck} - \text{Testdruck} | \geq \Delta p_{Grenz} \rightarrow \text{alle Fenster geschlossen.}$$

2 Berechnungsmodell für die Luftströmungen über die Gebäudehülle

Um die Einsatzrandbedingungen für die Drd-Methode über den messtechnisch untersuchten Fall hinaus einschätzen zu können, ist es erforderlich, die Luftströmungen über die Gebäudehülle und die Druckverhältnisse in Form eines einfachen mathematischen Modells abzubilden. Mit dem Modell soll die Anwendbarkeit der Drd-Methode unter unterschiedlichen Randbedingungen untersucht werden.

Die an einem Gebäude auftretenden Strömungs- und Druckverhältnisse sind komplex. Sie hängen u. a. ab von

- Wind und thermischem Auftrieb
- der Dichtheit der Gebäudehülle und der Leckageverteilung
- der Fensterstellung (geschlossen, gekippt)
- dem Betriebsverhalten der Lüftungsanlage (Ventilator + Kanalnetz)
- dem Strömungswiderstand innerhalb des Gebäudes durch Innentüren.

Um den Druck im Gebäude bei unterschiedlichen Randbedingungen abschätzen zu können, wird ein mathematisches Modell erstellt, welches die in Abb. 2-1 als Prinzipskizze dargestellten Volumenströme bzw. Leckagen ermittelt und bilanziert.

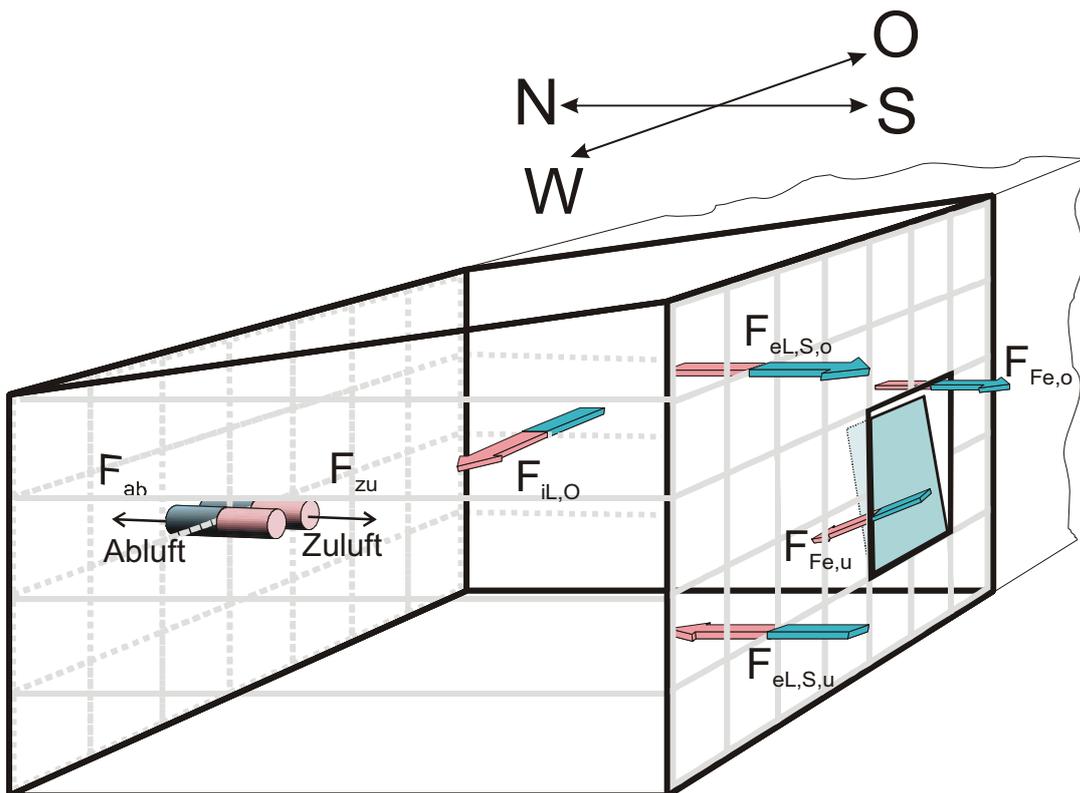


Abb. 2-1: Prinzipskizze des verwendeten Strömungsmodells

Berücksichtigt werden bei der Berechnung:

- Externe Leckagen: Undichtheiten in der Gebäudehülle gegen Umgebung: abgebildet über je zwei Undichtheiten pro Fassade (Orientierung x) in unterschiedlicher Höhe ($F_{eL;x,o}$ und $F_{eL;x,u}$)
- Interne Leckagen: Undichtheiten zur Nachbarwohneinheit: abgebildet durch eine Undichtheit $F_{iL,x}$
- Gekipptes Fenster: abgebildet über zwei Undichtheiten in unterschiedlicher Höhe $F_{Fe,o}$ und $F_{Fe,u}$
- Die Lüftungsanlage: Zuluft- und Abluftkanalnetz werden ebenfalls als Leckagen F_{Zu} , F_{Ab} abgebildet, wobei bei der treibenden Druckdifferenz der Ventilator mit berücksichtigt wird.

Es wird angenommen, dass in der horizontalen Ebene keine Druckunterschiede im Gebäude auftreten. In vertikaler Richtung wird der statische Innendruck p_i durch den thermischen Auftriebsdruck überlagert. Nicht berücksichtigt werden kann damit der Einfluss von Strömungswiderständen innerhalb des Gebäudes und die lokale Druckverteilung im Gebäude. Nach [Baumgartner 1989] führt der Ansatz eines Einzonenmodells in Wohngebäuden jedoch zu befriedigenden Ergebnissen.

Bilanziert in dem Modell werden die Volumenströme, die über Gebäudehülle in das Gebäude hinein- oder hinaustreten. Die physikalischen Zusammenhänge und deren mathematische Beschreibung wurden in [Baumgartner 1989] zusammengefasst. Die dort aufgeführten Ansätze sind Grundlage für die hier durchgeführten Berechnungen.

Der Volumenstrom über die Öffnungen/Leckagen in der Fassade wird über den so genannten Potenzansatz berechnet. Dieser ermöglicht es, die außerordentlich komplexen Strömungsvorgänge an Öffnungen in der Gebäudehülle vereinfacht zu beschreiben. Der Volumenstrom ergibt sich bei dem Potenzansatz zu

$$\text{Gl. 2-1} \quad \dot{V} = k \cdot (\Delta p)^n$$

mit

k Durchflusskoeffizient der Leckage

n Strömungsexponent der Leckage

Δp Druckdifferenz

Für sehr enge Ritzen und Spalten und relativ lange Strömungswege ist die Strömung im Wesentlichen laminar. Der Strömungsexponent nimmt den Wert $n=1$ an. Bei großen Öffnungen, so z. B. auch bei Fenstern, ist die Strömung in der Regel turbulent und es ergibt sich ein Strömungsexponent von $n=0,5$. Reale Undichtheiten in der Gebäudehülle stellen üblicherweise eine Kombination von beidem dar. Häufig wird zur Abbildung von Undichtheiten in der Gebäudehülle ein Strömungsexponent von $n=0,67$ verwendet.

Die Massenbilanz der zu- und abgeführten Luftmassen über alle Öffnungen der Gebäudehülle muss Null sein.

$$\text{Gl. 2-2} \quad 0 = \sum_{j=1}^m \rho_j \cdot \dot{V}_j$$

mit

ρ Dichte der Luft vor Eintritt in die Öffnung [kg/m^3]

\dot{V} Volumenstrom

Wird der Potenzansatz nach Gl. 2-1 in Gl. 2-2 eingesetzt, ergibt sich die Massenbilanz zu

$$\text{Gl. 2-3} \quad 0 = \sum_{j=1}^m \rho_j \cdot k_j \cdot |\Delta p_j|^{n_j} \cdot \sigma$$

mit

Δp_j Druckdifferenz an der j-ten Öffnung

Der Faktor σ am Ende von Gl. 2-3 stellt das Vorzeichen wieder her, das durch die Verwendung des Absolutbetrages im voran stehenden Potenzausdruck verloren gegangen ist. Er berechnet sich zu

$$\text{Gl. 2-4} \quad \sigma = \frac{\Delta p_j}{|\Delta p_j|}$$

Die Vorzeichenkonvention für die Massen- bzw. Volumenströme ist dabei wie folgt:

- aus dem Gebäude austretender Massenstrom: positives Vorzeichen
- in das Gebäude eintretender Massenstrom: negatives Vorzeichen.

Durch Iteration kann ein Wert für den Innendruck gefunden werden, für den Gl. 2-3 erfüllt ist. In Excel wird dafür der „Solver“ verwendet.

Für die Erstellung der Luftbilanz ist es notwendig, die Luftmassenströme durch

- Undichtheiten,
- Fenster
- und Lüftungsanlage

abzubilden. Für die Undichtheiten und die Lüftungsanlage wird der Potenzansatz nach Gl. 2-1 direkt verwendet. Die Ermittlung von Durchflusskoeffizient und Strömungsexponent wird in Abschnitt 2.3.5 beschrieben. Der Volumenstrom über ein gekipptes Fenster wird über den in [Ebel et al. 2003] beschriebenen Ansatz abgebildet. Die wesentlichen Gleichungen werden im Folgenden dargestellt.

2.1 Volumenstrom über ein gekipptes Fenster

Das Fenster wird zur Ermittlung der auftretenden Volumenströme durch zwei gleichgroße Öffnungsflächen abgebildet, wobei eine konstante Öffnungsbreite über die Höhe angenommen wird (Schiebefenster). Dieses einfache Modell wird über Korrekturfaktoren an die reale Situation angenähert. Hierzu wurden Untersuchungen in [Ebel et al. 2003] durchgeführt. Der Volumenstrom durch die Zuluftöffnung berechnet sich danach zu:

$$\text{Gl. 2-5} \quad \dot{V}_{zu} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} f_A f_L \frac{A_{ges}}{2} \text{abs} \left(-\frac{f_h}{4} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} \sigma$$

mit

- f_A Korrekturfaktor für Falzausbildung
- f_L Korrekturfaktor für Fensterlaibung
- f_h Korrekturfaktor Fensterhöhe
- A_{ges} gesamte Fensteröffnungsfläche

Δp_{ges} gesamte Druckdifferenz (Thermik, Wind)

C_d Öffnungsbeiwert (der in der Literatur häufig verwendete Wert von $C_d = 0,62$ ist nach [Ebel 2003] eine gute Annahme).

Der Höhenkorrekturfaktor, der die beim gekippten Fenster vorhandene Zunahme der Öffnungsfläche mit der Höhe abbildet, berechnet sich wie folgt.

$$\text{Gl. 2-6} \quad f_h = 0,0954 f_{b/h}^3 - 0,3577 f_{b/h}^2 + 0,1627 f_{b/h} + 0,788$$

mit

$f_{b/h}$ Quotient aus Fensterbreite und Fensterhöhe.

Um das Fenster in die Massenbilanz zu integrieren, muss Gl. 2-5 in die Form von Gl. 2-3 gebracht werden. Damit ergibt sich für den Massenstrom durch die untere Zuluftöffnung zu

$$\text{Gl. 2-7} \quad \dot{M}_{Zu} = \rho_{Fe} C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} f_A f_L \frac{A_{ges}}{2} \text{abs} \left(-\frac{f_h}{4} \Delta p_{ges} \right)^{0,5} \sigma = \rho_{Fe} k_{Fe} \text{abs}(\Delta p_{Fe,u})^{0,5} \sigma$$

und

$$\text{Gl. 2-8} \quad k_{Fe} = C_d \left(\frac{2}{\rho} \right)^{0,5} f_A f_L \frac{A_{ges}}{2}$$

$$\text{Gl. 2-9} \quad \Delta p_{Fe,u} = -\frac{f_h}{4} \Delta p_{ges}$$

Der Massenstrom durch die obere Abluftöffnung unterscheidet sich hiervon nur durch die Druckdifferenz.

$$\text{Gl. 2-10} \quad \Delta p_{Fe,o} = \frac{f_h}{4} \Delta p_{ges}$$

Über diese Beziehung wird das Fenster in der Massenbilanz für das Gebäude (Gl. 2-3) berücksichtigt.

$f_A, f_L, f_{b/h}$ und A_{ges} sind von der Fenstergeometrie abhängig.

2.2 Berechnung der treibenden Druckdifferenzen

Je nach Lage im Gebäude wirken unterschiedliche Druckkräfte auf die Leckagen. In der Berechnung berücksichtigt werden:

- Winddruck Δp_w

- Thermischer Auftriebsdruck Δp_T
- Innendruck im Gebäude Δp_i

Angegeben werden jeweils Druckdifferenzen zu einem fiktiven ungestörten Umgebungsdruck. Die Vorzeichen werden wie folgt festgelegt:

- Negatives Vorzeichen: Ein Druck, der zu einem Volumenstrom in das Gebäude führt.
- Positives Vorzeichen: ein Druck der zu einer Strömung aus dem Gebäude heraus führt.

Ein Überdruck im Gebäude hat damit nach dieser Konvention ein positives Vorzeichen, ein Unterdruck ein negatives. Ein Überdruck außerhalb des Gebäudes geht hingegen mit einem negativen Vorzeichen in die Bilanz ein.

Die berücksichtigten Anteile bei Berechnung der Druckverteilung auf einer Fassadenseite zeigt Abb. 2-2.

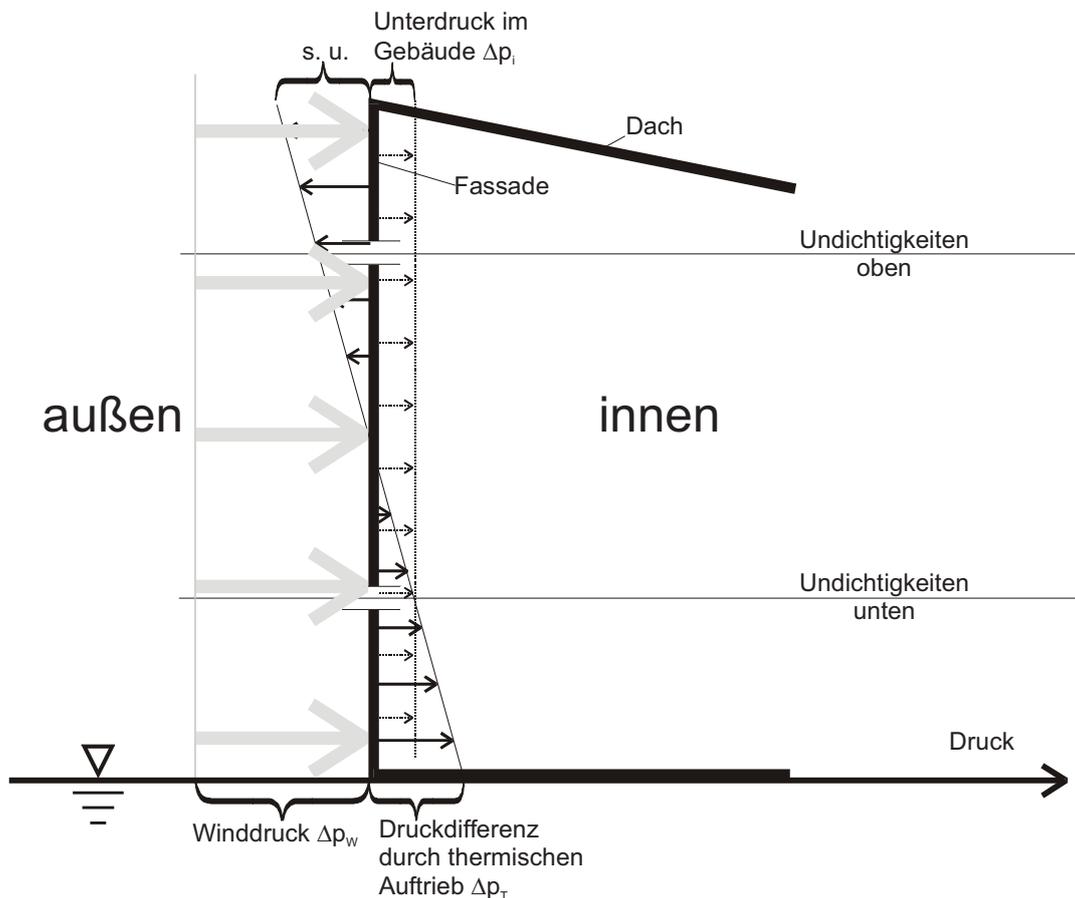


Abb. 2-2: Schematische Darstellung der Druckteilung an einer Außenfassade

Der Gesamtdruck an der Leckage j ergibt sich nach folgender Gleichung.

Gl. 2-11
$$\Delta p_j = \Delta p_{\text{außen}} + \Delta p_{\text{innen}} = \Delta p_w + \Delta p_T + \Delta p_i$$

Im Folgenden wird aufgezeigt, wie die einzelnen Druckdifferenzen berechnet werden.

2.2.1 Winddruck

Entsprechend [Baumgartner 1989] ergibt sich der Winddruck an der Fassade über folgende Gleichung

$$\text{Gl. 2-12} \quad -\Delta p_w = C_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2$$

mit

C_p Winddruckbeiwert nach [Geißler 2001]

w Windgeschwindigkeit in m/s

Die Winddruckbeiwerte werden entsprechend [Baumgartner 1989] angesetzt und sind in Abb. 2-3 dokumentiert.

	Windrichtung	Nordfassade	Ostfassade	Südfassade	Westfassade
Nord	0	0,06	-0,3	-0,3	-0,3
	45	-0,12	0,15	-0,38	-0,32
Ost	90	-0,2	0,18	-0,2	-0,2
	135	-0,38	0,15	-0,12	-0,32
Süd	180	-0,3	-0,3	0,06	-0,3
	225	-0,38	-0,32	-0,12	0,15
West	270	-0,2	-0,2	-0,2	0,18
	315	-0,120	-0,32	-0,38	0,15

Abb. 2-3: In der Berechnung verwendete Winddruckbeiwerte nach [Baumgartner 1989] für eine geschützte Lage

2.2.2 Auftriebsdruck

Der Auftriebsdruck ergibt sich aus dem Kamineffekt als Folge von Temperaturdifferenzen zwischen Innen- und Außenluft. Die Druckdifferenz ist dabei eine Funktion der Höhendifferenz zwischen den Öffnungen und der Temperaturdifferenz. Dabei werden eine einheitliche Innentemperatur (ideal durchmischtes Gebäude) und eine einheitliche Außentemperatur angenommen. Die gesamte Druckdifferenz zwischen zwei Öffnungen h_1 und h_2 berechnet sich nach [Baumgartner 1989] zu

$$\text{Gl. 2-13} \quad \Delta p_T = \rho_N \cdot T_N \cdot g \cdot h \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right)$$

mit

ρ_N Dichte bei Normbedingung (0°C): 1,276 kg/m³

T_N Temperatur bei Normbedingung: 273 K

g	Erdbeschleunigung: 9,81 m/s ²
h	Höhendifferenz zwischen den betrachteten Öffnungen: h ₂ -h ₁
T_a	absolute Außentemperatur in K
T_i	absolute Innentemperatur in K

2.2.3 Innendruck im Gebäude

Der Innendruck im Gebäude ergibt sich aus der Massenbilanz nach Gl. 2-3 unter Verwendung von Gl. 2-11. Da die Strömungsexponenten n_i in Gl. 2-14 unterschiedlich sind, kann diese nicht nach p_i aufgelöst werden, sondern p_i muss iterativ bestimmt werden.

Gl. 2-14

$$\begin{aligned}
 0 = & \rho_{Zu} \cdot k_{Zu} \cdot \left| \underbrace{\Delta p_{Zu,Anlage} + \Delta p_W + \Delta p_{T,zu} + \Delta p_i}_{\Delta p_{Zu}} \right|^{n_{Zu}} \cdot \sigma_{Zu} && \text{mechanische Zuluft} \\
 & + \rho_{Ab} \cdot k_{Ab} \cdot \left| \underbrace{\Delta p_{Ab,Anlage} + \Delta p_W + \Delta p_{T,Ab} + \Delta p_i}_{\Delta p_{Ab}} \right|^{n_{Ab}} \cdot \sigma_{Ab} && \text{mechanische Abluft} \\
 & + \sum_{j=1}^6 \left(\rho_{eL,j} \cdot k_{eL,j} \cdot \left| \underbrace{\Delta p_{W,j} + \Delta p_{T,j} + \Delta p_i}_{\Delta p_{eL,j}} \right|^{n_{eL,j}} \cdot \sigma_{eL,j} \right) && \text{externe Leckagen} \\
 & + \sum_k \rho_{iL,k} \cdot k_{iL,k} \cdot |\Delta p_i|^{n_{iL}} \cdot \sigma_{iL,k} && \text{interne Leckagen} \\
 & + \rho_{Fe,o} \cdot k_{Fe} \cdot \left| \Delta p_W + \Delta p_{T,Fe} + \Delta p_i + \Delta p_{Fe,o} \right|^{n_{Fe}} \cdot \sigma_{Fe} && \text{Fenster oben} \\
 & + \rho_{Fe,u} \cdot k_{Fe} \cdot \left| \Delta p_W + \Delta p_{T,Fe} + \Delta p_i + \Delta p_{Fe,u} \right|^{n_{Fe}} \cdot \sigma_{Fe} && \text{Fenster unten}
 \end{aligned}$$

2.3 Überprüfen des Berechnungsansatzes

Um den Berechnungsansatz auf Plausibilität zu überprüfen, werden die Berechnungsergebnisse mit Messungen verglichen, die im Rahmen der ersten Untersuchung zur Drd-Methode in Wiesbaden-Dotzheim durchgeführt wurden [Ebel et al. 2003]; [Großklos 2002]. Dabei handelt es sich um das Endhaus einer Reihenhauszeile im Passivhausstandard. Die untersuchte Wohneinheit weist drei Außenwände und eine Innenwand zu der Nachbarwohneinheit auf. Das Dach ist als Pultdach ausgeführt. Die Wohneinheit hat eine Zu- und Abluftanlage mit einer hocheffizienten Wärmerückgewinnung und einen vorgeschalteten Erdreichwärmetauscher.

Die Medienversorgung (Heizung, Wasser, Strom) geschieht in der Reihenhauszeile über einen Installationskanal in der Bodenplatte. Dieser stellt eine zusätzliche interne Leckage für die untersuchte Wohneinheit dar. Dies wird in der Berechnung berücksichtigt.

Die in der Berechnung berücksichtigten Leckagen sind in Abb. 2-4 dargestellt. Im Folgenden wird die Ermittlung der Eingabedaten für die Berechnung beschrieben.

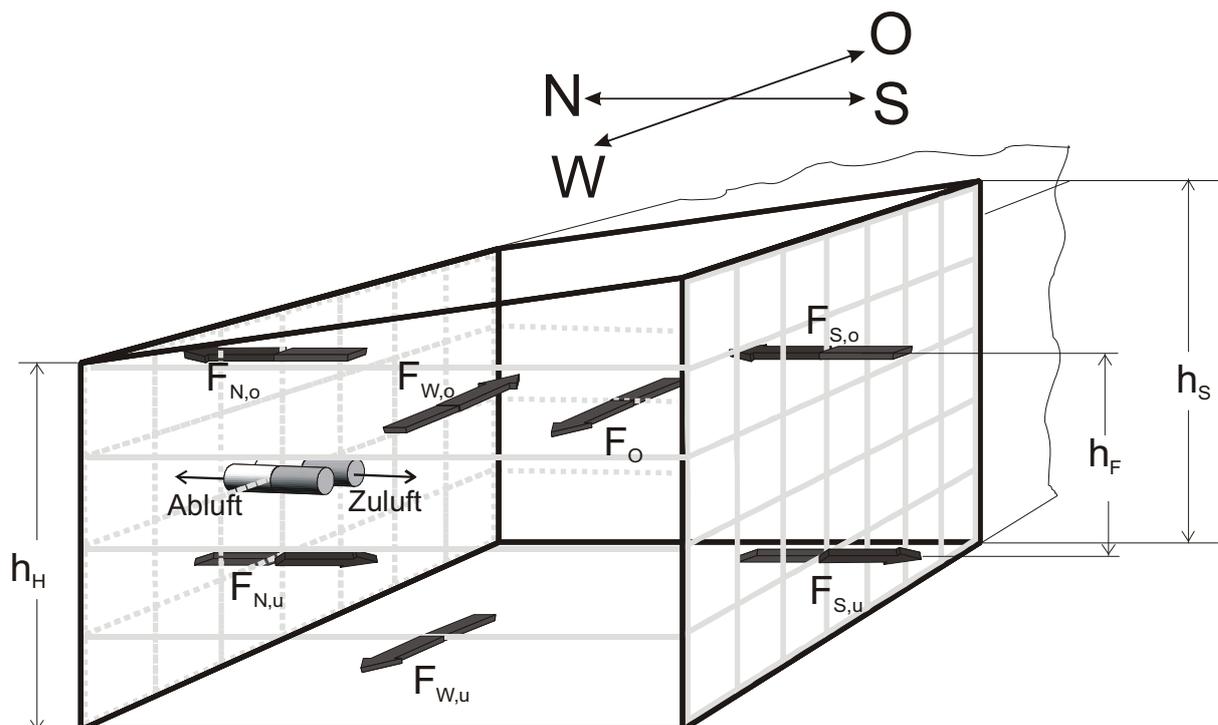


Abb. 2-4: Skizze des verwendeten Berechnungsmodells zum Vergleich mit Messdaten aus einem Reihenendhaus in Passivhausbauweise aus Wiesbaden-Dotzheim

Außenwand Süd	Externe Leckagen	$F_{ex,S,O}$
		$F_{ex,S,U}$
	Fenster	$F_{Fe,O}$
		$F_{Fe,U}$
Außenwand West	Externe Leckagen	$F_{ex,W,O}$
		$F_{ex,W,U}$
Außenwand Nord	Externe Leckagen	$F_{ex,N,O}$
		$F_{ex,N,U}$
	Lüftungsanlage	F_{Zu}
		F_{Ab}
Innenwand Ost	Interne Leckage	$F_{iL,O}$
Fußboden	Interne Leckage	$F_{iL,Sch}$

2.3.1 Abbilden der Undichtigkeiten der Gebäudehülle

Die Leckage der untersuchten Wohneinheit wird über Messungen bestimmt. Hierzu wird mit der Lüftungsanlage durch Abschalten eines Ventilators ein Unter- und Überdruck in dem Gebäude erzeugt und die auftretende Druckdifferenz zur Umgebung und der entsprechende Leckagevolumenstrom gemessen. Der Volumenstrom durch den jeweils abgeschalteten Strang des Kanalnetzes wurde gemessen und herausgerechnet, ist also im Leckagevolumenstrom nicht enthalten. Abb. 2-5 zeigt das Ergebnis der Messung.

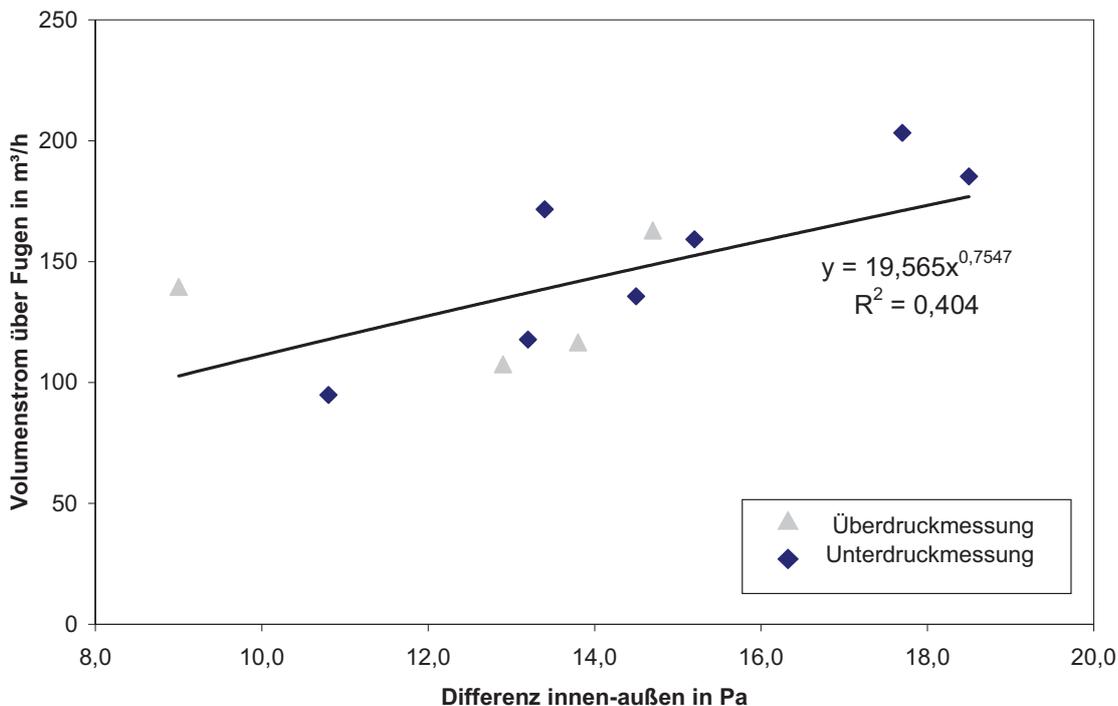


Abb. 2-5: Über die Lüftungsanlage erzeugte Druckdifferenz innen-außen und Volumenstrom über Fugen in der Gebäudehülle in Wohneinheit C1

Die mit der Lüftungsanlage maximal erzielbaren Druckdifferenzen zur Umgebung liegen im betrachteten Beispiel unter 20 Pa. Die Überdruckmessungen zeigten eine geringere Abhängigkeit des Volumenstroms vom Differenzdruck als die Unterdruckmessungen. Aus den Messdaten wird über eine Regressionskurve (Potenzfunktion) ein funktionaler Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Volumenstrom ermittelt. Der Durchflusskoeffizient und der Strömungsexponent für die Undichtheiten ergeben sich aus der Regressionskurve wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Durchflusskoeffizient } k_{F,ges} &= 19,565 \\ \text{Strömungsexponent } n_F &= 0,7547 \end{aligned}$$

Wird mit diesen Werten der Leckagevolumenstrom bei 50 Pascal Differenzdruck berechnet, und dieser auf das Gebäudevolumen bezogen, ergibt sich ein Wert von $n_{C1} = 1,16 \text{ h}^{-1}$. Da kein Schutzdruck in den Nachbarwohneinheiten aufgebaut wurde, beinhaltet dieser Wert neben dem Volumenstrom durch externe auch den Volumenstrom durch interne Leckagen von den Nachbarwohnungen und zum Installationskanal.

2.3.2 Lokale Verteilung der Leckagen

Zur Berechnung der Luftvolumenströme über die Gebäudehülle muss die Gesamtleckage auf einzelne Teilleckagen aufgeteilt werden. Je nach Lage der Teilleckage liegen unterschiedliche Druckdifferenzen an.

Die lokale Verteilung der Teilleckagen auf die Gebäudehülle kann nur messtechnisch ermittelt werden. Hierzu wird im Gebäude ein Unterdruck erzeugt und die Leckagen identifiziert, indem mit einem Anemometer die Strömungsgeschwindigkeit der eintretenden Luft messtechnisch erfasst wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen Überdruck im Gebäude zu erzeugen und über künstlichen Nebel die austretenden Luftvolumenströme sichtbar zu machen.

Für die Niedrigenergie- und Passivhäuser der Lummerlund-Siedlung wurden vom Ingenieurbüro n_{50} aus Kassel und dem Passivhaus Institut aus Darmstadt Drucktests durchgeführt, die Leckagen geortet und Undichtheiten soweit möglich abgedichtet. Die Ergebnisse sind in [Schnieders 1998] dokumentiert.

In [Schnieders 1998] wird zudem aufgrund der Drucktestergebnisse und Berechnungen abgeschätzt, dass 60 % des Leckagevolumenstroms beim Drucktest über die Außenhülle und 40 % über den Installationskanal (unter dem Erdgeschossfußboden) auftreten. Der Installationskanal selbst steht aufgrund der Leckagen im Luftaustausch mit den anderen Wohneinheiten und der Außenluft.

Trotz dieser vergleichsweise hohen Informationsdichte zur Leckagesituation können keine verlässlichen Angaben zur konkreten Verteilung abgeleitet werden. Für das im Weiteren verwendete Modell wird die Abschätzung aus [Schnieders 1998] verwendet:

Externe Leckagen = 60 %

Interne Leckagen = 40 %.

Die gesamten externen Leckagen werden nur den Wänden zugewiesen, d. h. es wird angenommen, dass Dach und Erdgeschossfußboden in der Fläche dicht sind. Die externen Leckagen werden zu gleichen Teilen auf die Nord-, West- und Südfassaden verteilt. Um den Einfluss des thermischen Auftriebs berücksichtigen zu können, werden für die Außenfassaden jeweils eine untere und eine obere Öffnung definiert. Die jeweilige Leckage wird im Verhältnis 1:1 auf die beiden Öffnungen aufgeteilt. Die treibende Druckdifferenz für einen Volumenstrom durch externe Leckagen wird durch Wind, Thermik und Innendruck im Gebäude erzeugt.

Die internen Leckagen werden im Verhältnis 1:1 der Haustrennwand im Osten und dem Installationskanal zugewiesen. Da bei den Luftdichtheitsuntersuchungen Undichtheiten im Bereich der Haustrennwand, insbesondere im Dachpunkt und Fußpunkt, festgestellt wurden, wird hier als treibende Druckdifferenz neben dem Innendruck des Gebäude auch Thermik angesetzt (Höhendifferenz entspricht mittlerer Gebäudehöhe). Auf den Installationskanal wirkt nur der Innendruck als treibende Druckdifferenz für einen Volumenstrom.

Abb. 2-6 gibt einen Überblick über die in der Berechnung angenommene Leckageverteilung.

Orientierung	Lage	Bezeichnung	Anteil an Gesamtleckage	Treibende Druckdifferenz
Nord	Oben	$F_{eL,N,O}$	10 %	Wind, Thermik, Innendruck
	Unten	$F_{eL,N,U}$	10 %	
West	Oben	$F_{eL,W,O}$	10 %	
	Unten	$F_{eL,W,U}$	10 %	
Süd	Oben	$F_{eL,S,O}$	10 %	
	Unten	$F_{eL,S,U}$	10 %	
Haustrennwand Ost		$F_{iL,O}$	20 %	Thermik, Innendruck
Installationskanal		$F_{iL,Sch}$	20%	Innendruck

Abb. 2-6: Aufteilung der Gesamtleckage

2.3.3 Abbilden der Lüftungsanlage

Der Volumenstrom über die mechanische Lüftungsanlage wird ebenfalls über den Potenzansatz entsprechend Gl. 2-1 beschrieben. Das Vorzeichen der vom Ventilator erzeugten Druckdifferenz wird dabei so definiert, dass die oben aufgeführte Vorzeichenkonvention erfüllt wird. Durchflusskoeffizient und Strömungsexponent werden aus den im Rahmen der Handmessungen ermittelten Anlagenkennlinien bestimmt.

Abb. 2-7 und Abb. 2-8 zeigen die Messwerte und die Regressionskurve für den Zuluft- und Abluftstrang, jeweils bei balanciertem Volumenstrom. In beiden Fällen wurde der Druckverlust der Messblende für die Volumenstrommessung aus den Messwerten herausgerechnet. Die Kurven geben das Betriebsverhalten der eingebauten Anlage an. Sie ergeben sich aus der Ventilator- und der Netzkennlinie.

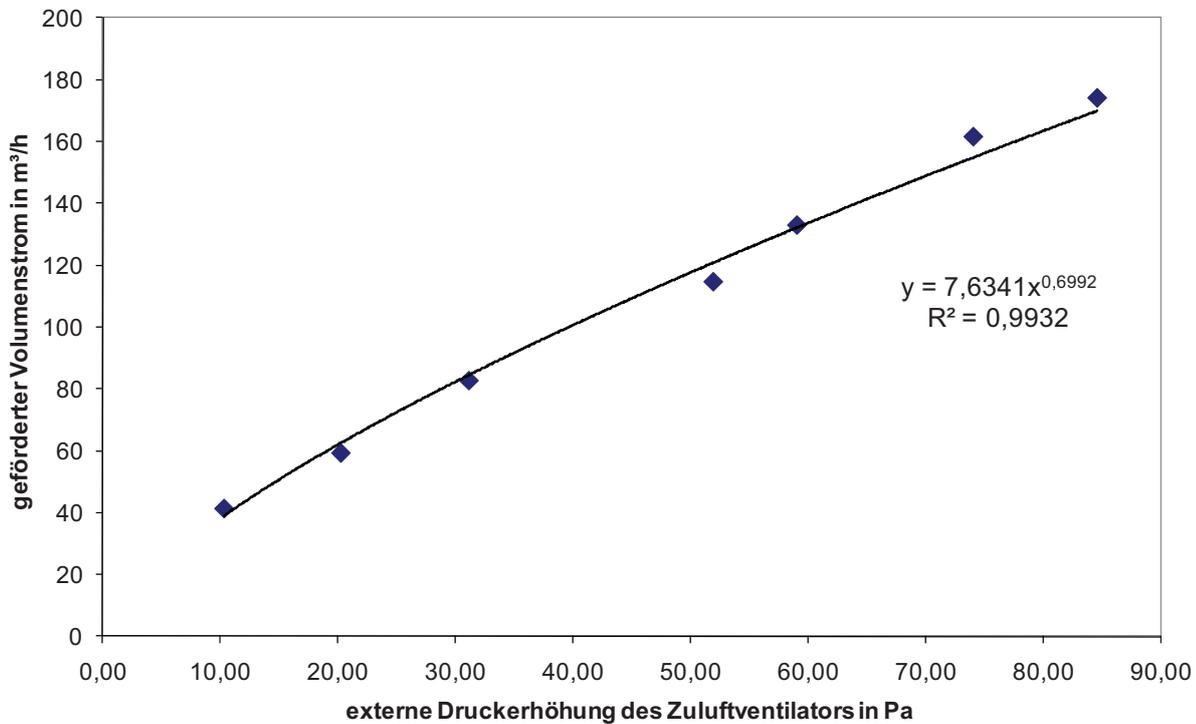


Abb. 2-7: Anlagenkennlinie des Außen-/Zuluftstrangs; Messwerte und Regressionskurve

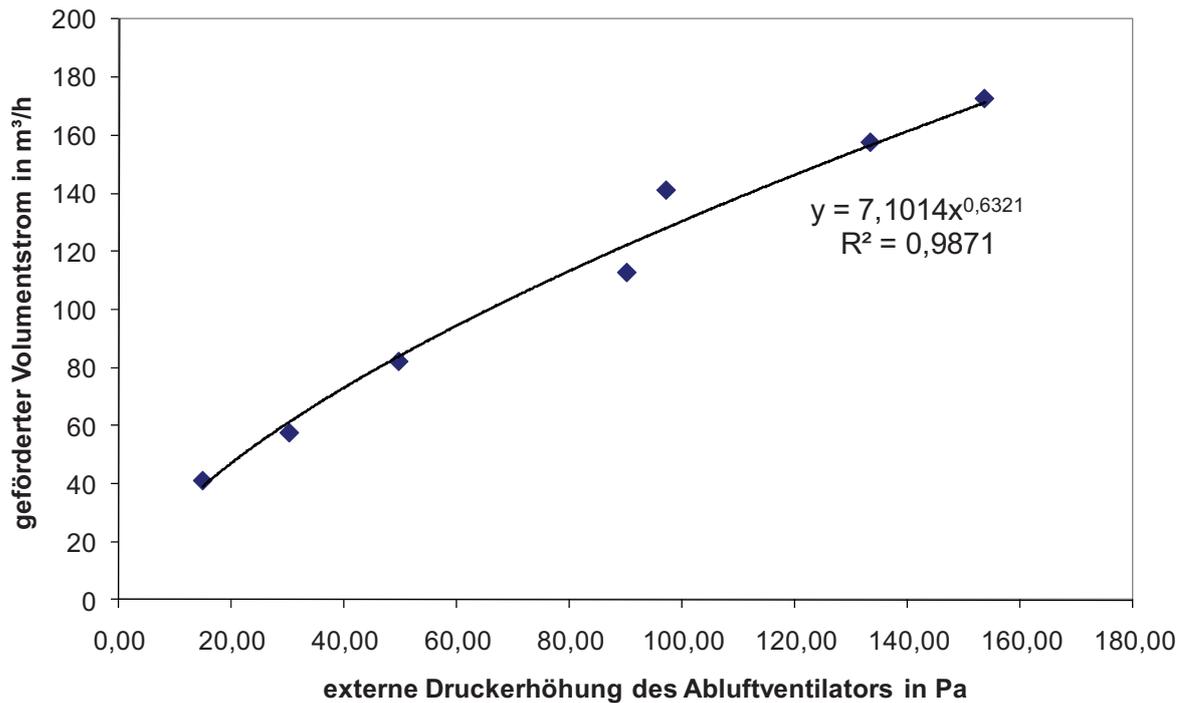


Abb. 2-8: Anlagenkennlinie des Fort-/Abluftstrangs; Messwerte und Regressionskurve

Die Messwerte können in beiden Fällen mit hoher Genauigkeit durch die Regressionskurve abgebildet werden. Es ergeben sich folgende Werte, die in den Berechnungen angesetzt werden:

	Durchflusskoeffizient in m³/(h Pa ⁿ)	Strömungsexponent
Zuluft	7,6341	0,6992
Abluft	7,1014	0,6321

Abb. 2-9: Für Außen-/Zuluftstrang und Fort-/Abluftstrang messtechnisch ermittelte Werte des Durchflusskoeffizienten und Strömungsexponenten

2.3.4 Abbilden des Fensters

Es wird angenommen, dass ein Nordfenster in der Messphase gekippt wird. Die geometrischen Daten und die Korrekturfaktoren sind in Abb. 2-10 dargestellt.

Beschreibung	Einheit	Variable	Nordfenster
Lichte Fensterhöhe	m	h_{ges}	0,91
Lichte Fensterbreite	m	B	0,82
Öffnungswinkel	Grad	α	9,3
Brutto Öffnungsweite	m	T	0,18
Öffnungsbeiwert	-	C_d	0,62
Einfluss Fensterlaibung	-	f_L	0,76
Einfluss Fensterfalz	-	f_A	0,42
Korrekturfaktor Fensterhöhe	-	f_h	0,71
Winddruck-Korrekturfaktor	-	f_w	0,05
Lage	-	-	Mittel

Abb. 2-10: Kenngrößen zum Abbilden des gekippten Fensters in der Berechnung

2.3.5 Vergleich der Berechnung mit Messungen

Um die Validität des Berechnungsmodells zu bewerten, werden die Berechnungsergebnisse mit Messungen verglichen. Die Überprüfung der Berechnungen geschieht für zwei Zeitpunkte, in denen Vor-Ort entsprechende Handmessungen durchgeführt wurden (28. März 2002 und 29. Mai 2002). Da zu beiden Zeitpunkten die Windgeschwindigkeit gering war, werden zur Validierung zudem drei Zeitpunkte aus den kontinuierlichen Messungen herangezogen. Für diese Fälle ist jedoch nur die Druckdifferenz zwischen Innen und Außen gegeben.

29. Mai 2002

Die Außentemperatur entspricht etwa der Raumtemperatur, die Windgeschwindigkeit ist niedrig.

Außentemperatur	°C	23,2
Innentemperatur	°C	24,1
Windgeschwindigkeit	m/s	1,3

Windrichtung	Grad von Nord	270 (West)
--------------	---------------	------------

Zu diesem Messzeitpunkt sind die thermischen und windinduzierten Druckdifferenzen gering. Abweichungen können im Wesentlichen auf die Abbildung

- der Undichtheiten und
- der Lüftungsanlage

zurückgeführt werden.

28. März 2002

Die Außentemperatur ist niedriger als die Innentemperatur, die Windgeschwindigkeit ist gering.

Außentemperatur	°C	6,7
Innentemperatur	°C	19,7
Windgeschwindigkeit	m/s	0,5
Windrichtung	Grad von Nord	270 (West)

Neben den oben genannten Punkten können Differenzen zwischen Berechnung und Messung zudem auf die

- thermisch induzierte Druckdifferenz

zurückgeführt werden.

In Abb. 2-11 bis Abb. 2-13 ist der Vergleich von Berechnung und Messung dargestellt. Die mit den Messungen zu vergleichenden Berechnungsergebnisse sind gelb hinterlegt.

		Messung 1: 29 Mai							
		Zuluftventilator abgeschaltet							
		Abluftvolumenstrom normal				Abluftvolumenstrom hoch			
		FE geschlossen		FE offen		FE geschlossen		FE offen	
		Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung
Druckdifferenz Zuluftventilator	Pa								
Druckdifferenz Abluftventilator	Pa	108	108	109	109	146	146	142	142
Volumensstrom Zuluft	m ³ /h	21	33	4,5	4	24	39	9	4
Volumenstrom Abluft	m ³ /h	116	126	122	134	152	152	158	157
Druckdifferenz innen-außen	Pa	10	8	4	0	11	10	0	1

Abb. 2-11: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen vom 29. Mai 2002

		Messung 1: 28 März							
		Zuluftventilator abgeschaltet							
		Abluftvolumenstrom normal				Abluftvolumenstrom hoch			
		FE geschlossen		FE offen		FE geschlossen		FE offen	
		Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung
Druckdifferenz Zuluftventilator	Pa								
Druckdifferenz Abluftventilator	Pa	99	99	97	97	168	168	160	160
Volumensstrom Zuluft	m ³ /h	19	33	12	12	28	45	13	13
Volumenstrom Abluft	m ³ /h	115	118	117	122	161	167	162	168
Druckdifferenz innen-außen	Pa	9	8	4	2	14	13	4	2

Abb. 2-12: Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen vom 28. März 2002

		Mittlerer bis starker Wind					
		Zuluftventilator abgeschaltet					
		07. Jun 02 v = 3,3 m/s FE geschlossen		10. Jun 02 v = 3,7 m/s FE offen		10. Apr 02 v = 7,7 m/s FE geschlossen	
		Messung	Rechnung	Messung	Rechnung	Messung	Rechnung
Druckdifferenz innen-außen	Pa	7	7	1	1	15	13

Abb. 2-13: Vergleich der Berechnungsergebnissen mit Messwerten bei mittlerem bis starkem Wind

Trotz der sowohl bei der Druck- als auch bei der Volumenstrommessung zu erwartenden Messunsicherheit stimmen die Messungen erstaunlich gut mit den Berechnungsergebnissen

überein. Das aufgestellte Berechnungsmodell scheint damit in der Lage zu sein, die tatsächlichen Druckverhältnisse beim Abschalten des Zuluftventilators realitätsnah abzubilden.

3 Einsatzrandbedingungen Drd-Methode

Das beschriebene Berechnungsmodell wird genutzt, um zu untersuchen, unter welchen Bedingungen die Drd-Methode erfolgreich zur Ermittlung der Fensteröffnungsstellung eingesetzt werden kann. Dabei wird zunächst der Fall einer Zu- und Abluftanlage betrachtet.

Die wichtigste Einflussgröße ist dabei die Dichtheit der Gebäudehülle, da diese den Unterdruck wesentlich mitbestimmt, der im Gebäude durch Abschalten des Zuluftventilators aufgebaut wird. Die Dichtheit wird über den n50 – Wert quantifiziert. Von Bedeutung ist dabei die Dichtheit unter Nutzungs- und nicht unter Testbedingungen.

Neben der Gebäudedichtheit wird der Einfluss der folgenden Parameter untersucht.

Klima

- Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Anlagentechnik

- Der von der Lüftungsanlage geförderte Volumenstrom
- Die Verwendung von automatischen Außenluftklappen
- Fortluft- und Außenluftdurchlässe an unterschiedlichen Gebäudeseiten
- Unterschiedliche Anlagenbetriebsweisen im Ausgangszustand

Unterschiedliche Testsequenzen

- Überdrucktest
- Referenzdruck bei abgeschalteter Lüftungsanlage

3.1 In Parameterstudie verwendetes Gebäude

Im Unterschied zu den Validierungsberechnungen aus Abschnitt 2.3 wird die Parameterstudien an einem typischen Gebäude von Schwörer Haus KG durchgeführt. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Gebäude der Parameterstudie und der Messphase (Projektphase III) vergleichbar und damit die Ergebnisse übertragbar sind. Bei dem in der Parameterstudie verwendeten Gebäude handelt es sich um ein freistehendes Einfamilienhaus mit einer Wohnfläche von 168 m². Eine Ansicht des Gebäudes und die wichtigsten Kenndaten zeigt Abb. 3-1.



Wohnfläche: 168 m³
Luftvolumen: 454 m³
Zu- und Abluftanlage

Leckagen gleichmäßig
auf die vier
Fassadenseiten verteilt

Abb. 3-1: In der Parameterstudie verwendetes Gebäude der Schwörer Haus KG: Musterhaus Weikelsdorf

Bei der Lüftungsanlage handelt es sich um eine zentrale Zu- und Abluftanlage mit Wärmerückgewinnung. Der mittlere Luftstrom liegt bei 175 m³/h und kann zwischen 100 und 250 m³/h variiert werden. Das Lüftungszentralgerät ist im Keller platziert. Sofern nicht anders angegeben, wird davon ausgegangen, dass Außen- und Fortluftdurchlass an der gleichen Gebäudeseite angeordnet sind.

In Abb. 3-2 und Abb. 3-3 sind die Kennlinien für den Außen-/Zuluftstrang und den Ab-/Fortluftstrang der Lüftungsanlage dargestellt. Die Betriebspunkte sind aus den Prüfkurven des IKE (Institut für Kernenergie-technik – Stuttgart) für dieses Gerät entnommen. Sie ergeben sich aus den Ventilator Kennlinien und einer typischerweise für die Prüfung hinterlegten Netzkennlinie.

Kennlinie des Außenluft-Zuluft-Strangs

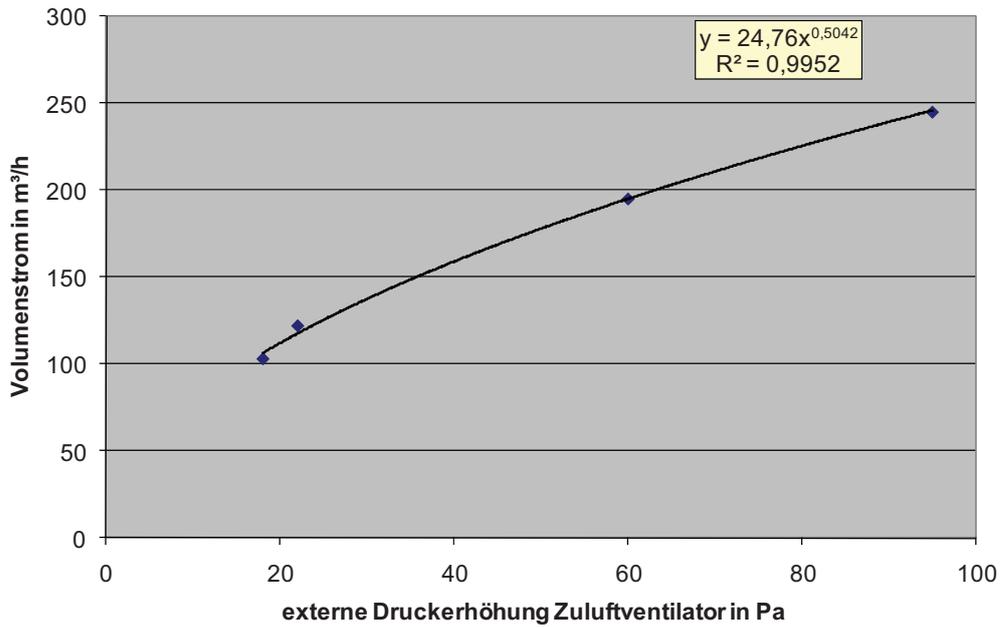


Abb. 3-2: Druck-Volumenstromkennlinie des Außen-/Zuluft-Stranges

Kennlinie des Abluft-Fortluft-Strangs

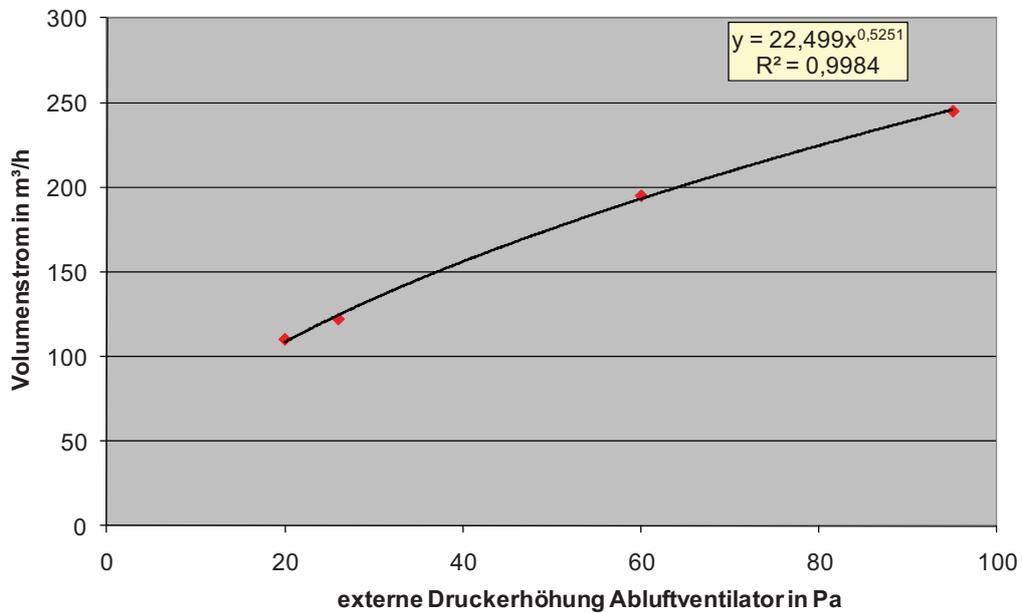


Abb. 3-3: Druck-Volumenstromkennlinie des Ab-/Fortluft-Stranges

3.2 Grenzdruckdifferenz / Mindestdruckdifferenz

Wird in der Drd-Sequenz die Grenzdruckdifferenz nach Abschnitt 1.1 erreicht bzw. überschritten, wird davon ausgegangen, dass alle Fenster geschlossen sind. In der ersten praktischen Anwendungen der Drd-Methode [Großklos 2002] wurden die Grenzdruckdifferenzen von 5 bzw. 10 Pa untersucht. Es zeigte sich kein nennenswerter Unterschied in der Bestimmungsgenauigkeit. Für die praktische Anwendung scheint somit eine Grenzdruckdifferenz von

$$\Delta p_{Grenz} = 5 \text{ Pa}$$

als geeignet.

Im Weiteren werden auf theoretischer Ebene die Einsatzgrenzen der Drd-Methode untersucht. Als Druckdifferenz wird dabei ein Wert von 7,5 Pa herangezogen. Der um 2,5 Pa erhöhte Wert trägt den in der Praxis auftretenden Unschärfen (z. B. Schwankungen des Umgebungsdrucks) Rechnung. Dieser für die theoretische Berechnung herangezogene erhöhte Wert wird als „Mindestdruckdifferenz“ bezeichnet. Damit wird er sprachlich von der in der praktischen Anwendung verwendeten „Grenzdruckdifferenz“ abgegrenzt. Für die Mindestdruckdifferenz zur Beschreibung des Einsatzgebietes der Drd-Methode ergibt sich damit ein Wert von

$$| \text{Referenzdruck} - \text{Testdruck} | \geq \Delta p_{Drd,min} = 7,5 \text{ Pa} \quad \text{Drd-Methode kann erfolgreich eingesetzt werden.}$$

3.3 Dichtheit der Gebäudehülle

Die Dichtheit der Gebäudehülle bestimmt wesentlich den Unterdruck, der im Gebäude beim Abschalten des Zuluftventilators aufgebaut wird. Sie ist damit eine zentrale Größe zur Beschreibung der Einsatzgrenzen. Quantifiziert wird die Dichtheit über den n_{50} -Wert. Dieser entspricht dem Leckagevolumenstrom über die Gebäudehülle bei einem Differenzdruck zur Umgebung von 50 Pascal bezogen auf das Gebäudeluftvolumen. Das Verfahren zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden ist in der DIN EN 1829 beschrieben. Entscheidend für die Drd-Methode ist dabei die Dichtheit im Nutzungszustand (Verfahren A). Zur Ermittlung des Dichtheitswertes sind dabei

- die Luftdurchlässe von mechanischen Lüftungsanlagen abgedichtet
- vorhandene andere Lüftungsöffnungen (z. B. für natürliche Lüftung) geschlossen jedoch nicht abgedichtet
- ein vorhandener Kaminzug geschlossen (da auch bei geschlossenem Kaminzug eine Mindestquerschnittsfläche offen bleibt, ergeben sich aus dem Vorhandensein eines Kamins erhöhte Anforderungen an die Gebäudehülle).

Wird die Drd-Methode in Gebäuden mit mehreren Wohneinheiten eingesetzt (Reihenhaus, Mehrfamilienhaus), so umfassen die im Weiteren angegebenen Dichtheitsanforderungen ne-

ben den externen Leckagen auch die internen Leckagen zu den Nachbarwohnungen. Dies entspricht einem Drucktest ohne Schutzdruck in den Nachbarwohnungen.

Gegenüber dem Messwert (z. B. Neubau) kann die Dichtheit der Gebäudehülle im Zeitverlauf durch Alterung der luftdichten Verbindungen abnehmen. Zudem verschlechtert sich die Dichtheit (höherer n_{50} -Wert) durch nachträglich eingebaute

- durchgehende Briefkastenschlitze
- Katzenklappen
- Abluft-Dunstabzugshauben (kann durch automatische Verschlussklappen reduziert werden)
- Abluft-Wäschetrockner (in geschlossenem Zustand sind die zusätzlichen Undichtheiten vermutlich gering).

Dies ist bei der Interpretation der Einsatzgrenzen der Drd-Methode zu berücksichtigen.

Die Undichtigkeiten die sich bei abgeschaltetem Ventilator über das Kanalnetz ergeben sind in den oben angegebenen n_{50} -Werten nicht enthalten.

In Abb. 3-4 ist dargestellt, wie sich der Gebäudeinnendruck Δp_i (siehe Abschnitt 2.2.3) in Abhängigkeit von der Gebäudedichtheit ändert. Dargestellt ist die Druckdifferenz zu einem ungestörten Außendruck, der über die Außenmessstelle erfasst wird (siehe Abschnitt 1.1). Die durchgezogene Kurve stellt den Fall dar, dass die Lüftungsanlage abgeglichen ist (Zuluftmassenstrom = Abluftmassenstrom). Dies entspricht dem Referenzdruck. Die gestrichelte Kurve zeigt den Verlauf für den Fall, dass der Zuluftventilator abgeschaltet und der Abluftventilator auf maximaler Leistungsstufe betrieben wird, was dem Testdruck entspricht.

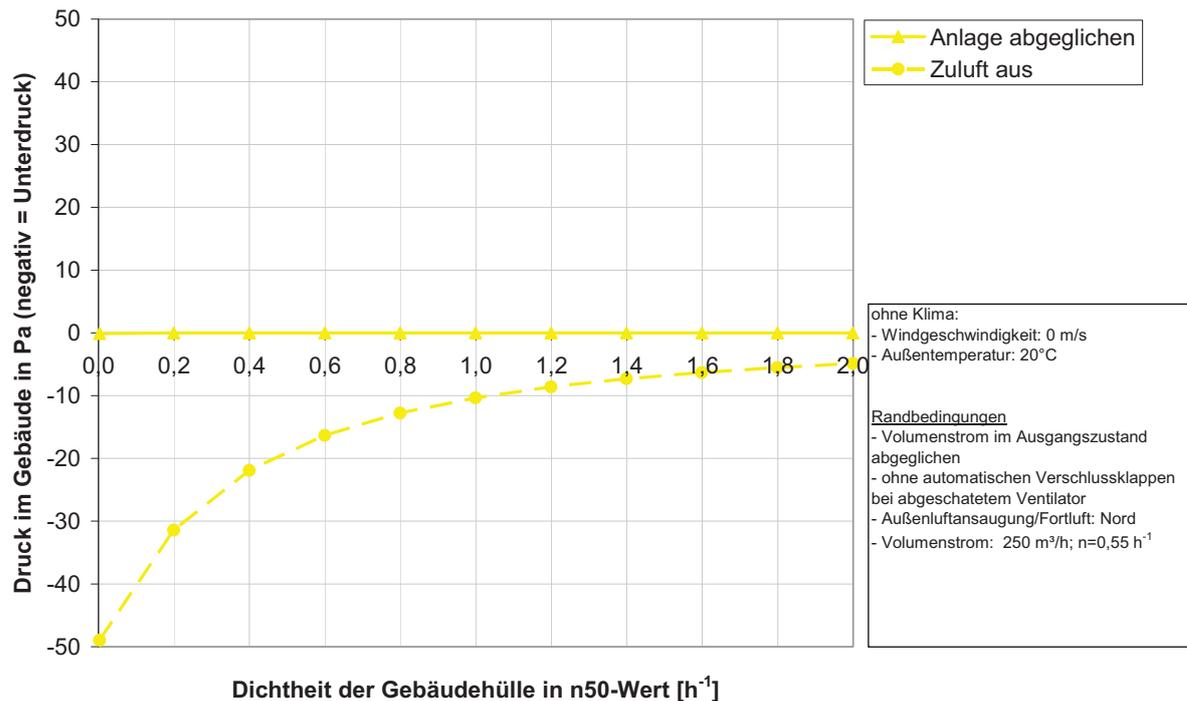


Abb. 3-4: Verlauf des Gebäudeinnendruckes in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle ohne Klimaeinfluss bei geschlossenen Fenstern

Im abgeglichenen Zustand liegt der Gebäudeinnendruck (Referenzdruck) unabhängig von der Gebäudedichtheit immer bei 0 Pa, d. h. es wird weder ein Unter- noch ein Überdruck aufgebaut. Dies ist verständlich, da in dieser Variante der Einfluss des Wetters vernachlässigt wird und somit keine Störgröße auf den Innendruck wirkt.

Wird der Zuluftventilator abgeschaltet, baut sich ein Unterdruck im Gebäude auf (Testdruck). Im idealisierten Fall eines dichten Gebäudes ($n_{50} = 0$ 1/h) beträgt er in Abb. 3-4 etwa 50 Pa. Ein höherer Unterdruck stellt sich nicht ein, da der Außen-/Zuluftstrang bei abgeschaltetem Zuluftventilator eine Öffnung nach außen darstellt, d.h. als Undichtheit wirkt. Dieser Effekt wird entsprechend der Kennlinie aus Abb. 3-2 berücksichtigt. In der Kennlinie ist die interne Druckdifferenz des Ventilators jedoch nicht enthalten. Würde diese berücksichtigt, würden höhere Unterdrücke erreicht, so dass die Ergebnisse durch diese Vereinfachung auf der sicheren Seite liegen.

Kommen neben der Undichtheit durch das Zuluftkanalnetz noch Undichtheiten der Gebäudehülle hinzu, sinkt der erzielbare Unterdruck. Bei extrem hohen Undichtheiten würde der Innendruck sich dem Wert Null nähern.

In Abb. 3-5 ist die für die Drd-Methode ausschlaggebende Differenz aus Referenz und Testdruck (Abb. 3-4) dargestellt.

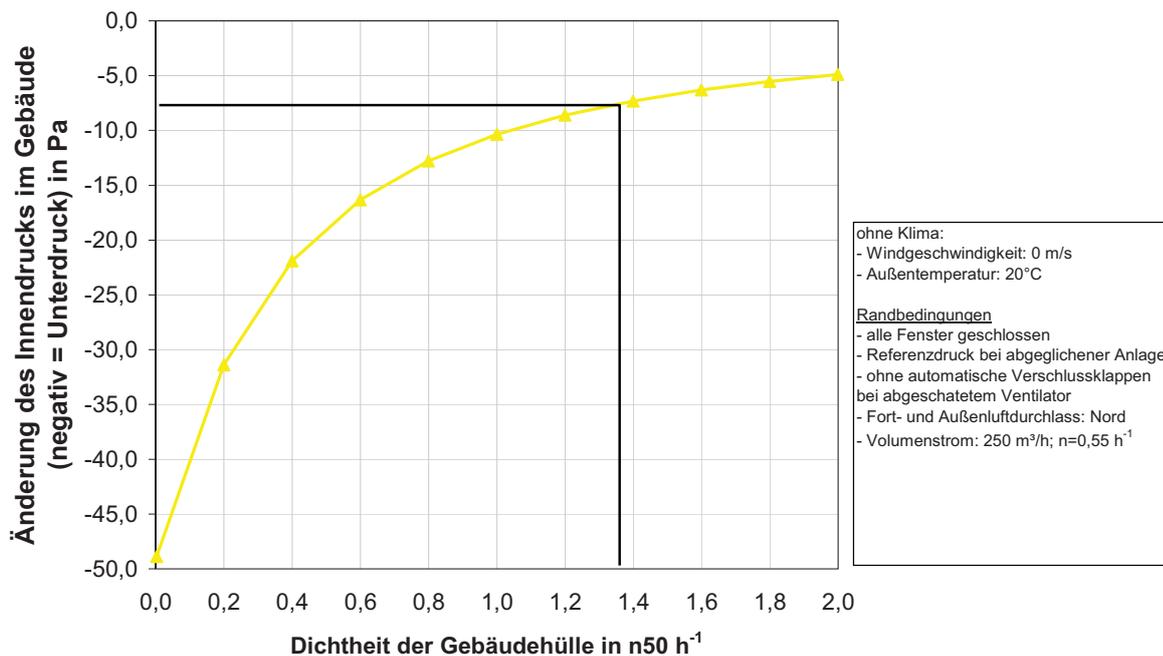


Abb. 3-5: Änderung des Gebäudeinnendrucks beim Abschalten des Zuluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle ohne Klimaeinfluss und bei geschlossenen Fenstern

Der Mindestdruckdifferenz von 7,5 Pa wird unter den gegebenen Randbedingungen von Gebäuden überschritten, deren Dichtheit kleiner als $n_{50} \leq 1,3 \text{ h}^{-1}$ beträgt. Diese Dichtheit entspricht der Einsatzgrenze der Drd-Methode ohne Einwirkung des Außenklimas.

3.4 Außenklima

Der Gebäudeinnendruck wird durch die Einwirkung des Wetters beeinflusst. Dieser Einfluss und die Auswirkungen auf die Änderung des Innendrucks beim Abschalten des Zuluftventilators werden im Folgenden untersucht. Dabei wird der Fall ohne Einwirkung des Außenklimas als Referenzvariante mit in den Grafiken gezeigt.

Beim Außenklima werden folgende Parameter berücksichtigt.

- **Außentemperatur:** Die Außentemperatur beeinflusst den thermischen Auftriebsdruck, der auf die Fugen und die Lüftungsanlage wirkt. Werden die Lüftungskanäle - wie im vorliegenden Fall – im unteren Gebäudebereich in das Gebäude geführt, entsteht durch den Auftriebsdruck ein Überdruck im Gebäude. Würden die Lüftungskanäle im oberen Gebäudebereich eingeführt (Dachzentrale), würde ein Unterdruck erzeugt. Für die Höhe des Auftriebsdrucks ist u. a. die Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Raumluft verantwortlich. Um den maximalen Einfluss auf den Gebäudeinnendruck zu modellieren, wird eine Außentemperatur von -10 °C angesetzt.

- Windgeschwindigkeit: Durch die Windanströmung werden die Außendrucke an den Fassaden und dem Dach bestimmt. Quantifiziert werden diese über die Winddruckbeiwerte (siehe Abschnitt 2.2.1). Aus dem Verlauf der Winddruckbeiwerte wird deutlich, dass im Gebäude durch die Windkräfte ein Unterdruck erzeugt wird. Um den maximalen Einfluss der Windgeschwindigkeit abzuschätzen, wird im Folgenden eine Windgeschwindigkeit von 10 m/s angesetzt. Dies entspricht einem hohen Wert, der nur an stürmischen Tagen auftritt.
- Windrichtung: Die Windrichtung bestimmt, ob sich auf den Fassaden ein Unter- oder ein Überdruck ausbildet. Für die hier durchgeführte Untersuchung ist zudem die Windrichtung in Relation zur Lage der Außen- und Fortluftdurchlässe wichtig (Luv, Lee). Hierdurch wird der von der Lüftungsanlage geförderte Volumenstrom beeinflusst. Für die folgende Untersuchung wird der Fall untersucht, dass die Lüftungsrohre (Nordfassadenseite) auf der windzugewandten Seite (Luv / Windrichtung: Nord) und der windabgewandten Seite (Lee / Windrichtung: Süd) liegen.

Die Drücke, die sich im Gebäude einstellen, sind in Abb. 3-6 dargestellt. Die Varianten mit abgeglicherer Lüftungsanlage (Referenzdruck) sind durchgezogen, wohingegen die Varianten mit abgeschaltetem Zuluftventilator (Testdruck) gestrichelt wiedergegeben werden.

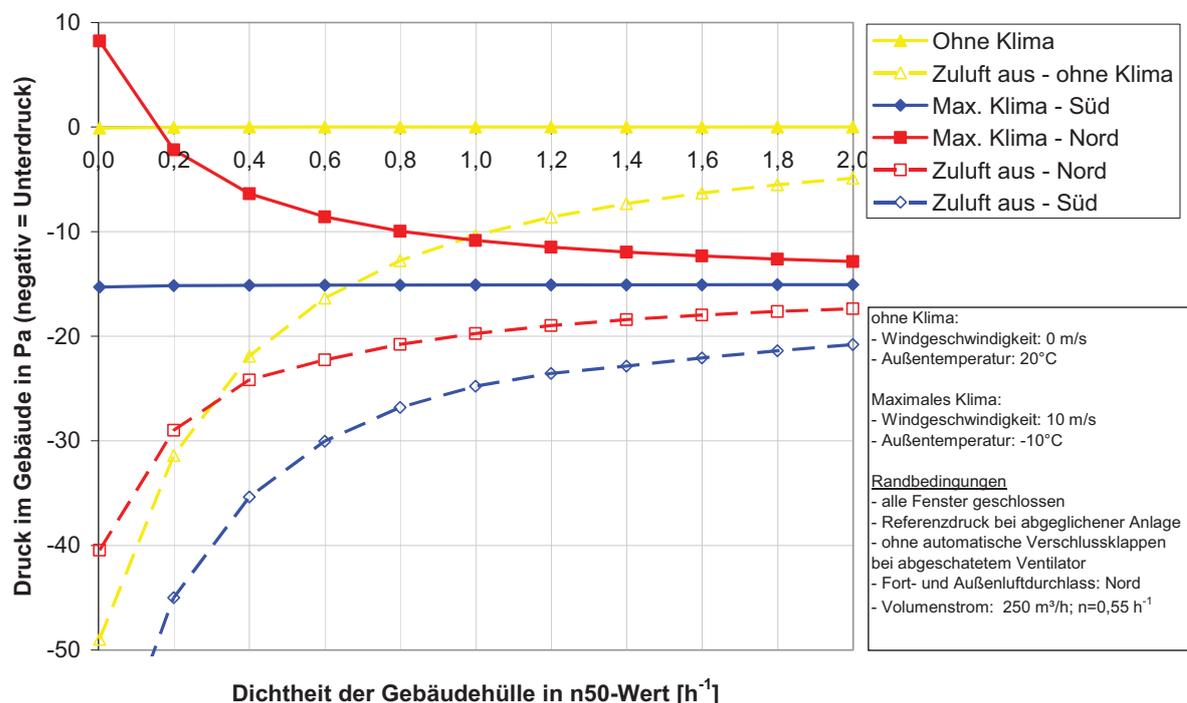


Abb. 3-6: Berechneter Gebäudeinnendruck in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Klimarandbedingungen

Der Gebäudeinnendruck wird wesentlich durch das Wetter beeinflusst. Für den Fall des dichten Gebäudes ($n_{50} = 0 \text{ h}^{-1}$) bestimmt der Strömungswiderstand des offenen Außen-

/Zuluftstrangs den Gebäudeinnendruck. Mit abnehmender Dichtheit nimmt der Einfluss der Gebäudefugen zu. Im Folgenden soll der Verlauf der Kurven kurz erläutert werden.

Windanströmung Nord

Abgeglicherer Betrieb (Max. Klima – Nord): Im Fall des dichten Gebäudes ($n_{50} = 0 \text{ h}^{-1}$) entsteht ein Überdruck im Gebäude, da aufgrund des Winddrucks die Abluftmenge sinkt während die Zuluftmenge ansteigt. Mit abnehmender Dichtheit der Gebäudehülle macht sich der Unterdruck an den windabgewandeten Fassadenseiten zunehmend bemerkbar, so dass schließlich ein Unterdruck entsteht.

Zuluftventilator ausgeschaltet (Zuluft aus – Nord): Es wird ein Unterdruck im Gebäude aufgebaut. Dieser sinkt je undichter die Gebäudehülle wird.

Windanströmung Süd

Abgeglicherer Betrieb (Max. Klima – Süd): Bei $n_{50} = 0 \text{ h}^{-1}$ stellt sich ein Unterdruck im Gebäude ein, da auf der Fassadenseite mit den Lüftungsrohren ein Unterdruck herrscht. Nimmt die Dichtheit der Gebäudehülle ab, ändert sich der Unterdruck nur unwesentlich, da auch die Windkräfte an den Fugen einen ähnlichen Unterdruck erzeugen würden.

Zuluftventilator ausgeschaltet (Zuluft aus – Süd): Der ohnehin herrschende Unterdruck wird durch das Abschalten des Zuluftventilators verstärkt. Auch diese Kurve nähert sich bei undichten Gebäuden dem Unterdruck, der durch die Windkräfte an den Fugen bestimmt wird.

Für die Drd-Methode ist die Änderung der Gebäudeinnendrucks beim Abschalten des Zuluftventilators entscheidend. Diese entspricht der Differenz aus Referenz- und Testdruck. Die berechneten Druckdifferenzen sind in Abb. 3-7 dargestellt.

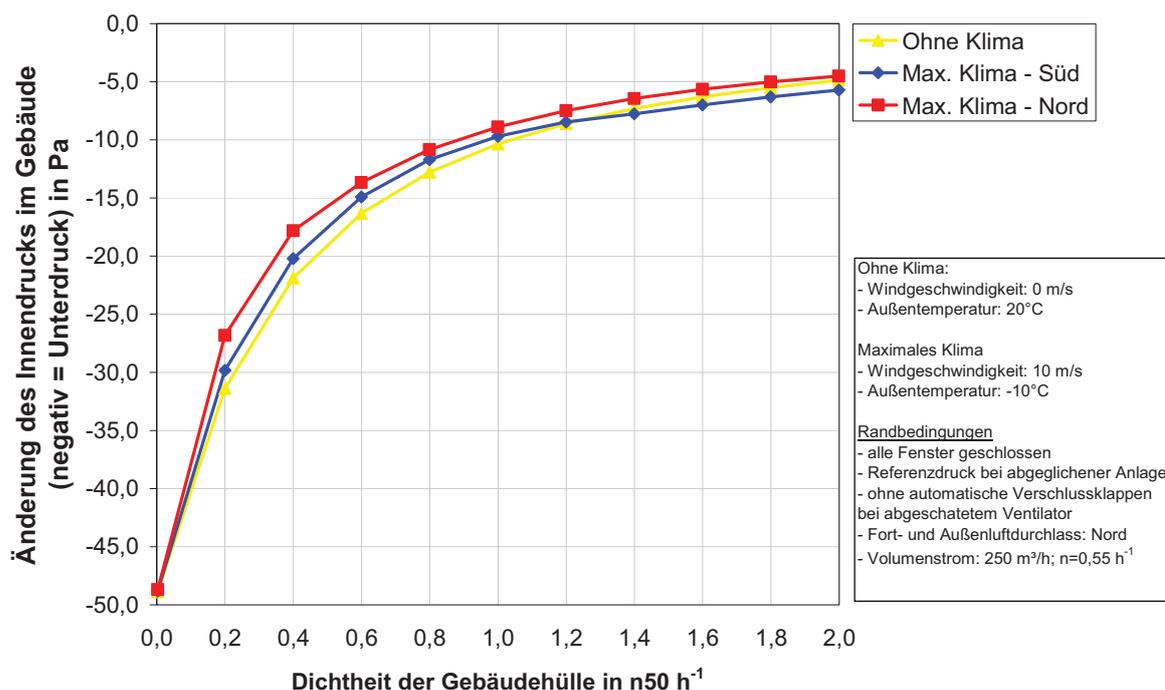


Abb. 3-7: Änderung des Gebäudeinnendruckes beim Abschalten des Zuluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Klimarandbedingungen

Auch wenn der Gebäudeinnendruck entscheidend vom Außenklima beeinflusst wird, so sind die Auswirkungen auf die Druckdifferenz gering. Der Außenklimaeinfluss hebt sich bei der Differenzenbildung weitgehend auf.

Für die weiteren Parameteruntersuchungen wird jedoch der ungünstigste Fall „maximales Klima mit Windanströmung von Norden“ verwendet. Damit können Störungen des Außenklimas auf andere Einflussgrößen abgeschätzt werden. Die Einsatzgrenze für die Drd-Methode reduziert sich durch den Einfluss des Außenklimas auf eine Gebäudedichtheit kleiner als $n_{50} \leq 1,2 \text{ h}^{-1}$.

3.5 Luftvolumenstrom der Lüftungsanlage

In den bisherigen Untersuchungen wurde der maximal von der mechanischen Lüftungsanlage förderbare Luftvolumenstrom von 250 m³/h angesetzt. Dies entspricht dem Fall, dass im Rahmen der Testsequenz der Abluftventilator auf die maximale Leistungsstufe angehoben wird. Durch diesen Wert wird die Einsatzgrenze der Drd-Methode bestimmt. Es ist aber wünschenswert, die Leistung des Abluftventilators im Rahmen der Testsequenz möglichst nicht anheben zu müssen ($n = 0,4 \text{ h}^{-1}$), sondern lediglich den Zuluftventilator auszuschalten.

Der Einfluss des Luftwechsels auf die Änderung des Gebäudeinnendruckes wird in diesem Abschnitt untersucht. Es werden folgende Fälle betrachtet:

		$n = 0,2 \text{ h}^{-1}$	$n = 0,4 \text{ h}^{-1}$	$n = 0,55 \text{ h}^{-1}$
Volumenstrom	m^3/h	90	180	250
Beschreibung		Reduzierter Betrieb	Normalbetrieb	Maximalbetrieb
Externe Druckerhöhung	Pa			
Zuluftventilator		14	52	100
Abluftventilator		15	53	100

Die Änderung des Innendrucks bei maximalem Klimaeinfluss in Abhängigkeit von der Gebäudedichtheit zeigt Abb. 3-8.

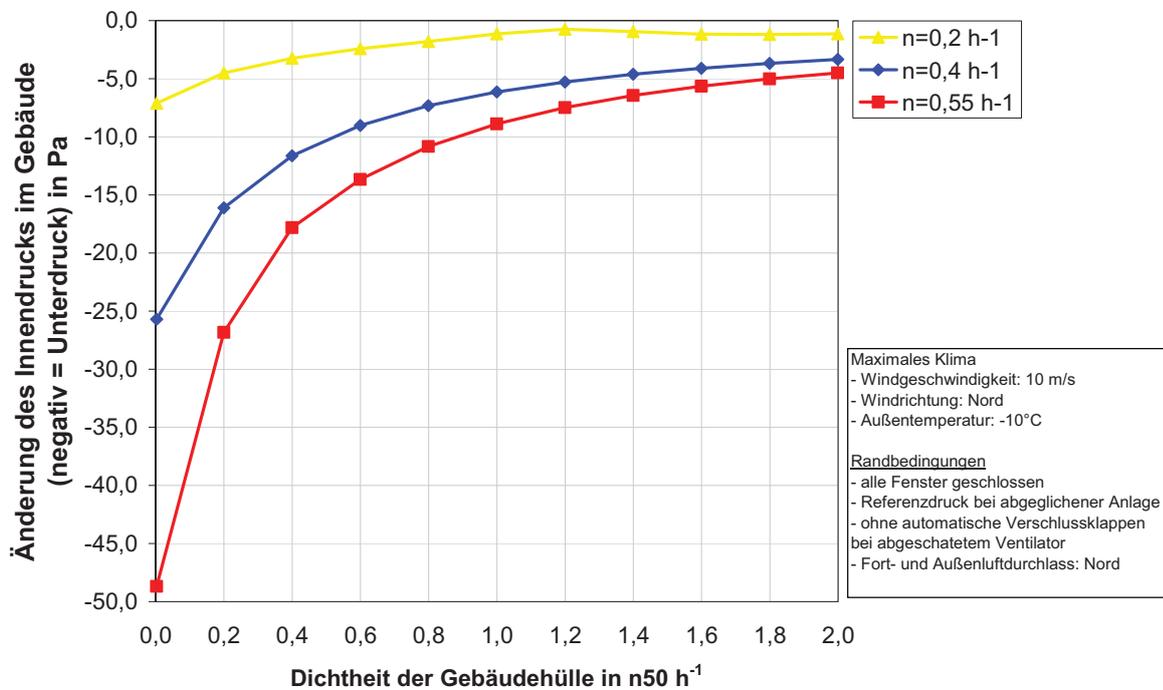


Abb. 3-8: Änderung des Gebäudeinnendrucks beim Abschalten des Zuluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Volumenströme der mechanischen Lüftungsanlage

Der von der Lüftungsanlage geförderte Volumenstrom hat deutlichen Einfluss auf die erzielbare Druckdifferenz. Bei einem Luftwechsel von $n = 0,2 \text{ h}^{-1}$ kann die Mindestdruckdifferenz von 7,5 Pa nicht erreicht werden. Im Normalbetrieb $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$ wird der erforderliche Unterdruck nur in Gebäuden erreicht, deren Dichtheit unter $n_{50} \leq 0,8 \text{ h}^{-1}$ liegt. Für diese Gebäude kann auf ein Anheben der Leistung des Abluftventilators in der Testsequenz im Prinzip verzichtet werden.

3.6 Lage von Fortluftdurchlass und Außenluftansaugung

Häufig ist es Wunsch des Bauherren, die Rohre für die Fortluftabfuhr und die Außenluftansaugung auf unterschiedlichen Fassadenseiten zu platzieren. Zudem sollte aus technischen Gründen die Abluft über Dach abgeführt werden.

Sind Fortluft- und Außenluftdurchlass nicht auf der gleichen Gebäudeseite, wirken unterschiedliche Winddrücke auf die Lüftungsstränge. Der maximale Unterschied tritt nach Analyse der Winddruckbeiwerte bei einer Süd-Ost-Anströmung zwischen Nord- und Ostfassade auf. Auf der Ostfassade entsteht ein Über- auf der Nordfassade ein Unterdruck.

Um den Einfluss auf die Druckänderung zu untersuchen, wird die Außenluftansaugung auf der Ostfassade (Überdruck) und die Fortluft auf der Nordfassade (maximaler Unterdruck) angeordnet. Das Ergebnis ist als blaue Linie mit Rauten in Abb. 3-9 dargestellt. Zum Vergleich ist der bekannte Basisfall mit Windrichtung Nord und Fort- und Außenluftdurchlass auf der Nordseite als rote Linie mit Quadraten eingezeichnet. Die gelbe Linie mit Dreiecken zeigt den Fall mit Fort- und Außenluftkanälen auf der Nordseite, aber einer Windrichtung von Süd-Ost.

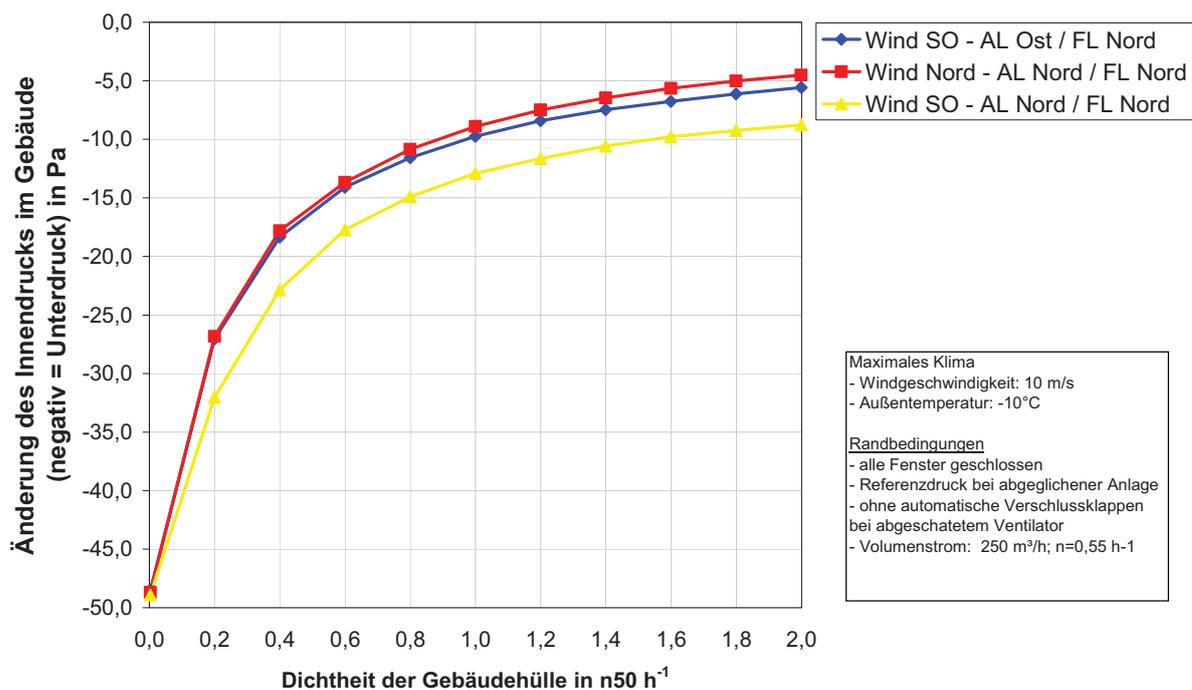


Abb. 3-9: Änderung des Gebäudeinnendrucks beim Abschalten des Zuluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Anordnungen von Außen- und Fortluftdurchlass bzw. Windrichtungen

Verglichen mit der Basisvariante (Wind Nord – AL Nord/FL Nord – rote Linie mit Quadraten) führt eine Änderung der Windrichtung zu einem Anstieg der messbaren Druckänderung (Wind SO – AL Nord/FL Nord – gelbe Linie mit Dreiecken). Das war zu erwarten, da der in der Basisvariante der ungünstigste Fall der Windrichtung gewählt wurde.

Werden Fortluftdurchlass und Außenluftansaugung an verschiedenen Fassaden angebracht (Wind S= - AL Ost / FL Nord – blaue Linie mit Rauten), reduziert sich die Druckänderung. Trotzdem liegen die Druckdifferenzen immer noch oberhalb der Basisvariante. Es ist entsprechend möglich, Fort- und Außenluft an unterschiedlichen Fassadenseiten zu platzieren.

3.7 Automatische Verschlussklappen

Lüftungsanlagen können mit automatischen Verschlussklappen ausgerüstet werden. Diese schließen den Zu- und den Abluftkanal ab, sobald der entsprechende Ventilator abgeschaltet wird.

In Bezug auf die Drd-Methode haben automatische Verschlussklappen den Vorteil, dass der Außen-/Zuluftstrang nicht als Undichtheit wirkt, wenn der Zuluftventilator im Rahmen der Testsequenz abgeschaltet wird. Die für den Fall erzielbaren Druckdifferenzen zwischen Referenz- und Testdruck sind in Abb. 3-10 dargestellt.

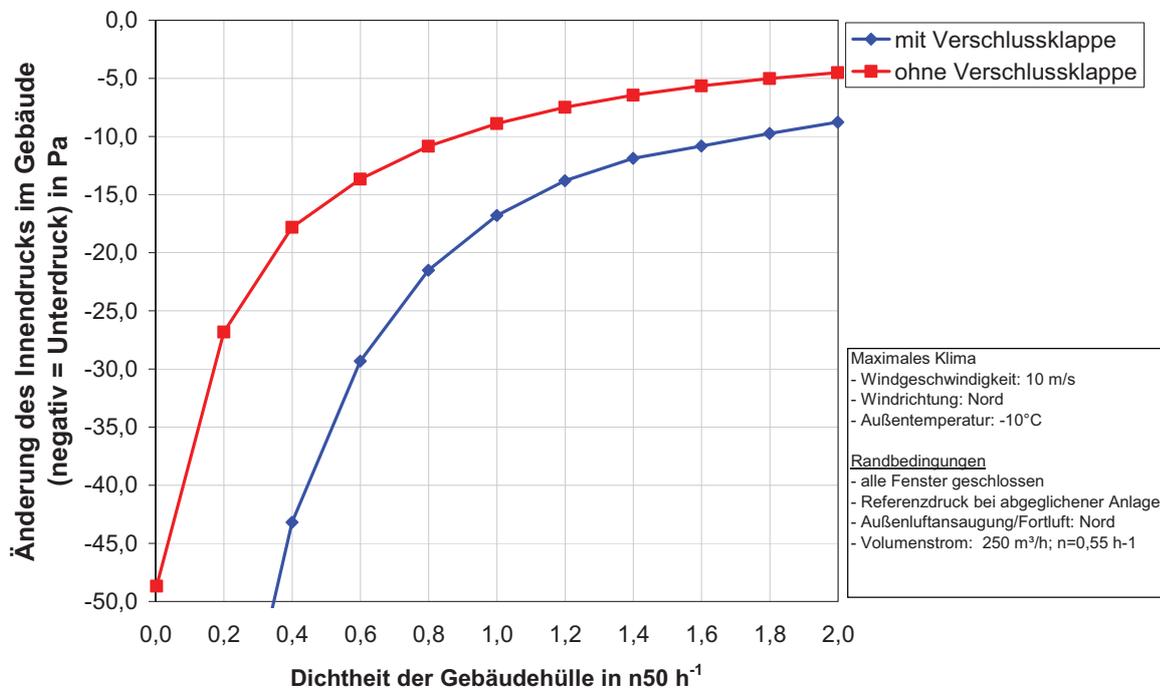


Abb. 3-10: Änderung des Gebäudeinnendrucks beim Abschalten des Zuluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle mit und ohne automatische Verschlussklappen

Die automatische Verschlussklappe führt dazu, dass durch das Abschalten des Zuluftventilators ein deutlich größerer Unterdruck im Gebäude aufgebaut werden kann. Selbst bei einem undichten Gebäude mit $n_{50} = 2 \text{ h}^{-1}$ kann die erforderliche Mindestdruckdifferenz von 7,5 Pa aufgebaut werden. Mit automatischen Verschlussklappen kann also der Einsatzbereich der Drd-Methode deutlich erweitert werden.

3.8 Unterschiedliche Referenzzustände

In den bisherigen Untersuchungen zur Drd-Methode wurde zwei Druck(differenzen) gegenüber einem Außendruck gemessen:

1. Referenzdruck bei abgeglicherer Lüftungsanlage
2. Testdruck bei abgeschaltetem Zuluftventilator.

Die Druckdifferenz aus beiden Drücken wurde gebildet und die Bedingungen

$$| \text{Testdruck} - \text{Referenzdruck} | \geq \Delta p_{\text{Grenz}}$$

überprüft.

Der abgeglichene Zustand wurde dabei ohne Wettereinfluss (Windgeschwindigkeit = 0 m/s; Außentemperatur = 20°C) eingestellt. Wie in Abschnitt 7 gezeigt wird, ändert sich die Massenbilanz der Lüftungsanlage jedoch ständig. Einflüsse sind Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie zunehmende Filterverschmutzung oder Änderungen der Einstellung von Zu- und Abluftdurchlässen. Dass eine Lüftungsanlage im abgeglichenen Zustand betrieben wird, ist damit eher die Ausnahme (sofern nicht entsprechende Maßnahmen ergriffen werden).

Im Folgenden wird untersucht, wie sich der Gebäudeinnendruck nach Abschalten des Zuluftventilators ändert, wenn die Lüftungsanlage vor dem Abschalten des Zuluftventilators eine leichte Disbalance (20 % Abluftüberschuss, eingestellt für Gebäudedichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$) aufweist. In dem Fall ergibt sich ein anderer Referenzdruck. Außerdem wird der Fall untersucht, dass der Referenzdruck bei abgeschalteter Anlage (Zu- und Abluft aus) gemessen wird.

In Abb. 3-11 sind die Gebäudeinnendrucke (gegenüber Außendruck) für die unterschiedlichen Anlagenbetriebszustände in Abhängigkeit von der Gebäudedichtheit aufgetragen.

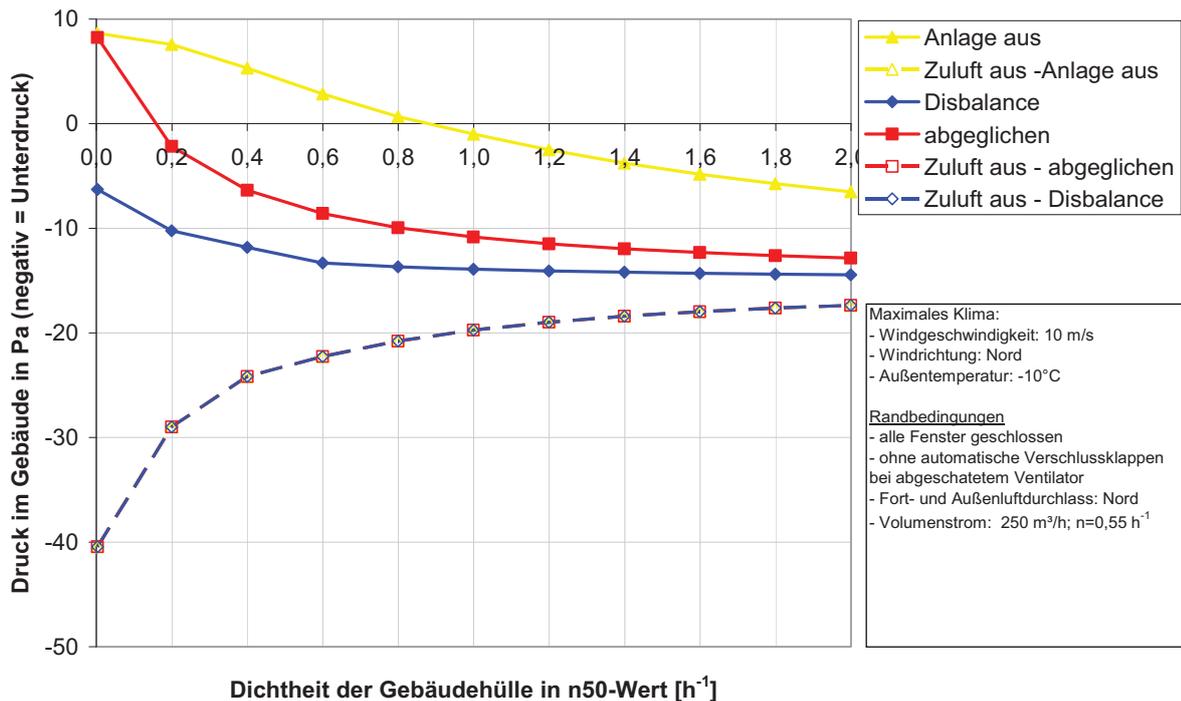


Abb. 3-11: Berechneter Gebäudeinnendruck in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Anlagenbetriebszustände beim Bestimmen des Referenzdrucks

Wird der Zuluftventilator in der Testsequenz abgeschaltet ist der Gebäudeinnendruck für alle Varianten identisch (für die Variante „Anlage aus“ bedeutet die Testsequenz, dass der Abluftventilator eingeschaltet wird).

Unterschiede ergeben sich beim Referenzdruck. Die rote Kurve mit Quadraten zeigt wieder den bekannten Basisfall mit abgeglichenem Zustand. Weist die Lüftungsanlage eine Disbalance (20 % Abluftüberschuss) auf, reduziert sich der Referenzdruck, da in dem Fall bereits weniger Zuluft gefördert wird, was einen gewissen Unterdruck im Gebäude erzeugt.

Bei ausgeschalteter Anlage ergibt sich ein höherer Gebäudeinnendruck (Referenzdruck) als für den abgeglichenen Fall. Dies liegt daran, dass Zu- und Abluftstrang der Lüftungsanlage als Undichtheit auf der Luvseite (mit Überdruck) wirken.

Die für die Drd-Methode relevante Änderung des Gebäudeinnendruckes (Testdruck - Referenzdruck) zeigt Abb. 3-12.

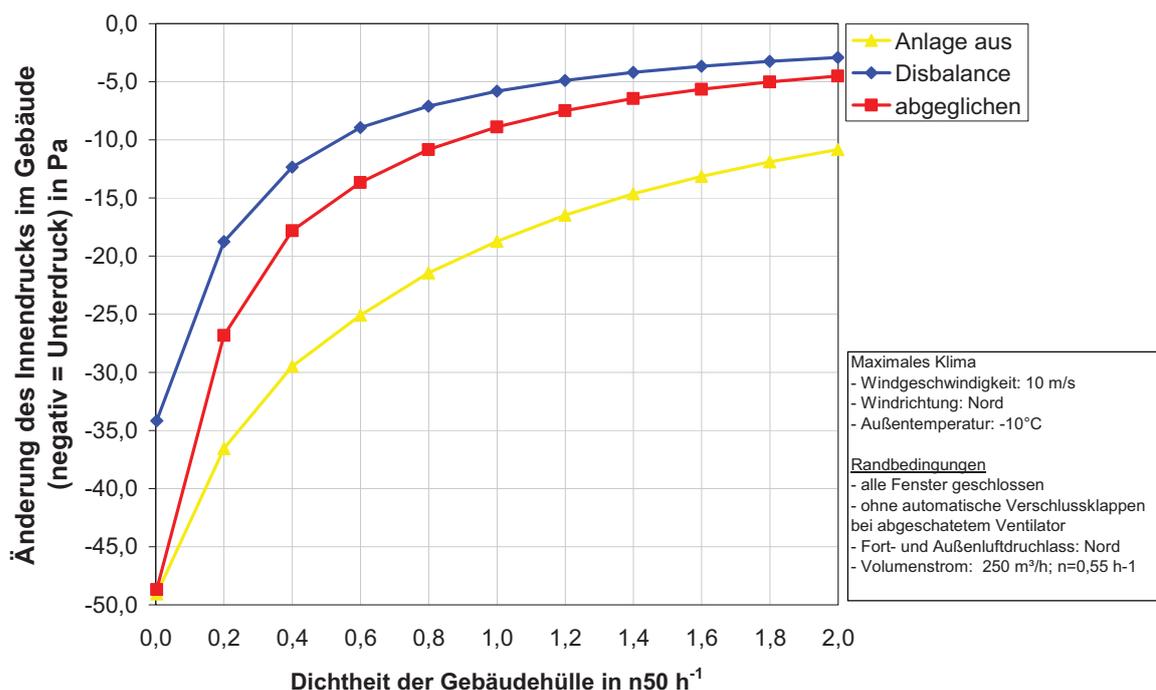


Abb. 3-12: Änderung des Gebäudeinnendruckes bei Abschalten des Zuluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Anlagenzustände beim Bestimmen des Referenzdrucks

Wird der Referenzdruck bei einer Anlage mit Disbalance (Abluftüberschuss) bestimmt, kann über das Abschalten des Zuluftventilators nur eine geringe Änderung des Gebäudeinnendruckes erreicht werden. Die erforderliche Druckänderung von 7,5 Pa wird erst von Gebäuden mit einer Dichtheit $n_{50} \leq 0,8 \text{ h}^{-1}$ erreicht.

Größere Druckdifferenzen ergeben sich beim Ermitteln des Referenzdrucks bei ausgeschalteter Anlage. Da sich insbesondere für Gebäude mit hoher Dichtheit ein positiver Referenzdruck einstellt, ergeben sich höhere Änderungen im Gebäudeinnendruck bei Einschalten des Abluftventilators. Diese Variante stellt somit eine interessante Modifikation der Testsequenz der Drd-Methode dar. Sie wird im nächsten Abschnitt ausführlicher untersucht.

3.9 Referenzdruck bei abgeschalteter Lüftungsanlage

Es hat sich gezeigt, dass die Ermittlung des Referenzdrucks bei abgeschalteter Anlage eine interessante Möglichkeit ist, um die Drd-Methode unabhängig von der richtigen Einstellung der Luftbalance zu machen. Die Testsequenz würde damit folgende Schritte durchlaufen:

1. Normalbetrieb
2. Abschalten von Zu- und Abluftventilator - Messen des Referenzdrucks
3. Einschalten des Abluftventilators (evtl. mehrere Stufen) - messen des Testdrucks.
4. Normalbetrieb

Da der Gebäudeinnendruck bei abgeschalteter Anlage im Wesentlichen durch die Windkräfte bestimmt wird, ist eine Abhängigkeit vom Wetter zu erwarten. Im Folgenden wird neben der Windanströmung von Norden, die Windanströmung aus Süd-West und der Verlauf ohne Wettereinfluss dargestellt.

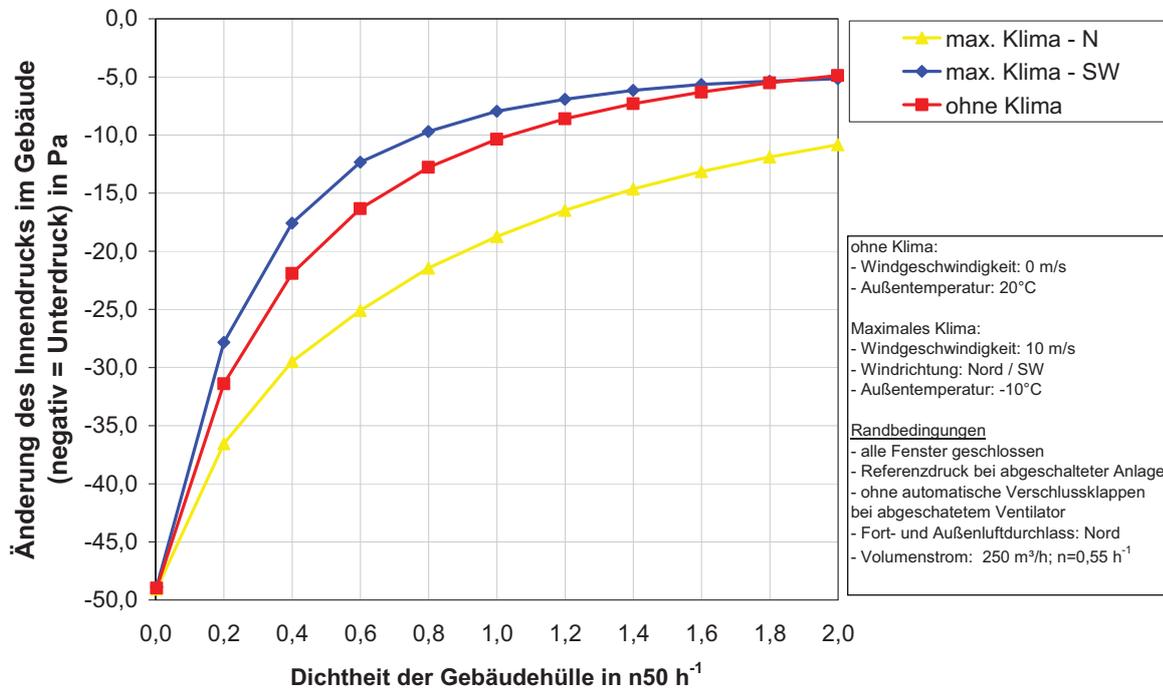


Abb. 3-13: Änderung des Gebäudeinnendrucks beim Einschalten des Abluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Windrichtungen (Referenzdruck bei abgeschalteter Anlage bestimmt)

Es zeigt sich, dass die hohen Druckdifferenzen nur bei der Windanströmung aus Norden (Außen- und Fortluftöffnungen in Luv) auftreten. Ohne Klimaeinfluss liegen die Druckdifferenzen deutlich niedriger. Sie entsprechen der Variante „ohne Klima“ und „abgegliche Anlage“ aus Abb. 3-5. Kommt der Wind aus Süd-West (ungünstigster Fall) reduzieren sich die Druckdifferenzen noch einmal. Die erforderliche Druckdifferenz von 7,5 Pa wird erst bei Gebäuden mit einer Dichtheit von $n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$ erreicht.

Die Druckdifferenzen beim Ermitteln des Referenzdrucks bei ausgeschalteter Anlage sind damit etwas ungünstiger, verglichen mit der ideal abgeglichenen Lüftungsanlage, jedoch etwas günstiger als bei einer Lüftungsanlage mit Disbalance (20 % Abluftüberschusses).

3.10 Testsequenz mit Überdruck

Bisher wurde in der Testsequenz der Zuluftventilator abgeschaltet und so ein Unterdruck im Gebäude aufgebaut. Es ist selbstverständlich auch möglich, den Abluftventilator abzuschalten und so einen Überdruck im Gebäude zu erzeugen.

Die Testsequenz mit Überdruck hat den Nachteil, dass im Winter feuchte Raumluft durch die Fugen in den Bauteilen dringt (Außenwand, Dach, Kellerdecke) und von dort nach außen gedrückt wird. Dies kann unter Umständen zu Kondensation und Tauwasserausfall in den Bauteilen führen. Es ist jedoch entlastend zu bedenken, dass der Testdruck ja nur 6 Mal je Stunde für 30 Sekunden aufgebaut wird (entspricht 5% der Zeit). Es handelt sich also nur um kurzfristige Fluktuationen, wie sie auch sonst wetterbedingt zeitweise auftreten. Es ist also keine wesentliche Änderung der Feuchtbilanz in den Bauteilen zu erwarten.

Ein Vorteil der Überdrucksequenz ist insbesondere beim Vorhandensein einer raumluftabhängigen Feuerstätte gegeben. Wird ein Überdruck aufgebaut, besteht keine Gefahr, dass Rauchgase in die Raumluft gelangen. Es gibt keinen Konflikt mit den gesetzlichen Regelungen zu Feuerungsstätten und Lüftungsanlagen (siehe Abschnitt 5).

Die Druckdifferenzen, die sich bei der Überdrucksequenz gegenüber der abgeglichenen Anlage ergeben, sind in Abb. 3-14 dargestellt.

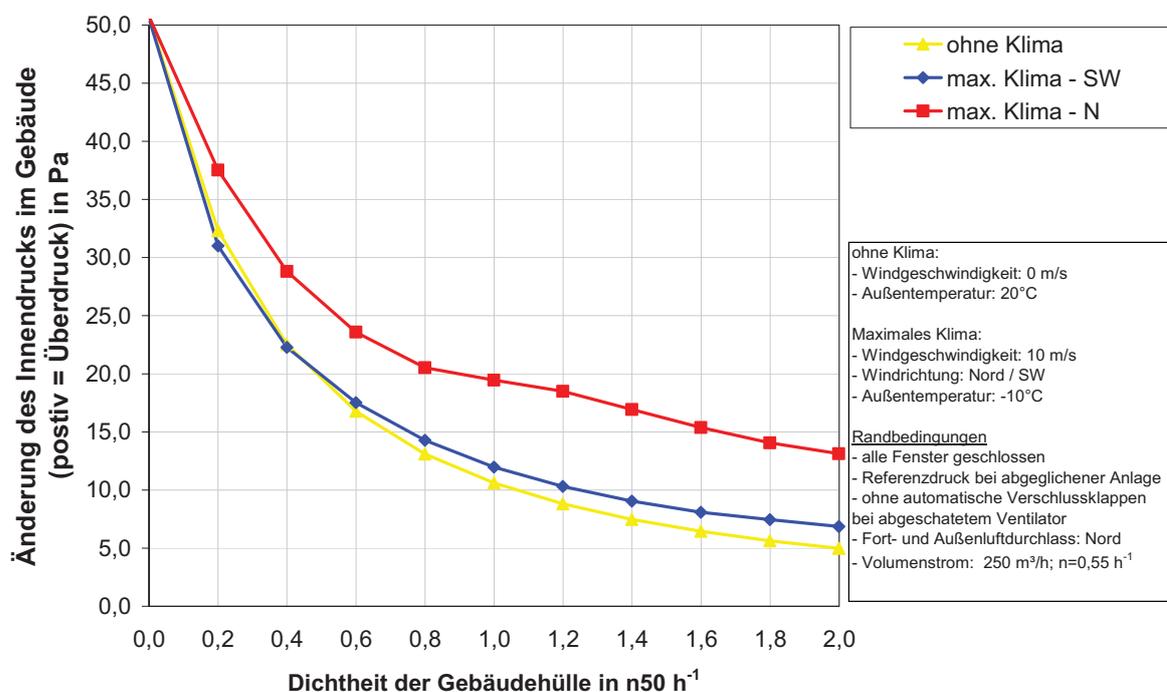


Abb. 3-14: Änderung des Gebäudeinnendrucks bei Abschalten des Abluftventilators (Überdrucksequenz) in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Windrichtungen

Die geringsten Druckdifferenzen ergeben sich (im relevanten Bereich der Gebäudedichtheit) ohne Klimaeinfluss. Die minimal erforderliche Druckdifferenz von 7,5 Pa wird in Gebäuden mit $n_{50} \leq 1,4 \text{ h}^{-1}$ erreicht. Die Anforderungen an die Dichtheit der Gebäudehülle sind damit etwas geringer als bei der Unterdrucksequenz ($n_{50} \leq 1,2 \text{ h}^{-1}$ bei max. Klima Nord).

Wird eine maximale Klimaeinwirkung angenommen, ergibt sich bei einer Windrichtung von Süd-West keine wesentliche Veränderung der Druckdifferenzen. Kommt der Wind aus Norden sind die Druckdifferenzen deutlich höher. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Fort-/Abluftstrang bei abgeschaltetem Abluftventilator als Undichtheit wirkt. Da der Fortluftauslass auf der Nordseite liegt, herrscht hier ein Überdruck. Die Winddrücke begünstigen bei dieser Windrichtung den Aufbau eines Überdrucks im Gebäude.

Im Bereich von $n_{50} = 0,8 \text{ h}^{-1}$ bis $n_{50} = 1,2 \text{ h}^{-1}$ flacht der Abfall der Druckdifferenz für die Windanströmung aus Norden ab (max. Klima – Nord). Dies liegt darin begründet, dass sich die Strömungsrichtung durch den Fort-/Abluftstrang in dem Bereich ändert. Während bei dichteren Gebäuden Luft über den Fort-/Abluftkanal aus dem Gebäude herausströmt (Überdruck im Gebäude), ist bei undichteren Gebäude der Überdruck im Gebäude so weit abgebaut (Windkräfte erzeugen einen Unterdruck im Gebäude), dass die Winddrücke auf der Nordfassade über dem Gebäudeinnendruck liegen. Damit strömt Luft durch den Fort-/Abluftstrang in das Gebäude hinein. Die Δp - V -Kennlinie ist im Bereich kleiner Volumenströme (treten im Bereich des Nulldurchgangs auf) steil, so dass hier eine maximale Beeinflussung der Massenbilanz erfolgt.

3.11 Zusammenfassende Bewertung

Der Einsatzbereich der Drd-Methode zum Erkennen des Fensteröffnungszustandes wird im Wesentlichen durch die Dichtheit der Gebäudehülle bestimmt. Es ist eine Mindestdichtheit unter Nutzungsbedingungen erforderlich, um im Rahmen der Testsequenz bei geschlossenen Fenstern den erforderlichen Unter- bzw. Überdruck im Gebäude aufbauen zu können. Als Testsequenz werden zunächst folgende Betriebsphasen durchführen:

- Normalbetrieb - messen des Referenzdrucks
- Abschalten des Zuluftventilators (evtl. Abluftventilator in mehreren Stufen hochschalten) - messen des Testdrucks.

Zur Definition des Einsatzbereiches in der Parameteruntersuchung wird eine Mindestdruckdifferenz

$$| \text{Testdruck} - \text{Referenzdruck} | \geq 7,5 \text{ Pa}$$

definiert. Kann diese Bedingung erfüllt werden, wird ein erfolgreicher Einsatz der Drd-Methode unterstellt.

Ohne Klimaeinfluss kann die Mindestdruckdifferenz für Gebäude mit $n_{50} \leq 1,3 \text{ h}^{-1}$ erreicht werden. Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung beeinflussen zwar den Gebäudeinnendruck deutlich (10 bis -15 Pa). Bei der Differenzbildung wird der Einfluss jedoch weitgehend eliminiert, so dass die Druckdifferenz zwischen Referenzdruck (abgegliche Anlage) und Testdruck (abgeschalteter Zuluftventilator) weitgehend unabhängig vom Klima ist.

Deutlichen Einfluss auf die Druckdifferenz haben die untersuchten Anlagenparameter. So wird die Druckdifferenz entscheidend von dem Volumenstrom der Lüftungsanlage beeinflusst. Um auf das Anheben der Leistung des Abluftventilators in der Testsequenz von „normal“ ($n = 0,4 \text{ h}^{-1}$) auf den „maximal“ ($n = 0,55 \text{ h}^{-1}$) verzichten zu können, ist eine Gebäudedichtheit von $n_{50} \leq 0,8 \text{ h}^{-1}$ erforderlich.

Liegen Außen- und Fortluftdurchlass nicht auf der gleichen Fassadenseite, wirkt sich dies nur gering auf die Druckdifferenzen aus. An die Lage von Fort- und Außenluft müssen also aus Sicht der Drd-Methode keine zwingenden Anforderungen gestellt werden.

Automatische Verschlussklappen wirken sich positiv auf die Drd-Methode aus. Sie verhindern, dass der Außen-/Zuluftstrang bei abgeschaltetem Zuluftventilator als Undichtheit wirkt. Beim Einsatz von automatischen Verschlussklappen kann selbst bei undichten Gebäuden mit $n_{50} = 2 \text{ h}^{-1}$ die erforderliche Mindestdruckdifferenz aufgebaut werden. Die Drd-Methode kann also für den Fall bei Gebäuden mit eingehaltenen baurechtlich Anforderungen an die Gebäudedichtheit ($n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$) sicher angewendet werden.

Weist die Lüftungsanlage im Normalbetrieb eine Disbalance auf (Referenzdruck), reduziert sich die messbare Druckdifferenz deutlich. Bei einem Abluftüberschuss von 20 % (erzielt durch reduzierten Zuluftvolumenstrom), wird die erforderliche Mindestdruckdifferenz von 7,5 Pa erst von Gebäuden mit einer Dichtheit $n_{50} \leq 0,8 \text{ h}^{-1}$ erreicht.

Als Variante zur bisher untersuchten Testsequenz kann der Referenzdruck auch bei abgeschalteter Lüftungsanlage gemessen werden. Dies hat den Vorteil, dass mögliche Disbalancen keinen Einfluss auf die Druckdifferenz zwischen Test- und Referenzdruck haben. An die Dichtheit der Gebäudehülle werden für diesen Fall jedoch etwa höhere Anforderungen gestellt. So muss $n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$ erreicht werden.

Als weitere Variante der Testsequenz wird der Fall untersucht, dass nicht der Zuluft-, sondern der Abluftventilator abgeschaltet wird. Da hierdurch ein Überdruck im Gebäude erzeugt wird, wird diese Variante als „Überdrucksequenz“ bezeichnet. Die Druckdifferenzen liegen bei der Überdrucksequenz in dem gleichen Bereich wie bei der Unterdrucksequenz. Der Klimaeinfluss ist jedoch etwas geringer, so dass die Einsatzgrenze bei $n_{50} \leq 1,4 \text{ h}^{-1}$ liegt.

Bei der Interpretation der angegebenen Einsatzgrenzen ist zu bedenken, dass bei den Berechnungen unterschiedliche Vereinfachungen getroffen werden. So wird u. a. eine gleichmäßige Verteilung der Leckagen über die Gebäudehülle angenommen und auch der Strömungsexponent der Undichtheiten entspricht einem typischen Wert, der sich beispielsweise von dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen Wert unterscheidet. Vernachlässigt werden auch die internen Druckverluste der Lüftungsgeräte. Diese können im Bereich von 100 Pa liegen. Hierdurch wird die zusätzliche Undichtheit, die der Außen/Zuluft-Strang bei abgeschaltetem Zuluftventilator darstellt, geringer. Durch die internen Druckverluste würde sich der im Gebäude erzielbare Unterdruck erhöhen, und die Einsatzgrenze verbessern. Die theoretischen Ergebnisse müssen durch praktische Ergebnisse untermauert werden.

4 Einsatzrandbedingungen Drd-Methode bei Abluftanlagen

Bisher wurde der Einsatz der Drd-Methode in Anlagen mit geführter Zu- und Abluft betrachtet. Im Folgenden wird untersucht, ob die Drd-Methode auch bei reinen Abluftanlagen eingesetzt werden kann.

Bei Abluftanlagen wird durch den Abluftventilator ein geringer Unterdruck im Gebäude erzeugt. Dies führt dazu, dass Außenluft durch Außenluftdurchlässe in die Zulufräume einströmt. Neben dieser gewünschten definierten Außenluftzufuhr gibt es natürlich auch noch die unkontrollierte Einströmung von Außenluft über die Fugen in der Gebäudehülle. Da dieser Volumenstrom nicht bedarfsgerecht den Zulufräumen zugeführt werden kann, trägt er nur zu einem geringeren Teil zur gezielten Raumlüftung bei. Der Zuluftvolumenstrom über Fugen sollte so gering wie möglich gehalten werden. Nach [Werner 2006] muss der n_{50} -Wert der Gebäudehülle unter 1 h^{-1} liegen, damit mindestens 50 % der Zuluft definiert über die Außenluftdurchlässe zugeführt wird. Bei einer Dichtheit von $n_{50} = 0,5 \text{ h}^{-1}$ strömt etwa 75 % der Zuluft über die Außenluftdurchlässe und nur noch 25 % über Fugen.

Um Aussagen zur Fensteröffnungsstellung machen zu können, müssen wie bei der Zu- und Abluftanlage ein Referenz- und ein Testdruck ermittelt werden. Nur auf diese Weise kann der Einfluss des Klimas und der Lage der Außenmessstelle weitgehend eliminiert werden. Die Ablufttestsequenz wird wie folgt realisiert:

1. Normalbetrieb: der Gebäudeinnendruck wird gemessen (Testdruck)
2. Abschalten: Der Abluftventilator wird abgeschaltet und der Gebäudeinnendruck bei dem aktuellen Wetter bestimmt (Referenzdruck).
3. Normalbetrieb: Der Abluftventilator wird wieder eingeschaltete

Ist die Druckdifferenz zwischen Referenz- und Testdruck größer als eine vorgegebene Maximaldifferenz, wird davon ausgegangen, dass alle Fenster geschlossen sind. Als Grenzwert wird wieder ein Wert von 7,5 Pa angesetzt.

$$| \text{Testdruck} - \text{Referenzdruck} | \geq 7,5 \text{ Pa} \quad \rightarrow \quad \text{alle Fenster geschlossen.}$$

Die Verlässlichkeit der Drd-Methode wird u. a. von der Gebäudedichtheit und dem Wetter beeinflusst. Die Auswirkungen sind in Abb. 4-1 dargestellt.

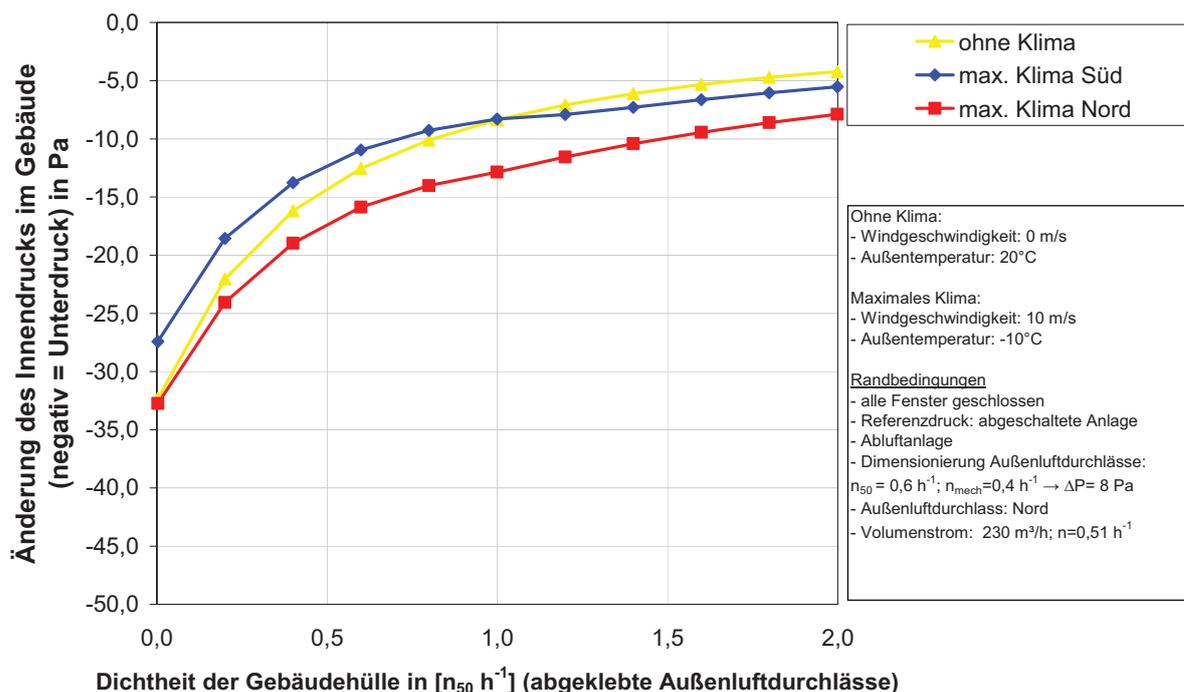


Abb. 4-1: Änderung des Gebäudeinnendruckes beim Einschalten des Abluftventilators in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für unterschiedliche Wetterrandbedingungen

Die Kurven sind flacher als bei der Zu- und Abluftanlage (siehe Abb. 3-7). Dies liegt daran, dass die Außenwanddurchlässe als zusätzliche Undichtheit wirken. Dabei ist der Beitrag der Außenluftdurchlässe größer als der eines offenen Außen-/Zuluftstrangs bei abgeschaltetem Zuluftventilator. Selbst bei einer ideal dichten Gebäudehülle kann durch das Einschalten des Abluftventilators bei der Abluftanlage der Gebäudeinnendruck nur um 27 bis 33 Pa reduziert werden.

Um die maximale Druckdifferenz von 7,5 Pa zu erreichen ist im vorliegenden Fall eine Dichtheit der Gebäudehülle von $n_{50} \leq 1,1 \text{ h}^{-1}$ erforderlich.

Die Wetterrandbedingungen beeinflussen die Druckänderung nur gering. Entscheidend ist hier wieder die Frage, ob der Fortluftkanal in Luv oder Lee liegt. Bei der Windrichtung Nord liegt der Fortluftkanal auf der windzugewandten Seite (Luv). Bei ausgeschalteter Anlage stellt sich aufgrund des Winddrucks auf der Nordfassade ein höherer Gebäudeinnendruck ein als ohne Klimaeinfluss. Entsprechend ergeben sich größere Differenzen durch das Einschalten des Abluftventilators.

Bei der Windrichtung Süd liegt der Fortluftdurchlass auf der windabgewandten Seite (Lee). Bei ausgeschalteter Anlage stellt sich aufgrund des windinduzierten Unterdrucks an der Fassade ein Unterdruck im Gebäude ein. Dieser ist weitgehend unabhängig von der Gebäudedichtheit (siehe auch Abschnitt 3.4). Wird der Abluftventilator eingeschaltet, verstärkt sich

der Unterdruck. Aufgrund des ohnehin hohen Unterdruckniveaus ist der Anstieg bei dichten Gebäuden geringer als ohne Klimaeinfluss (nichtlineare \dot{V} - Δp -Kennlinie).

Durch den Einbau von automatischen Verschlussklappen in den Fort-/Abluftstrang wird die Druckänderung nicht erhöht. Hier wären automatisch schließende Außenluftdurchlässe erforderlich.

Fazit:

Auch in Gebäuden mit Abluftanlage können über die Drd-Methode geöffnete Fenster identifiziert werden. Die Anforderung an die Gebäudedichtheit ist dabei etwas höher als für Anlagen mit Zu- und Abluftanlage. Als Referenzdruck wird der Gebäudeinnendruck bei ausgeschalteter Lüftungsanlage verwendet.

5 Drd-Methode und Verbrennungsluftversorgung von Feuerstätten

Im Rahmen der Drd-Sequenz wird zum Identifizieren der Fensteröffnungsstellung ein Unter- bzw. ein Überdruck im Gebäude erzeugt. Insbesondere bei der Unterdrucksequenz kann hierdurch die Verbrennungsluftversorgung von raumluftabhängigen Feuerungsstätten beeinflusst werden. In diesem Abschnitt werden die entsprechenden Vorschriften und Regeln aufgezeigt und in Bezug auf die Drd-Methode diskutiert (Stand:2011-04).

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Projektes durch Johannes Werner vom Ingenieurbüro ebök durchgeführt und dokumentiert.

5.1 Verbrennungsluftversorgung

In der Fachliteratur wird ausgeführt, dass bei Wärmeerzeugern in der Regel der Schornstein durch Auftrieb auch die Verbrennungsluftversorgung von Feuerstätten sicherstellen muss. Bezogen auf H_u des Brennstoffs Heizöl oder Gas ist ein minimaler Luftbedarf von $0,95 \text{ m}^3_{\text{Norm}}$ je 1 kWh Wärmeinhalt des Brennstoffs notwendig. Unter Berücksichtigung des für vollständige Verbrennung notwendigen Luftüberschuss (Überschusszahl $1,1 \dots 1,5$) sowie des feuerungstechnischen Wirkungsgrades gehen Feuerungs-Anlagenverordnung und TRGI von $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ je 1 kW Nennwärmeleistung des Wärmeerzeugers aus.

Für Holz beträgt die Mindest-Verbrennungsluftmenge $4,1 \text{ m}^3_{\text{Norm}}/(\text{h} \cdot \text{kg})$. Mit einem Heizwert H_u von trockenem Holz bei ca. 4 kWh/kg reicht der oben genannte Mindestwert also auch für Holzfeuerungen aus.

Bei der Dimensionierung von Schornsteinen wird zugrunde gelegt, dass im Allgemeinen der Förderdruck für die Zuluft, der vom Schornstein mit aufgebracht werden muss, maximal 4 Pa beträgt. Bei speziell ausgestatteten Heizräumen können hierfür sogar nur 3 Pa angesetzt werden [Hausladen 1990]. Der Unterdruck im Gebäude zur Förderung der Verbrennungsluft ist für solche Fälle auf maximal 4 Pa begrenzt.

Da Baurecht Länderrecht ist, müssen im Einzelfall die im jeweiligen Bundesland gültigen Regelungen geprüft werden. Die Übersicht über die im Folgenden angegebenen Vorschriften und Richtlinien wurde sorgfältig erstellt, es kann jedoch im Rahmen dieses Berichts keine Haftung für Vollständigkeit übernommen werden.

5.1.1 Musterbauordnung

Auf Basis der aktuellen Musterbauordnung des Bundes wurde eine Feuerungsverordnung in der Fassung vom Februar 1995 formuliert. Dort wird in §3 die Verbrennungsluftversorgung von Feuerstätten geregelt. Für Feuerstätten mit einer Gesamtnennwärmeleistung bis zu 35 kW gilt diese als sichergestellt, wenn der Aufstellraum selbst eine ins freie führende, zu öffnende Tür oder ein zu öffnendes Fenster und zusätzlich einen Rauminhalt von 4 m³ je 1 kW Gesamtnennwärmeleistung hat. Andernfalls kann diese Anforderung auch erfüllt werden durch einen Verbrennungsluftverbund des Aufstellraums mit Räumen der gleichen Wohn- oder Nutzungseinheit, welche die obigen Anforderungen erfüllen. Die Verbrennungsluftöffnungen für einen Verbrennungsluftverbund müssen einen (unverschließbaren) Querschnitt von mindestens 150 cm² haben.

5.1.2 Hessische Landesbauordnung

Aufgrund der Hessischen Bauordnung vom 18. Juni 2002, zuletzt geändert am 28. September 2005, ist die Feuerungsverordnung vom 21. Juni 1977 erlassen.

§ 2 regelt Feuerstätten für feste oder flüssige Brennstoffe. Dort wird die Aufstellung auf solche Räume beschränkt, deren Rauminhalt und natürlicher Luftwechsel eine ausreichende Raumlüftung und Verbrennungsluftzufuhr sicherstellen, ohne dass hierfür quantitative Angaben gemacht werden.

Im Kontext mit Wohnungslüftungsanlagen ist auch Absatz 4 zu beachten.

Feuerstätten für feste oder flüssige Brennstoffe, die die Verbrennungsluft dem Aufstellraum entnehmen, dürfen nicht in Räumen oder Wohnungen aufgestellt werden, aus denen Lüftungsanlagen oder Warmluftheizungsanlagen Luft mit Hilfe von Ventilatoren absaugen, es sei denn, die Anlagen entsprechen den Lüftungsanlagen von Heizräumen nach [§ 14](#) oder wälzen nur Luft innerhalb des Aufstellraums um. Ausnahmen können zugelassen werden, wenn ein gefahrloser Betrieb gesichert ist.

Danach könnten ventilatorgestützte Wohnungslüftungsanlagen in Gebäuden mit Feuerstätten eigentlich nur mit Hilfe der Ausnahmegenehmigung des letzten Satzes betrieben werden.

§ 7 regelt Gasfeuerstätten in vergleichbarer Weise wie § 2. Bei Feuerstätten mit Strömungssicherung wird eine jeweils 150 cm² große obere und untere Öffnung zur Herstellung eines Verbrennungsluftverbunds mit Nachbarräumen gefordert, wenn der Rauminhalt des Aufstellraums selbst weniger als 1 m³ je 1 kW Gesamtnennwärmeleistung beträgt. Absatz 4 bezüglich ventilatorgestützter Lüftungsanlagen entspricht der Regelung in § 2.

5.1.3 DVGW TRGI

Nach § 1 der Ausgabe 1996 erstreckt sich der Geltungsbereich dieser technischen Regel nur auf Gas-Installationen. Allerdings werden in § 5 über die Aufstellung raumluftabhängiger Gasfeuerstätten in „§ 5.5.1 Grundsätzliches zur Verbrennungsluftversorgung“ auch explizit neben Feuerstätten für gasförmige auch solche flüssige Brennstoffe genannt. Hier wird ausgeführt: „Ausreichende Verbrennungsluftversorgung liegt vor, wenn dem Aufstellraum bei einem Unterdruck von nicht mehr als 0,04 mbar (4 Pa) auf natürliche Weise oder durch technische Maßnahmen eine stündliche Verbrennungsluftmenge von 1,6 m³ je 1 kW Gesamtnennwärmeleistung ...zuströmt.“ Insofern ist davon auszugehen, dass diese Forderungen auch für raumluftabhängige Nicht-Gasfeuerstätten gelten.

§ 5.6.1 regelt für Gasgeräte Art C (raumluftunabhängig) ohne Gebläse und mit Gebläse und Zusatzkennzeichnung x die Anforderung. Nur diese dürfen unabhängig von Volumen und Lüftung des Aufstellraums aufgestellt werden. Das Kennzeichen x bedeutet dabei, dass alle unter Überdruck stehenden Teile des Abgasweges entweder Verbrennungsluft umspült sind oder erhöhte Dichtheitsanforderungen erfüllen. Nur ein derartiges Gerät ist also auch unter sicherheitstechnischen Aspekten bezüglich Verbrennungsluft vollständig vom Aufstellraum entkoppelt.

Die aktuelle Ausgabe 2008 formuliert in § 9.2 für Gasgeräte Art B (raumluftabhängig):

„Ausreichende Verbrennungsluftversorgung liegt vor, wenn dem Aufstellraum bei einem Unterdruck gegenüber dem Freien von nicht mehr als 0,04 mbar (4 Pa) auf natürliche Weise oder durch technische Maßnahmen eine stündliche Verbrennungsluftmenge von 1,6 m³ je 1 kW Gesamtnennwärmeleistung der Gasgeräte Art B und der Feuerstätten für flüssige und feste Brennstoffe, soweit sie die Verbrennungsluft dem Aufstellraum entnehmen, zuströmt.“

Abweichend davon ist bei handbeschickten Feuerstätten für feste Brennstoffe, die mit geschlossener Feuerraumtür betrieben werden, ein Verbrennungsluftbedarf von 12,5 m³ je kg Brennstoffdurchsatz anzusetzen; dies entspricht einer Verbrennungsluftmenge von rund 4 m³/h je 1 kW Nennwärmeleistung. Bei Feuerstätten, die mit offenem Brennraum zum Raum betrieben werden können, ist eine fiktive Nennleistung von 340 kW je 1 m² Feuerraumöffnung anzusetzen, bei Brennstoff Gas 225 kW je 1 m².

Die Anrechenbarkeit von Außenluftdurchlässen oder besonderen technischen Anlagen zur Sicherstellung ausreichender Verbrennungsluftversorgung wird erläutert sowie ein messtechnisches Nachweisverfahren dafür skizziert.

5.1.4 Bauaufsichtliche Richtlinie über Lüftung fensterloser Küchen, Bäder und Toilettenräume

Die DIBt- Musterfassung der Richtlinie stammt aus dem Jahr 1988. Eine aktuelle Umsetzung der Richtlinie aus dem Land Brandenburg vom 15. April 2010 führt Folgendes zum Betrieb von Lüftungsanlagen und Feuerstätten im Gebäude aus.

- aus § 2: ... Außenluftöffnungen, Leitungen vom Freien und Lüftungsanlagen mit Ventilator sind so zu bemessen, dass sich für den planmäßigen Zuluftvolumenstrom rechnerisch kein größerer Unterdruck in der Wohnung als 8 Pa gegenüber dem Freien ergibt. Befinden sich in der Wohnung raumluftabhängige Feuerstätten, sind die Öffnungen, Leitungen und Lüftungsanlagen so zu bemessen, dass sich für die Summe aus dem planmäßigen Zuluftvolumenstrom und dem Verbrennungsluft-Volumenstrom (= 1,6 m³/h je kW Nennleistung) kein größerer Unterdruck in der Wohnung als 4 Pa gegenüber dem Freien errechnet. Anlagentechnisch muss gewährleistet sein, dass die Feuerstätten nur bei ausreichender Verbrennungsluftversorgung betrieben werden können. ...

5.1.5 DIN 18017-3: Lüftung von Bädern und Toilettenräumen ohne Außenfenster mit Ventilatoren

Die baurechtlich eingeführte DIN 18017-3 zur ventilatorgestützten Entlüftung fensterloser Sanitärräume setzt in der inzwischen zurückgezogenen Ausgabe vom August 1990 laut § 1 voraus, dass Zuluft ohne besondere Zuluftleinrichtungen durch die Undichtheiten in den Außenbauteilen nachströmen kann, und begrenzt dazu die Luftwechselrate von Anlagen gemäß dieser Norm auf maximal 0,8 /h. Eine Einhaltung spezieller Differenzdrücke ist nicht genannt.

Angabe 2009 von DIN 18017-3 begrenzt den Auslegungs-Differenzdruck in Wohneinheiten bei der Bemessung von Außenluftdurchlässen in § 4.2.2 allgemein auf 8 Pa (ohne Angabe von Gründen), bei Vorhandensein von raumluftabhängigen Feuerstätten auf 4 Pa. Überströmdurchlässe müssen nach § 4.2.3 so dimensioniert sein, dass bei geschlossenen Innentüren der Druckabfall auf maximal 1,5 Pa begrenzt ist.

5.1.6 DIN 1946-6:1998-10: Lüftung von Wohnungen

Die inzwischen veraltete Ausgabe der Norm, die auch nicht baurechtlich eingeführt war, führt in § 4.2.1 Folgendes aus:

„Entlüftungsanlagen dürfen in Wohnungen, in deren Wänden Schornsteine angeordnet sind, keinen größeren Unterdruck gegenüber dem Freien als 4 Pa erzeugen. In anderen Wohnungen darf kein größerer Unterdruck als 8 Pa erzeugt werden. Die Unterdrücke berücksichtigen keinen Windeinfluss.“

Weitere Hinweise oder Quellen für diese Grenzwerte werden nicht angegeben.

5.1.7 Entwurf DIN 1946-6 vom Dezember 2006

Der Normentwurf hat als Entwurf per se keine Gültigkeit, formuliert aber die Meinung der beteiligten Fachleute. Hinsichtlich des zur Bemessung von Lüftungsanlagen anzusetzenden Differenzdrücke an der Gebäudefassade führt er in § B3.2.1 aus:

„Der Differenzdruck darf in Wohnungen mit raumluftabhängigen Feuerstätten nicht mehr als 4 Pa, in anderen Wohnungen nicht mehr als 8 Pa betragen.“

In § 5.2.2 wie auch an anderen Stellen wird zur Druckstufe 8 Pa erläuternd ausgeführt:

Es ist zu beachten, dass der zugrunde zu legende Unterdruck gegenüber dem Freien beim planmäßigen Abluftvolumenstrom für die Grundlüftung nicht größer als 8 Pa sein darf, um Strömungsgeräusche im Bereich vorhandener Undichtheiten zu vermeiden.

§ 1 des Normentwurfs enthält den Satz

Zuluftsysteme sind nicht Bestandteil dieser Norm.

In der Übersicht über Systeme der Wohnungslüftung (Bild 1 des Entwurfs) sind Zuluftsysteme dargestellt. Sie werden allerdings nicht weiter detailliert und sind mit einem Hinweis auf § 1 (s. o.) versehen.

5.1.8 DIN 1946-6:2009-05: Lüftung von Wohnungen

Diese aktuelle Norm ist baurechtlich nicht eingeführt. Jedoch wird in der inzwischen in allen Bundesländern baurechtlich eingeführten DIN 4108-2:2003-07 in § 4.2.3 darauf hingewiesen, dass im Winter auf einen ausreichenden Luftwechsel zu achten ist. Zur Planung entsprechender Maßnahmen wird dort undatiert auf DIN 1946-6 verwiesen; dadurch wird die jeweils aktuelle Fassung der Norm in Bezug genommen.

Neben balancierten Lüftungsanlagen und Abluftanlagen regelt diese Fassung der DIN 1946-6 jetzt auch Zuluftanlagen. Nach Tabelle B.1, Zeile 2.2.5 bestehen beim Betrieb zusammen mit Feuerstätten keine besonderen Anforderungen an Zuluft- Lüftungssysteme. Bei Abluft- und Zu- /Abluft-Systemen werden jedoch Geräte mit einer F-Kennzeichnung gefordert; solche Geräte und Systeme müssen besondere Eigenschaften nachweisen, um zum gleichzeitigen oder wechselweisen Betrieb mit einer raumluftabhängigen Feuerstätte geeignet zu sein. DIN 4719:2009-07 fordert dabei unter anderem, dass der Abluftüberschuss maximal 10% betragen darf.

Der zur Auslegung von Außenluftdurchlässen zulässige Differenzdruck nach außen ist in § 6.2 Tabelle 10 abhängig vom Lüftungssystem dargestellt; er beträgt im Maximalfall 8 Pa. Zur Begründung heißt es in Fußnote f:

„Der Differenzdruck darf nicht größer als 8 Pa gewählt werden, um Strömungsgeräusche bzw. das Wirken unzulässig großer Kräfte an Türen zu vermeiden. Sind raumluftabhängige Feuerstätten vorhanden, dürfen 4 Pa nicht überschritten werden.“

5.1.9 Merkblatt der Schornsteinfegerinnung

Im Februar 2006 hat die Schornsteinfegerinnung ein aktualisiertes Merkblatt zum Betrieb von Feuerstätten und Lüftungsanlagen veröffentlicht, das den Stand der Anforderungen bezüglich ventilatorgestützter Lüftung und Feuerstätten festlegt (siehe Datei Feuerstaette_Lueftungsanlage_060208.pdf).

Danach sind bei einer regelgerecht installierten raumluftunabhängigen Feuerstätte nach einer Produktnorm oder mit einer bauaufsichtlichen Zulassung des DIBt keine weiteren Maßnahmen bezüglich Ventilator gestützter Lüftung zu ergreifen.

Bei raumluftabhängigen Feuerstätten wird eine externe Verbrennungsluftzufuhr empfohlen. Die Feuerstätte muss mit einer Sicherheitsausrüstung nach Produktnorm oder mit DIBt- Zulassung ausgestattet sein, die mit der Regelung der Lüftungsanlage verbunden wird. Marktverfügbare Sicherheitseinrichtungen mit DIBt- Zulassung überwachen den Unterdruck am Abgasstutzen der Feuerstätte und können den Lüfterbetrieb beeinflussen; im einfachsten Fall wird die Lüftungsanlage abgeschaltet, wenn der Unterdruck am Abgasstutzen nicht mehr ausreicht.

5.2 Funktionale Betrachtung und Bewertung der Regelungen

Schutzziel der Verordnungen und technischen Regeln ist unter anderem die Sicherstellung einer vollständigen Verbrennung zur Minimierung des Kohlenmonoxidgehalts im Abgas sowie zu einer Verhinderung des Austritts giftiger Verbrennungsgase in die Räume.

Da bei der Auslegung von Schornsteinen für die Förderung der Verbrennungsluft über die Gebäudehülle ein Druckbeitrag von 4 Pa berücksichtigt ist, darf auch bei gleichzeitigem Betrieb einer ventilatorgestützten Lüftungsanlage und einer Feuerstätte kein größerer Unterdruck im Raum entstehen.

Bezüglich eines Überdrucks im Aufstellraum einer Feuerungsanlage wurden im Rahmen der Recherche keine sicherheitstechnisch bedingten Einschränkungen gefunden. DIN 1946-6:2009-05 stellt sogar explizit fest, dass eine Zuluftanlage auch in Gebäuden mit raumluftabhängigen Feuerstätten ohne weitere Anforderungen betrieben werden darf (s.o.).

5.2.1 Allgemeiner Grenzwert 8 Pa Unterdruck

Eine Begrenzung des zulässigen Unterdrucks auf generell nicht mehr als 8 Pa, unabhängig von Existenz oder Art einer Feuerstelle, eines Schornsteins oder einer Abgasleitung, ist die weitest gehende Anforderung und findet sich in der länderspezifischen Umsetzung der BRL im Land Brandenburg; sie ist dort jedoch nicht inhaltlich begründet. Die gleiche Forderung findet sich wieder in der veralteten Fassung von DIN 1946-6:1998-10, die in den Bundesländern ebenfalls nicht baurechtlich eingeführt war. Im Entwurf 2006 von DIN 1946-6 wurde diese Forderung mit der Begründung aufgeführt, Geräuscheinwirkungen oder ungewöhnlich große Kräfte bei der Betätigung von Fenstern und Türen zu vermeiden; Die gleichen Argumente führt DIN 1946-6:2009-05 für die Ausführungen an. Eine Begrenzung des Unterdrucks im Auslegefall auf maximal 8 Pa dient demnach nicht dem Schutzziel des Lebens- und Gesundheitsschutzes, den die Bauordnungen und nachgeordnete Verordnungen sicherstellen sollen.

Fläche	Differenzdruck Lüftungsanlage	Kraft	Vergleichbare Windgeschwindigkeit
m ²	Pa	N	m/s
2 m ²	4	8	3,7
2 m ²	8	16	5,2
2 m ²	10	20	5,8

Abb. 5-1: Druckbedingte Kraft auf einen Türflügel (2 m * 1 m) und Windgeschwindigkeit, die zum gleichen Staudruck führen würde ($dP_{\text{Stau}} = dP_{\text{Lüftungsanlage}}$).

Wie ein Blick auf Abb. 5-1 zeigt, entsprechen Differenzdrücke von 8 bzw. 10 Pa dem Staudruck von Windgeschwindigkeiten von 5,2 bzw. 5,7 m/s.

Die druckbedingte Kraft auf einen Türflügel steigt zwischen 8 und 10 Pa um 25% auf 20 N. Im Gegensatz zum Staudruck durch Starkwind bricht eine gebläseerzeugte Druckdifferenz im Falle von Wohnungslüftung schlagartig zusammen, sobald das Türblatt auch nur leicht aufsteht. In Hinsicht auf das angestrebte Schutzziel wäre also sicher auch eine etwas höhere Druckdifferenz von 10 Pa vertretbar.

5.2.2 Grenzwert 4 Pa Unterdruck in Gebäuden mit Schornstein

Musterbauordnung, Landesbauordnung und TRGI formulieren die Forderung des Grenzwerts von maximal 4 Pa Unterdruck für den Aufstellraum der Feuerstätte bzw. sinngemäß auf die im Luftverbund stehenden Räume einer Wohneinheit, die auch zum Nachweis eines Verbrennungsluftverbunds herangezogen werden können.

In Gebäuden mit mehreren Wohneinheiten kann es vorkommen, dass Schornsteinzüge durch Wohneinheiten ohne eigene Feuerstätte verlaufen. Dies ist z. B. der Fall in Mehrfamilienhäusern mit einem gemeinsamen Wärmeerzeuger in einem Heizraum. Hier beständen nach den Regelungen der Bau- und Feuerungsverordnungen keine sicherheitsrelevanten Begrenzungen des Differenzdrucks in den Wohneinheiten ohne eigene Feuerstätten. Es ist zumindest dem Autor aus der Praxis auch nicht bekannt, dass in solchen Gebäuden der Einbau von Dunstabzugshauben für Abluftbetrieb vom Schornsteinfeger zu genehmigen wäre. Unter diesem Gesichtspunkt geht die Forderung der alten DIN 1946-6:1998-10 eines Grenzwerts von 4 Pa in Wohnungen (ohne eigene Feuerstätten), in deren Wände Schornsteine verlaufen, über die Forderungen der Muster-Bau- und Feuerungsverordnung hinaus. Eine Begründung hierfür ist nicht angegeben. Funktional ist es zwar sinnvoll, den Unterdruck in solchen Wohnungen zu begrenzen, um bei lokalen Undichtheiten der Schornsteinwangen den Eintritt von Verbrennungsgasen in die Wohnung zu verhindern. Allerdings ist ein Grenzwert von 4 Pa hierzu nicht notwendig. Wenn der vom Schornstein per Thermik aufgebrachte Unterdruck schon an der Eintrittsöffnung der Verbrennungsluft in die Feuerstätte mindestens 4 Pa beträgt, so müsste er spätestens ab dem heißen vertikalen Verbindungsstück der Feuerstätte zum Kamin wesentlich größer sein, da hier die volle Kaminhöhe auftriebswirksam ist. Erst in der Nähe des Kaminkopfes kann der Unterdruck eigentlich wieder auf geringe Werte absinken. Im Bereich von Wohnungen oberhalb der Feuerstätte herrscht damit ein größerer Unterdruck, so dass unter den Schutzaspekten auch ein höherer Unterdruck akzeptierbar sein müsste. In der aktuellen Fassung von 2009 ist diese Forderung ersatzlos entfallen.

Bezüglich der Überschreitung des zulässigen Unterdrucks von 4 Pa bei der DRD-Methode in Verbindung mit raumluftabhängigen Feuerstellen ist weiter zu beachten, dass dies höchstens kurzfristig zu Eintritt von Verbrennungsgasen in den Raum führt, der in Bezug auf das Raumluftvolumen auch nur relativ geringe Immission verursacht. Ähnliche kurzfristige Effekte treten vermutlich auch ohne Stördruck der Lüftungsanlage während der DRD-Phase allein aufgrund von Winddruckschwankungen oder beim Öffnen der Beschickungstür einer Feststoff-Feuerstelle auf.

Genauereres müsste bei Bedarf recherchiert werden.

5.2.3 Zulässige Gebäudedichtheit

Das in den technischen Regeln angesetzte vereinfachte Kriterium eines Luftverbundes über ein Raumvolumen von 4 m³ je 1 kW Nennwärmeleistung der Feuerung bedeutet eine Luftwechselrate bei 4 Pa von $n_4 \geq 0,4$ /h. In der folgenden Tabelle sind die Zusammenhänge zwischen n_{50} und n_4 dargestellt; sie gehorchen der Beziehung

$$n_4 / n_{50} = 4^n / 50^n$$

$n_{50} = f(n_4)$										
n_4	1/h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	
n_{50}	1/h	0,54	1,08	1,62	2,15	2,69	3,23	3,77	4,31	
$n_4 = f(n_{50})$										
n_{50}	1/h	0,3	0,6	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	
n_4	1/h	0,06	0,11	0,19	0,28	0,37	0,56	0,74	0,93	

Abb. 5-2: Erforderliche Durchlässigkeit der Gebäudehülle n_{50} für Verbrennungsluftversorgung über Fugen (zulässiger Bereich grün hinterlegt)

Die notwendige Durchlässigkeit ist demnach erst bei n_{50} -Werten von 2,2 /h und höher vorhanden. In luftdichten Gebäuden mit $n_{50} < 1,5$ /h, die als Randbedingung zum wirksamen Betrieb ventilatorgestützter Lüftungsanlagen erforderlich sind, wird die volumenbezogene Anforderung in der Regel nicht erfüllt sein. Insbesondere ist festzuhalten, dass bei den heute baurechtlich geforderten Dichtigkeiten der Schließfugen öffentlicher Fenster und Türen die Forderung nach Räumen mit ebensolchen kein ausreichendes Indiz für lokale Undichtheiten mehr ist. Nach der aktuellen TRGI können geplante ALD, die beim Gebäude-Drucktest geschlossen sind, unter bestimmten Umständen bei der Verbrennungsluftversorgung berücksichtigt werden.

5.2.4 Einfluss von Disbalance auf den Differenzdruck

Bei regulärem Betrieb von balancierten Lüftungsanlagen sollte die Disbalance zwischen Zu- und Abluftmassenströmen 10 % nicht wesentlich überschreiten. Geht man von einer mechanisch erzeugten Luftwechselrate in Höhe von maximal 1,0 /h aus, so ergibt sich eine erzwungene In- oder Exfiltrationsrate von maximal 0,1 /h. Mit dieser Obergrenze der Disbalance bei regulärem Betrieb der Lüftungsanlage wird der sicherheitsrelevante Wert des Differenzdruck von 4 Pa nur bei sehr dichten Gebäuden mit $n_{50} \leq 0,3$ /h überschritten (siehe folgende Tabelle). Vernachlässigt sind hierbei die Luftergiebigkeit des Außen-Zu-Luftkanals bzw. Ab-Fort-Luftkanals sowie die Disbalance durch die Entnahme der Verbrennungsluft.

Disbalancierte Luftwechselrate $n_{Ldis,dP}$ [1/h] zum Erreichen eines Differenzdrucks dP an der Gebäudehülle						
Gebäudekennwert n_{50} [1/h]		3,0	1,5	1,0	0,6	0,3
Differenzdruck Hülle dP [Pa]						
50		3,00	1,50	1,00	0,60	0,30
15		1,34	0,67	0,45	0,27	0,13
10		1,03	0,51	0,34	0,21	0,10
8		0,88	0,44	0,29	0,18	0,09
4		0,56	0,28	0,19	0,11	0,06

Abb. 5-3: Disbalancierte Luftwechselrate $n_{Ldis,dP}$ h^{-1} zum Erreichen eines Differenzdrucks an der Gebäudehülle

5.2.5 Bewertung von Überdruck in Gebäuden

Unter Sicherheitsaspekten bezüglich Eintritt von Verbrennungsgasen in den Aufenthaltsbereich von Personen ist ein Überdruck gegenüber den Feuerstätten und Abgaswegen ohne Bedeutung. Dementsprechend finden sich in der Normung auch keine solchen Beschränkungen, die aktuelle DIN 1946-6 fordert so auch keine speziellen Eigenschaften von Zuluftsystemen. Eine Begrenzung der Druckdifferenz muss unter Berücksichtigung anderer Aspekte wie Strömungsgeräusche, Zugscheinungen, Kräfte auf Tür- oder Fensterblätter erfolgen. Die bei Überdruck auftretenden Kräfte entsprechen denen bei Unterdruck, nur die Richtung ist entgegengesetzt.

Ein limitierender Faktor bezüglich Überdruck könnte auch das bauphysikalische Feuchterisiko von Undichtheiten der Gebäudehülle darstellen, die von Innen nach Außen durchströmt werden. Nach mündlichen Informationen im Rahmen der Recherche wurden Zuluftanlagen, die einen Überdruck in der Wohneinheit erzeugen, aus diesem Grund nicht in EDIN 1946-6:2006-12 aufgenommen, obwohl sie in der übergeordneten europäischen Norm enthalten sind.

So lange sich Dauer der Überdruckphasen und Höhe der Druckdifferenzen höchstens in der gleichen Größenordnung bewegen, wie sie auch wetterbedingt auftreten, ist kein Grund für ein erhöhtes Schadensrisiko zu sehen. Zudem weisen Zwischenergebnisse von aktuell laufenden Untersuchungen der Feuchtebilanz von Bauteilen bei gerichteter Durchströmung aus, dass das Schadensrisiko einer Durchströmung nach außen in der Regel nicht erhöht ist. Ausnahme ist ein spezieller Fugentyp, bei der die Strömung unterhalb der kalten Außenseite seitlich umgelenkt wird und so nicht direkt nach Außen austreten kann [Kempkes 2005]. Bei der Neuformulierung der Ausgabe 2009 von DIN 1946-6 wurden aus diesem Grund Zuluftanlagen ohne Einschränkung wieder in die Normung aufgenommen.

Insofern bestehen keine Bedenken, die DRD- Methode auch mit Überdrücken umzusetzen, wenn der Differenzdruck auf 8 bis 10 Pa begrenzt bleibt.

6 Reaktionen der Lüftungsanlage

Die Information über die Häufigkeit der Fensteröffnung kann genutzt werden, um das Zusammenspiel von Fensteröffnung und der mechanischen Lüftungsanlage zu verbessern. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten aufgezeigt:

- Automatisches Anpassen des Volumenstroms bei geöffneten Fenstern (Abschnitt 6.1)
- Nutzerinformation über die Fensteröffnungshäufigkeit (Feedback) (Abschnitt 6.2)

Steht die Lüftungsanlage in Kombination mit einer Abluftwärmepumpe oder einer Luftheizung, so muss beachtet werden, dass bei einer automatischen Volumenstromanpassung auch diese Anlagenerweiterung in der Wirkung beeinflusst werden.

6.1 Automatisches Anpassen des Volumenstroms

Wird festgestellt, dass Fenster geöffnet sind, kann die Lüftungsregelung hierauf automatisch mit einer Veränderung des Volumenstroms reagieren. Eine Reduktion des Zuluftvolumenstroms bei geöffnetem Fenster vermeidet Doppellüftung über Fenster und Lüftungsanlage. Hierdurch werden der Stromverbrauch der Ventilatoren reduziert und die Lüftungswärmeverluste insbesondere bei Anlagen ohne Wärmerückgewinnung begrenzt.

Die Anpassung des Volumenstroms kann dabei die folgenden Ziele verfolgen,

- Energieorientierter Betrieb: Zielgröße dieser Regelstrategie ist die Reduktion des Energieverbrauchs bei noch vertretbarer Luftqualität. Betrachtet werden der Stromverbrauch der Ventilatoren und der durch die Lüftung bedingte Teil des Heizenergieverbrauchs. Sinnvoll ist der energieorientierte Betrieb insbesondere bei Abluftanlagen oder bei Zu- und Abluftanlagen mit wenig effizienter oder ohne Wärmerückgewinnung.
- Komfortorientierter Betrieb: Zielgröße dieser Regelstrategie ist eine hohe Luftqualität bei vertretbarem Energieverbrauch. Sinnvoll ist der komfortorientierte Betrieb insbesondere bei Zu- und Abluftanlagen mit hocheffizienter Wärmerückgewinnung, wie sie in der Regel in Passivhäusern eingebaut werden. Durch die Wärmerückgewinnung sind die Lüftungswärmeverluste bereits deutlich reduziert, so dass die Wahl des Anlagenluftwechsels vermehrt nach Komfortkriterien erfolgen kann.

Im Weiteren werden Möglichkeiten aufgezeigt, den Volumenstrom der Lüftungsanlage bei geöffneten Fenstern automatisch zu modifizieren. Als Basis wird dreistufige Steuerung des Volumenstroms angenommen. Wird die energieorientierte und komfortorientierte Betriebsweise ergänzt, ergeben sich beispielsweise an der Lüftungsregelung (Steuerung) folgende Wahlmöglichkeiten für den Bewohner:

1. Anlage aus
2. Minimum: Volumenstromstufe I: z. B. 70 % des Nennvolumenstroms (entspricht „Reduzierter Lüftung“ nach DIN 1946 Teil 6)
3. Normal: Volumenstromstufe II: z. B. 100 % des Nennvolumenstroms (entspricht „Nennlüftung“ nach DIN 1946 Teil 6)
4. Maximum: Volumenstromstufe III: z. B. 130 % des Nennvolumenstroms (entspricht „Intensivlüftung“ nach DIN 1946 Teil 6)
5. Automatische Volumenstromanpassung: Energieorientierter Betrieb
6. Automatische Volumenstromanpassung: Komfortorientierter Betrieb

Ein Vorschlag, wie der Volumenstrom bei geöffneten Fenstern durch die Lüftungsregelung angepasst werden kann, ist in Abb. 6-1 dargestellt. Diese Vorschlagswerte müssen in der Praxis überprüft und gegebenenfalls modifiziert werden.

Für Zu- und Abluftanlagen sowie reine Abluftanlagen wird jeweils eine Volumenstromstufe für den energie- und den komfortorientierten Betrieb genannt. Dabei wird unterschieden, ob die Fensteröffnung innerhalb oder außerhalb der Heizzeit erfolgt und ob die Fenster in den letzten Tagen häufig oder nur gelegentlich geöffnet wurden. Zur Festlegung des Zeitintervalls, ab dem eine Fensteröffnung „häufig“ vorliegt, sind weitere Erfahrungen insbesondere aus Messungen erforderlich. Als Anhaltswert können zunächst folgende Werte verwendet werden:

In der Heizzeit häufig bei Fensteröffnung > 6 Stunden pro Tag

Außerhalb der Heizzeit häufig bei Fensteröffnung > 12 Stunden pro Tag.

Der Vorschlag für die Volumenstromanpassung in Abb. 6-1 sollte vor dem Hintergrund folgender Punkte betrachtet werden.

- Die Anpassung des Volumenstroms erfolgt nur bei geöffneten Fenstern. Sind die Fenster geschlossen wird der Volumenstrom nicht modifiziert bzw. über andere Vorgaben bestimmt.
- Da die Anzahl und die Lage (Zuluft- oder Abluftraum, Wohn- oder Schlafräum) von geöffneten Fenstern über die Drd-Methode nicht festgestellt werden können, kann eine Volumenstromanpassung nicht in allen Fällen zu einem optimalen Ergebnis in Bezug auf die Luftqualität führen. Die Akzeptanz bei den Bewohnern muss durch eine Befragung einer größeren Anzahl von Personen ermittelt werden.
- Die automatische Volumenstromanpassung muss vom Bewohner an der Regelung ausgewählt bzw. auch abgewählt werden können.
- Die von der Regelung vorgegebene Volumenstromstufe sollte dem Bewohner mitgeteilt und eine Reduktion aufgrund von Fensteröffnung ausgewiesen werden. So kann der Be-

wohner die Volumenstromstufe durch Schließen der Fenster beeinflussen oder an der Regelung eine andere Betriebsweise wählen.

- Die Volumenströme von Zu- und Abluftstrang können bei geöffnetem Fenster unabhängig voneinander eingestellt werden, da Disbalancen über das geöffnete Fenster ausgeglichen werden. So zeigen die bisherigen Messungen zur Drd-Methode [Großklos 2002], dass bei geöffnetem Fenster selbst bei maximaler Disbalance (Abluft max; Zuluft aus) eine Zunahme des Unterdrucks um 5 Pa nicht auftritt. Nutzungseinschränkungen durch schwer öffnbare Fenster oder Türen oder Probleme im Zusammenspiel mit häuslichen Feuerstätten sind also nicht zu erwarten. Angemerkt sei jedoch, dass der Absolutwert des Unterdrucks insbesondere bei geöffnetem Fenster sowohl auf Windgeschwindigkeit und Windrichtung (Luv und Lee) als auch auf unterschiedliche haustechnische Geräte und Anlagen zurückzuführen ist. Ein Einhalten der 4 Pa-Grenze (siehe Abschnitt 5) kann somit prinzipiell nicht garantiert werden. Auch durch die Regelung der Lüftungsanlage kann dieses Problem nicht entscheidend entschärft werden.

Regelungsziel	Heizzeit	Fensteröffnung	Zu- und Abluftanlage		Abluftanlage	
			Zuluftvolumenstrom	Abluftvolumenstrom	Abluftvolumenstrom	Abluftvolumenstrom
Energieorientiert	Innerhalb	Gelegentlich	Minimum	Minimum	Minimum	Minimum
		Häufig	Aus	Minimum	Minimum	Minimum
	Außerhalb	Gelegentlich	Aus	Minimum	Minimum	Minimum
		Häufig	Aus	Aus	Aus	Aus
Komfortorientiert	Innerhalb	Gelegentlich	Normal	Normal	Normal	Normal
		Häufig	Minimum	Minimum	Minimum	Minimum
	Außerhalb	Gelegentlich	Minimum	Minimum	Minimum	Minimum
		Häufig	Aus	Minimum	Minimum	Minimum
Komfortorientiert / Energieorientiert mit Luftqualitäts- und Feuchte- sensor in der Abluft	Innerhalb	Gelegentlich	Normal / Minimum	Minimum bis Maximum	Minimum bis Maximum	Minimum bis Maximum
		Häufig	Minimum / Aus	Minimum bis Maximum	Minimum bis Maximum	Minimum bis Maximum
	Außerhalb	Gelegentlich	Minimum / Aus	Minimum bis Maximum	Minimum bis Maximum	Minimum bis Maximum
		Häufig	Aus / Aus	Aus bis Maximum	Aus bis Maximum	Aus bis Maximum

Abb. 6-1: Mögliche Volumenstromanpassung bei geöffneten Fenstern

Der Festlegung der Volumenströme liegen einige prinzipielle Überlegungen zu Grunde, die vor der Diskussion der konkreten Ausprägungen dargestellt werden sollen.

Ein Abschalten des Zuluftventilators ist aus energetischer Sicht nicht in jedem Fall sinnvoll. Es kann die Bewohner zu einem vermehrten Fensteröffnen veranlassen. Wird beispielsweise ein Fenster z. B. im Gäste-WC des Erdgeschosses geöffnet, so leistet dies keinen Lüftungsbeitrag für z. B. die Schlafzimmer im Dachgeschoss. Würde der Zuluftventilator abgeschaltet, würde sich in dem Beispiel die Luftqualität in den Schlafräumen deutlich verschlechtern. Dies könnte zur Folge haben, dass die Bewohner die Fenster auch in diesen Räumen öffnen. Der Zuluftventilator sollte in der Heizzeit deswegen eine gewisse Grundversorgung mit Zuluft sichern.

Durch die gerichtete Gebäudedurchströmung von den Zulufräumen über die Flure in die Ablufträume wird die Geruchsbelästigung z. B. von der Toilette vermieden. Um dies zu gewährleisten, wird beim der komfortorientierten Betriebsweise der Abluftvolumenstrom nicht unter Minimum reduziert.

Ein häufiges Öffnen der Fenster außerhalb der Heizzeit wird dahingehend interpretiert, dass die Bewohner das Gebäude über die Fenster belüften möchten. Je nach gewählter Betriebsweise wird die Anlage herunter- oder ausgeschaltet.

Bei Abluftanlagen beeinflusst eine Veränderung des Abluftvolumenstroms auch den Zuluftvolumenstrom. So baut der Abluftventilator bei diesem Lüftungsanlagentyp einen leichten Unterdruck im Gebäude auf, wodurch Außenluft über die Außenwanddurchlässe in die Zulufräume strömt. Bei geöffneten Fenstern kann der erforderliche Unterdruck nicht oder nur in deutlich geringerem Umfang aufgebaut werden. In dem Fall ist die Zuluftversorgung über die Außenwanddurchlässe nur noch in sehr begrenztem Umfang gegeben. Die Zuluft wird im Wesentlichen über das geöffnete Fenster in das Gebäude einströmen. Als begrenzender Faktor für einen vollständigen Lüftungskurzschluss wirkt, bei einer geschlossenen Innentür im Raum mit dem geöffneten Fenster, eine korrekt dimensionierte Überströmöffnung. Da die Zuluftversorgung im Fall von geöffneten Fenstern ohnehin nicht mehr gesichert ist, ist eine Reduktion des Abluftvolumenstroms vertretbar. Ein Ausschalten wird innerhalb der Heizzeit aber nicht vorgenommen, da bei gut geplanten Anlagen und entsprechender Stellung der Innentüren über den Abluftventilator noch ein geringer Zuluftvolumenstrom auch in den Räumen ohne geöffnete Fenster erzielt werden kann. Zudem sorgt der kontinuierliche Abluftvolumenstrom für eine Abfuhr von Gerüchen und Feuchte aus allen Ablufträumen unabhängig von der Fensterstellung in anderen Räumen.

Im Folgenden werden die gewählten Volumenstromstufen kurz begründet. Die Aussagen zum Abluftventilator gelten ebenfalls für Abluftanlagen.

Energieorientierter Betrieb in der Heizzeit

Wird innerhalb der Heizzeit gelegentlich ein Fenster geöffnet, werden bei energieorientiertem Betrieb sowohl der Zu- als auch der Abluftventilator auf Minimum (d. h. Stufe I) reduziert.

Bei häufigem Fensteröffnen wird der Zuluftventilator abgeschaltet. Das oben genannte Argument der Zunahme der Fensteröffnung beim Abschalten des Zuluftventilators trifft hier nicht in dem Maße zu, da die Fenster ohnehin häufig geöffnet werden. Zudem hat der Bewohner einen energieorientierten Betrieb der Regelung gewählt, so dass eine gewisse Verschlechterung der Luftqualität vermutlich akzeptiert wird. Der Abluftventilator wird jedoch weiterhin auf Minimum betrieben, um Feuchte- und Geruchslasten aus den Ablufträumen abzuführen.

Energieorientierter Betrieb außerhalb der Heizzeit

Außerhalb der Heizzeit ist eine Belüftung des Gebäudes über die Fenster aus energetischer Sicht sinnvoll, da hierdurch Ventilatorstrom eingespart wird. Im energieorientierten Betrieb wird deswegen bei geöffneten Fenstern der Zuluftventilator abgeschaltet. Der Abluftventilator wird hingegen bei gelegentlicher Fensteröffnung zunächst nur auf die Minimalstufe reduziert. Ausgeschaltet wird er erst, wenn häufige Fensteröffnung auftritt. In dem Fall ist davon auszugehen, dass der Bewohner das Gebäude über die Fenster belüften möchte. Ein Abschalten des Abluftventilators muss dem Bewohner mitgeteilt werden, damit dieser die Ablufträume bewusst über Fenster belüftet. Andernfalls kann eine Feuchteanreicherung bis hin zu Bauschäden auftreten. Zudem ist ein Abschalten des Abluftventilators nicht möglich bei innenliegenden Ablufträumen. In dem Fall wird lediglich eine Reduktion auf Minimum vorgenommen.

Komfortorientierte Betriebsweise in der Heizzeit

Wird vom Bewohner eine komfortorientierte Anpassung des Volumenstroms gewählt, wird während der Heizzeit bei gelegentlich geöffneten Fenstern sowohl Zuluft- als auch Abluftvolumenstrom auf der Normalstufe betrieben.

Werden die Fenster häufig geöffnet, wird davon ausgegangen, dass hierüber ein nennenswerter Lüftungsbeitrag geleistet wird. Der Zuluft- und Abluftvolumenstrom werden in dem Fall auf Minimum reduziert.

Komfortorientierte Betriebsweise außerhalb der Heizzeit

Der Zu- und Abluftvolumenstrom wird bei geringer Fensteröffnungshäufigkeit auf Minimum reduziert. Sollte hierdurch ein vermehrtes Fensteröffnen ausgelöst werden, ist dies unproblematisch, da es aus energetischer Sicht sinnvoll ist, außerhalb der Heizzeit über die Fenster zu lüften.

Werden die Fenster bereits häufig geöffnet, wird davon ausgegangen, dass der Bewohner das Gebäude über die Fenster belüftet. Der Zuluftventilator wird in dem Fall ausgeschaltet. Um Gerüche und Feuchtelasten aus den Ablufträumen abführen zu können, wird der Abluftventilator lediglich auf die Stufe Minimum reduziert.

Komfortorientierter Betrieb mit Luftqualitäts- und Feuchtesensor in der Abluft

Die Volumenstromanpassung beim Zuluftventilator ist identisch mit oder ohne Luftqualitäts- und Feuchtesensor. Der Abluftvolumenstrom kann in dem Fall jedoch je nach Feuchte- und Verunreinigungslast zwischen Minimum und Maximum variiert werden. Ein Ausschalten ist nicht vorgesehen, um ein Entlüften der Ablufträume in jedem Fall sicherzustellen.

Betriebsweise bei geschlossenen Fenstern

Sind die Fenster geschlossen wird der Volumenstrom durch andere Vorgaben festgelegt. Dies kann

- eine vom Bewohner gewählte Volumenstromstufe
- in Verbindung mit einem vorgegebenen Zeitprogramm oder
- die luftqualitätsgeführte Volumenstromregelung mit dem LuQaS sein.

6.2 Nutzerinformation (Feedback)

Alternativ oder als Ergänzung zur automatischen Volumenstromanpassung kann die Information über die Häufigkeit der Fensteröffnung zusammen mit einer Bewertung an die Bewohner zurückgemeldet werden.

Die verhaltensrelevanten Effekte solcher Rückmeldungen konnten in verschiedenen empirischen Untersuchungen - bisher insbesondere im Hinblick auf die Einsparung von Elektrizität - nachgewiesen werden. [Darby 2006] kam in ihrer Zusammenschau verschiedener Untersuchungen aus dem englischsprachigen Raum, Skandinavien und den Niederlanden zu dem Schluss, dass direkte Feedbacks bspw. in Form von benutzerfreundlichen Displays besonders verhaltenswirksam sind, weil sie als „Learning tools“ (S. 17) angesehen werden können, die den Kenntnisstand der Nutzer erhöhen, die Konsequenzen des eigenen Verhaltens vor Augen führen und so zu energiesparenden Verhaltensweisen motivieren. Für [Brohmann 2000] ist eine bessere Information und Rückmeldung ebenfalls eine viel versprechende Einzelmaßnahme für ein energieeffizientes Verbrauchsverhalten, „weil gleichzeitig das Bewusstsein erhöht wird, Lerneffekte erfahrbar gemacht werden und die Konsumenten die Folgen ihrer Verhaltensänderungen testen können.“ (S. 81f). Zu ähnlichen Befunden kam auch [Roberts 2004], der für typische Verbraucher feststellte, dass diese eher über Verhaltensänderungen nachdenken und aktiv werden, wenn sie das richtige Feedback erhalten (S. 4). Nach [Frick 2003] muss die zielorientierte Wissensvermittlung dabei „die Problemzusammenhänge klar machen (Systemwissen), Handlungsoptionen aufzeigen (Handlungswissen) sowie die ökologische Effizienz der Handlungen klar machen (Wirksamkeitswissen).“ (S. 124) [Fischer 2007] fasste in ihrer Bestandsaufnahme aktueller (Stromspar-)Projekte und Kampagnen zusammen, dass Feedbacks dann besonders erfolgreich sind, wenn sie häufig und über lange Zeit erfolgen,

übersichtlich, klar und ansprechend präsentiert werden, interaktive Elemente enthalten und historische oder normative Referenzgrößen einschließen.

6.2.1 Bewertungsgröße für die Fensteröffnungshäufigkeit

Die Auswirkungen von geöffneten Fenstern sind u. a. abhängig vom Außenklima. Während im Sommer ein Öffnen der Fenster zu Lüftungszwecken sinnvoll und erwünscht ist, sollten die Fenster bei kaltem Winterwetter geschlossen bleiben. Die zusätzlichen Lüftungsverluste über Fensterlüftung berechnen sich nach folgender Gleichung

$$\text{Gl. 6-1} \quad Q_{L,Fe} = c_v \sum_j \dot{V}_{Fe,j} t_j (T_{i,j} - T_{a,j})$$

mit

$Q_{L,Fe}$	kWh	Zusätzliche Lüftungswärmeverluste über Fensterlüftung
c_v	Wh/(m ³ K)	Spezifische Wärmekapazität von Luft
$\dot{V}_{Fe,j}$	m ³ /h	Zuluftvolumenstrom über Fenster in dem Zeitintervall j
t_j	h	Länge des Zeitintervalls j
$T_{i,j}$	°C	Innenlufttemperatur im Zeitintervall j
$T_{a,j}$	°C	Außenlufttemperatur im Zeitintervall j

Der Zuluftvolumenstrom über geöffnete Fenster $\dot{V}_{Fe,j}$ ist u. a. abhängig von der Außentemperatur, der Windgeschwindigkeit, der Windrichtung sowie Anzahl, Größe und Lage der geöffneten Fenster.

Zur Bewertung der Fensteröffnungshäufigkeit wird eine Größe definiert, die möglichst viele der genannten Abhängigkeiten umfasst. Sie kann dabei nur die Eingabegrößen verwenden, die im Rahmen der Drd-Methode ermittelt werden: Zeit mit wenigstens einem geöffneten Fenster erfasst wird. In der Regel enthalten die Lüftungsregelungen zudem Außentemperaturfühler.

Die verwendete Bewertungsgröße ist in Gl. 6-2 dargestellt. Sie wird bestimmt unter Berücksichtigung der gemessenen Fensteröffnungszeit, der aktuellen Außentemperatur, einem vereinfachten Ansatz für den zusätzlichen Volumenstrom über geöffnete Fenster sowie einer Heizgrenztemperatur $T_{a,grenz}$. Die Bewertungsgröße entspricht den zusätzlichen Lüftungswärmeverlusten über geöffnete Fenster. Aufgrund der Vereinfachungen bei der Ermittlung des Volumenstroms wird sie jedoch zur Abgrenzung als Bewertungsgröße bezeichnet und mit dem Symbol Π dargestellt.

$$\text{Gl. 6-2} \quad \Pi = \frac{c_v}{1000} \sum_j \dot{V}_{Bk,j} t_j (T_{a,grenz} - T_{a,j}) \mid T_{a,j} \leq T_{a,grenz}$$

mit

Π	kWh	Bewertungsgröße (entspricht vereinfacht berechneten zusätzlichen Lüftungswärmeverlusten durch Fensterlüftung)
$\dot{V}_{BK,j}$	m ³ /h	Vereinfacht ermittelter Zuluftvolumenstrom über geöffnete Fenster (Abb. 6-3 , Balkontür) für das Zeitintervall j
$T_{a,grenz}$	°C	Heizgrenztemperatur bei erhöhter Fensterlüftung

Die Auswirkungen des Außenklimas (Außentemperatur, Windgeschwindigkeit und Windrichtung) auf den Volumenstrom über ein gekipptes Fenster werden vereinfacht über die Abb. 6-3 dargestellten Regressionsgleichungen berücksichtigt. Diese werden ermittelt, indem der Volumenstrom über ein gekipptes Fenster aus dynamischen Simulationsrechnungen auf Stundenbasis bestimmt wird. Die Monatsmittelwerte des Volumenstroms werden in Abhängigkeit der Monatsaußentemperatur aufgetragen und die Regressionsgrade berechnet.

Die Berechnung des Zuluftvolumenstroms über ein gekipptes Fenster erfolgt in den dynamischen Simulationsrechnungen mit dem in [Ebel et al. 2003] dargestellten Berechnungsansatz, der in Abschnitt 2.1 zusammengefasst ist. Die in der Berechnung verwendeten Modellparameter sind in Abb. 6-2 dargestellt.

Beschreibung	Einheit	Variable	Balkontür (FE-groß)	FE-klein
Lichte Fensterhöhe	m	h_{ges}	2,07	0,91
Lichte Fensterbreite	m	B	0,61	0,82
Öffnungswinkel	Grad	α	4	9,3
Brutto Öffnungsweite	m	t	0,145	0,18
Öffnungsbeiwert	-	C_d	0,62	0,62
Einfluss Fensterlaibung	-	f_L	0,72*	0,76*
Einfluss Fensterfalz	-	f_A	0,49	0,42
Korrekturfaktor Fensterhöhe	-	f_h	0,81	0,71
Winddruck-Korrekturfaktor	-	f_w	0,05	0,05
Lage	-	-	Mittel	Mittel

*) Abstand zur Laibung links und rechts = 2,5 cm; Abstand zum Sturz: 4,7 cm

Abb. 6-2: Randbedingungen für die Berechnung des Volumenstroms über die gekippte Balkontür und das kleine Fenster

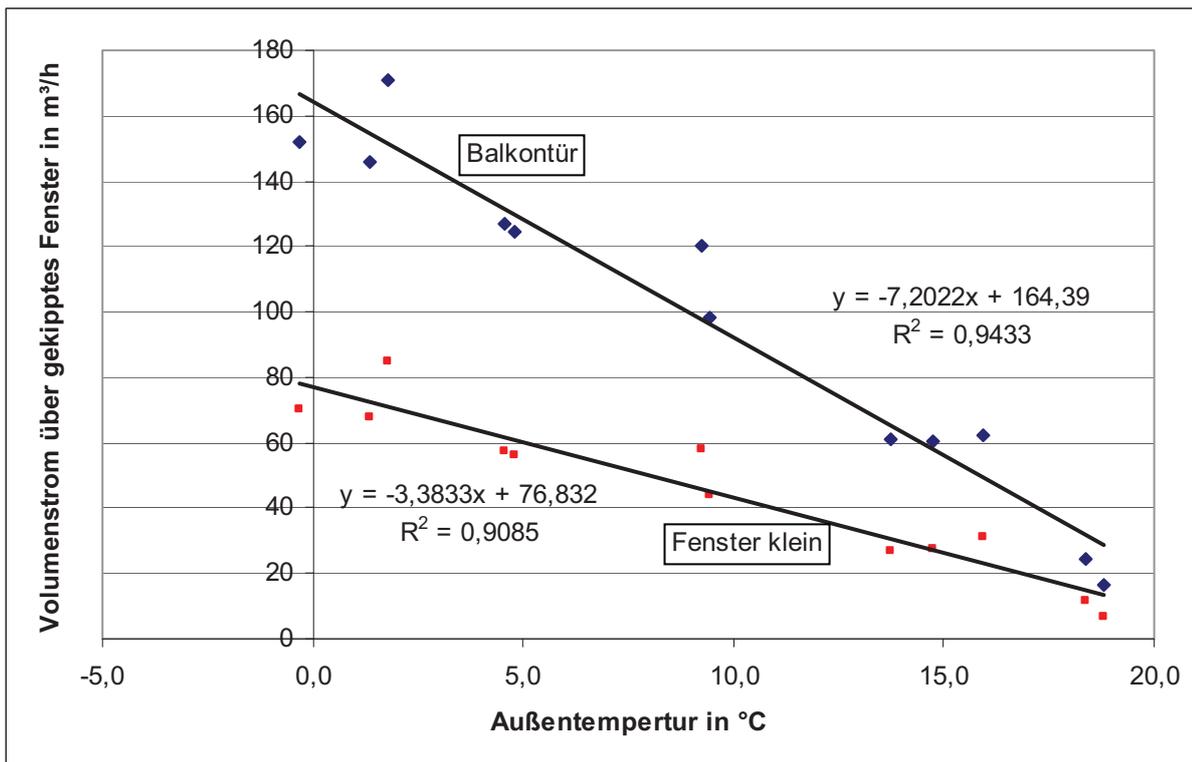


Abb. 6-3: Aus Simulationsrechnungen ermittelter Volumenstrom über die gekippte Balkontür und ein kleines Fenster in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Zur Ermittlung der Bewertungsgröße wird die Regressionsgleichung für die Balkontür (bodentiefes Fenster) angesetzt. Die Annahme eines großen Fensters in der Berechnung trägt dem Umstand Rechnung, dass bei von der Drd-Methode festgestellten geöffneten Fenstern, entweder ein kleines, ein großes oder mehrere Fenster gekippt oder ganz geöffnet sein können. Zudem kann je nach Stellung der Innentüren Querlüftung auftreten.

Die „Heizgrenztemperatur bei erhöhter Fensterlüftung“ $T_{a,grenz}$ gibt die Außentemperatur an, ab der auch bei geöffneten Fenstern üblicherweise nicht mehr geheizt werden muss. Sie liegt höher als die aus den Normen und Richtlinien bekannte Heizgrenztemperatur, da über die geöffneten Fenster ein zusätzlicher Wärmeverlust auftritt. Zudem wird bei der Ermittlung von $T_{a,grenz}$ noch ein Sicherheitszuschlag ΔT_S angesetzt.

Gl. 6-3
$$T_{a,grenz} = T_{HGT} + \Delta T_{Fe} + \Delta T_S$$

mit

T_{HGT}	°C	Heizgrenztemperatur
ΔT_{Fe}	K	Anstieg der Heizgrenztemperatur aufgrund von Fensterlüftung
ΔT_S	K	Sicherheitszuschlag

Heizgrenztemperaturen THGT sind abhängig vom Wärmeschutzstandard der Gebäude. Typische Werte sind in Abb. 6-4 dargestellt. Im Einzelfall haben natürlich auch die internen Wärmequellen sowie die solaren Einträge Einfluss auf die individuelle Heizgrenztemperatur eines Gebäudes.

ΔT_{Fe} ist abhängig von dem Zeitintervall, für das die Fenster geöffnet werden, sowie die Anzahl der geöffneten Fenster und deren Lage (Querlüftung). Um den Einfluss abzuschätzen, werden die zusätzlichen Wärmeverluste durch ein gekipptes großes Fenster mit den Abmaßen nach Abb. 6-2 ermittelt. In den Übergangsjahreszeiten liegt der zusätzliche temperatur- und nutzflächenbezogene Wärmeverlust bei $0,35 \text{ Wh}/(\text{m}^2_{WF} \text{ K})$. Dies führt nach [Loga 2003] zu einem Anstieg der Heizgrenztemperatur von ca. 2 K (NEH) bis 4 K (PH).

Als Sicherheitszuschlag wird ein Kelvin angesetzt. Sinnvolle Werte für die „Heizgrenztemperatur bei erhöhter Fensterlüftung“ liegen damit nach Abb. 6-4 bei 15 °C .

	T_{HGT}	ΔT_{Fe}	ΔT_S	$T_{a,grenz}$
Passivhaus	10 °C	4 K	1 K	15 °C
Niedrigenergiehaus	12 °C	2 K	1 K	15 °C

Abb. 6-4: Ermitteln der Heizgrenztemperatur bei erhöhter Fensterlüftung

6.2.2 Bewertungsskala

Die abstrakte Bewertungsgröße Π muss einer Bewertungsskala gegenübergestellt werden, um eine Bewertung des Fensteröffnungsverhalten vornehmen zu können. Die Bewertungsskala für die Fensteröffnungshäufigkeit kann beispielsweise drei Klassen enthalten:

- richtig
- erhöht
- zu hoch

Jede Klasse wird noch einmal in drei Bewertungsstufen untergliedert werden (siehe Abb. 6-5). Um die Richtung der Bewertung zu verdeutlichen, werden die Ampelfarben rot-gelbgrün zur Kennzeichnung der Klassen verwendet. Zudem wird angezeigt, in welche Richtung die Heizkosten steigen. Sofern gewünscht, können die zusätzlichen Heizkosten pro Jahr oder innerhalb von 15 Jahren angegeben werden, die entstehen würden, wenn ganzjährig die jeweilig bewertete Fensteröffnungshäufigkeit realisiert würde. Zahlenwerte hierfür werden in 6.2.3 gegeben, wobei beachtet werden muss, dass dies aufgrund der bereits diskutierten Vereinfachungen bei der Ermittlung des zusätzlichen Volumenstroms nur sehr grobe Anhaltswerte sind.

Die Klassengrenzen der Bewertungsgröße werden festgelegt, indem ein Zeitintervall definiert wird, für das die Fenster bei einer Außentemperatur von -10 °C pro Tag geöffnet sind. Mit der

Heizgrenze berechnen sich die Zahlenwerte für die Bewertungsgröße Π . Die Stufen ergeben sich aus einer äquidistanten Einteilung bis zur nächsten Klassengrenze (bzw. bis zu Π_{max} bei der Klasse „zu hoch“).

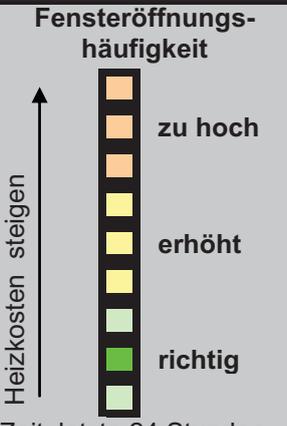
Fensteröffnungs- häufigkeit  Heizkosten steigen Zeit: letzte 24 Stunden	Bewertungs- größe Π	Öffnungszeit bei -10°C
	kWh/d	h
Π_{max}	29,6	15,0
	23,0	11,7
	16,5	8,3
Π_3	9,9	5,0
	7,6	3,8
	5,3	2,7
Π_2	3,0	1,5
	2,3	1,2
	1,6	0,8
Π_1	1,0	0,5
Π_0	0,0	0,0

Abb. 6-5: Bewertungsskala, Bewertungsgröße sowie Fensteröffnungszeit bei Außentemperatur von -10°C

Die Bewertungsgröße ist ein konstanter Wert. Ändert sich die Außentemperatur ändert sich die zu der jeweiligen Bewertung korrespondierende Fensteröffnungszeit. Die zu der Bewertungsskala korrespondierenden Fensteröffnungszeiten pro Tag in Abhängigkeit von der Außentemperatur zeigt Abb. 6-6.

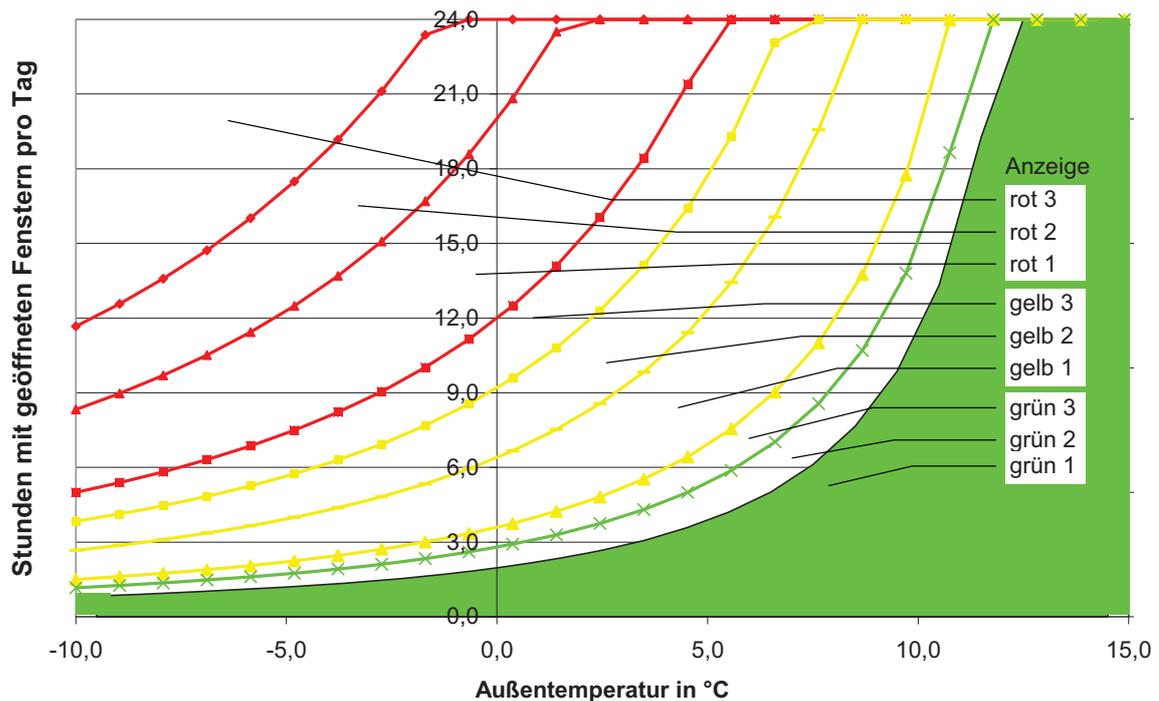


Abb. 6-6: Zur Bewertungsskala korrespondierende Fensteröffnungshäufigkeiten pro Tag in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Um dem Nutzer ein Feedback über sein Fensteröffnungsverhaltens zu geben ist es sinnvoll, die Bewertungsgröße für ein nicht zu langes Mittelungsintervall anzuzeigen. Damit kann er seine eigene Verhaltensänderung in der Bewertung wieder finden. Andererseits ist es auch interessant und evtl. für die Bewohner ein Ansporn, wenn das Fensteröffnungsverhalten über einen längeren Zeitraum angegeben wird. Sinnvoll sind beispielsweise folgende Auswertungszeiträume:

- die letzten 24 Stunden (die aktuellen Verhaltensänderungen spiegeln sich wider)
- die letzte Heizperiode (Anreiz, um jedes Jahr ein bisschen besser zu werden).

6.2.3 Zusätzlicher Heizwärmebedarf und zusätzliche Heizkosten

Die Bewertungsskala für die Fensteröffnung muss in plausiblen Verhältnis zu dem zusätzlichen Heizwärmebedarf stehen. Der Anstieg des Heizwärmebedarfs wird für folgende der in Abb. 6-6 dargestellten Fensteröffnungshäufigkeiten bzw. Bewertungen abgeschätzt:

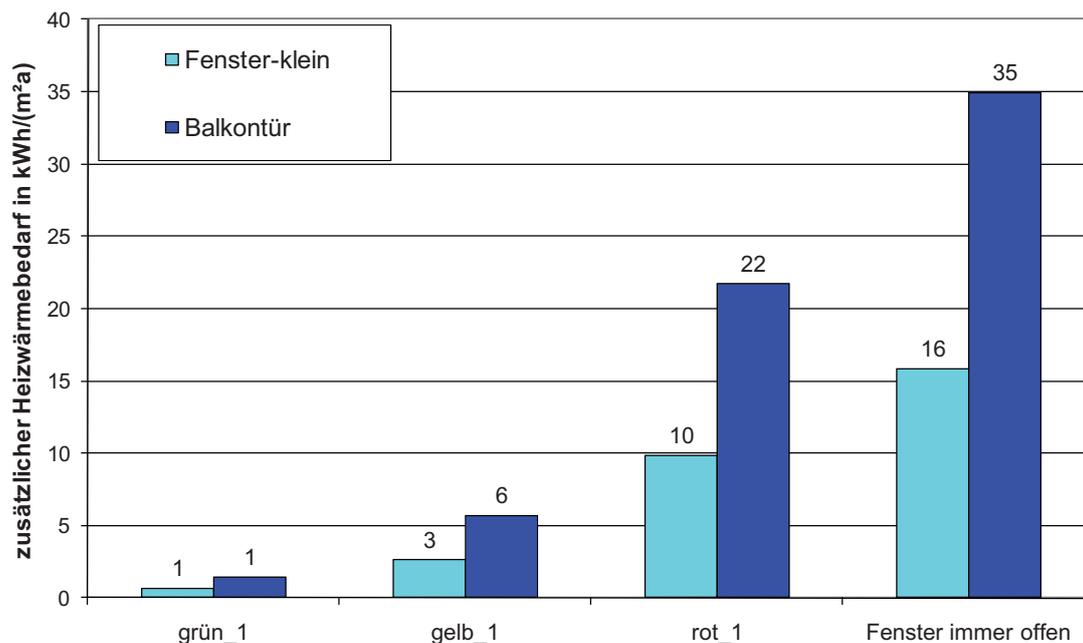
- erste grüne Anzeige
- erste gelbe Anzeige
- erste rote Anzeige
- Fenster sind immer geöffnet.

Für die Berechnung wird ein Reihenmittelhaus in Passivhausstandard aus Wiesbaden-Dotzheim mit einer Wohnfläche von 107 m² verwendet. Die Gebäude sind ausführlich in [Ebel et al. 2003] dokumentiert.

Die Berechnung erfolgt in folgenden Schritten

- Aus dem Testreferenzjahr Frankfurt am Main wird die Stundenhäufigkeit der der Außentemperatur für jeden Monat ermittelt.
- Die außentemperaturabhängige Fensteröffnungshäufigkeit wird entsprechend Abb. 6-6 angesetzt.
- Die Abhängigkeit des Volumenstroms über die gekippte Balkontür bzw. das kleine Fenster von der Außentemperatur wird aus dynamischen Simulationsrechnungen abgeleitet (keine Querlüftung). Die Kennlinie ist in Abb. 6-3 dargestellt.
- Über Gl. 6-1 werden die durch das gekippte Fenster hervorgerufenen zusätzlichen Lüftungswärmeverluste für jeden Monat des Jahres berechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Heizleistung nicht begrenzt ist und jederzeit die gewünschte Raumsolltemperatur realisiert werden kann.
- Die zusätzlichen Lüftungswärmeverluste werden in die mit dem Passivhausprojektierungspaketes [PHPP] durchgeführte Monatsbilanz für das Reihenmittelhaus eingebunden und der Anstieg des Heizwärmebedarfs bestimmt.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Abb. 6-7 für die Balkontür und das kleine Fenster dargestellt.



Objekt: Reihennittelhaus der Gartenhofsiedlung-Lummerlund in Wiesbaden im Passivhausstandard; Energiebezugsfläche: 107,8 m²
 Klima: Testreferenzjahr 06 (Frankfurt am Main)
 Balkontür: 2,07 m x 0,91 m; Fenster-klein: 0,91 m x 0,82 m
 Vereinfachungen/Annahmen: Ideal dichtes Gebäude; abgeglichene Lüftungsanlage, Heizleistung nicht begrenzt

Abb. 6-7: Auswirkung der in der Bewertungsskala ausgewiesenen Fensteröffnungshäufigkeit auf den zusätzlichen Heizwärmebedarf am Beispiel eines Passivhauses

Die Bewertungsskala steht in einem sinnvollen Verhältnis zum zusätzlichen Heizwärmebedarf. Der Anstieg des Heizwärmebedarfs lässt sich zusammenfassend wie folgt darstellen.

	Fenster - klein	Balkontür
Immer grün:	1 bis 3 kWh/(m ² a)	1 bis 6 kWh/(m ² a)
Immer gelb	3 bis 10 kWh/(m ² a)	6 bis 22 kWh/(m ² a)
Immer rot	10 bis 16 kWh/(m ² a).	22 bis 35 kWh/(m ² a)

Abb. 6-8: Auswirkung der in der Bewertungsskala unterstellten Fensteröffnungshäufigkeit auf den zusätzlichen Heizwärmebedarf am Beispiel eines Passivhauses

Aus dem zusätzlichen Heizwärmebedarf lassen sich die zusätzlichen Heizkosten abschätzen, die über geöffnete Fenster entstehen. Dazu müssen mehrere Annahmen getroffen werden.

Jahresnutzungsgrad Heizung	0,8
Betrachtungszeitraum	15 Jahre
Energiepreis im ersten Jahr	5 Cent/kWh
Mittlere Energiepreisssteigerung	5 %/a

Abb. 6-9: Annahmen für die Berechnung der zusätzlichen Heizkosten

In Abb. 6-10 sind die zusätzlichen Heizkosten in Abhängigkeit von den Fensteröffnungshäufigkeiten sowie der Fenstergröße angegeben. Dargestellt sind die Heizkosten zum einen als Jahreswert zum anderen über einen Zeitraum von 15 Jahren, was einer üblichen Annahme für die Lebensdauer technischer Systeme im Gebäudebereich entspricht.

	Zusätzliche Heizkosten pro Jahr in €		Zusätzliche Heizkosten über 15 Jahre in €	
	Fenster-klein	Balkontür	Fenster-klein	Balkontür
Fenster geschlossen	0	0	0	0
grün 1	7	14	99	214
gelb 1	26	56	387	838
rot 1	96	212	1.441	3.182
Fenster immer offen	154	341	2.316	5.117

Jahresnutzungsgrad Heizung: 0,8; Betrachtungszeitraum: 15 Jahre; Energiepreis: 5 Cent/kWh; Energiepreisstigerung: 5 %/a

Abb. 6-10: Geschätzte zusätzliche Heizkosten in Abhängigkeit der Fensteröffnungshäufigkeit und der Fenstergröße

Durch eine bewusste Fensterlüftung können die Heizkosten nennenswert beeinflusst werden. Schafft es ein Bewohner, seine Fensteröffnungshäufigkeit aus dem gelben in den grünen Bereich zu verbessern, so erzielt er hierüber über 15 Jahre gerechnet eine Einsparung von 300 bis 600 Euro. Verbessert er sich von dem roten Bereich in den gelben Bereich, liegen die Einsparungen noch deutlich höher. Sie können etwa 1.000 € bis 2.300 € betragen.

Anzumerken ist, dass der hier dargestellte Anstieg des Heizwärmebedarfs bzw. Heizenergieverbrauchs in Messungen nicht in dieser isolierten Form wieder zu finden ist. Der reale Heizenergieverbrauch wird für ein gegebenes Gebäude neben der Fensteröffnung von vielen anderen Faktoren mitbestimmt wie z. B. Raumtemperatur, Temperaturdifferenz zu Nebengebäuden In den in [Ebel et al. 2003] durchgeführten Messungen zeigte sich zudem, dass die Mehrzahl der Bewohner die Fenster in einem sinnvollen Maß öffneten. Die hier dargestellten Varianten „rot_1“ oder „Fenster immer offen“ traten nur vereinzelt oder gar nicht auf. Zudem wurde bei kalten Außentemperaturen in der Regel auf Querlüftung verzichtet und häufig nur ein kleines Fenster gekippt. Hinzu kommt, dass bei den Gebäuden die Heizleistung begrenzt war, so dass bei geöffneten Fenstern die Raumtemperatur sank. Insgesamt konnten die prognostizierten niedrigen Energieverbräuche bei den untersuchten Gebäuden erreicht werden.

6.2.4 Beispiel für gemessenes Fensteröffnungsverhaltens

Als weiterer Plausibilitätstest für die Bewertungsskala wird dieses auf gemessene Werte der Fensteröffnungshäufigkeit aus der Passivhaussiedlung Wiesbaden-Dotzheim angewendet [Ebel et al. 2003].

Betrachtet werden die Messdaten aus drei Wohneinheiten. Die Fensteröffnungshäufigkeit entsprechend der Drd-Methode (mindestens ein Fenster geöffnet) in Abhängigkeit von der Außentemperatur ist in Abb. 6-11 dargestellt.

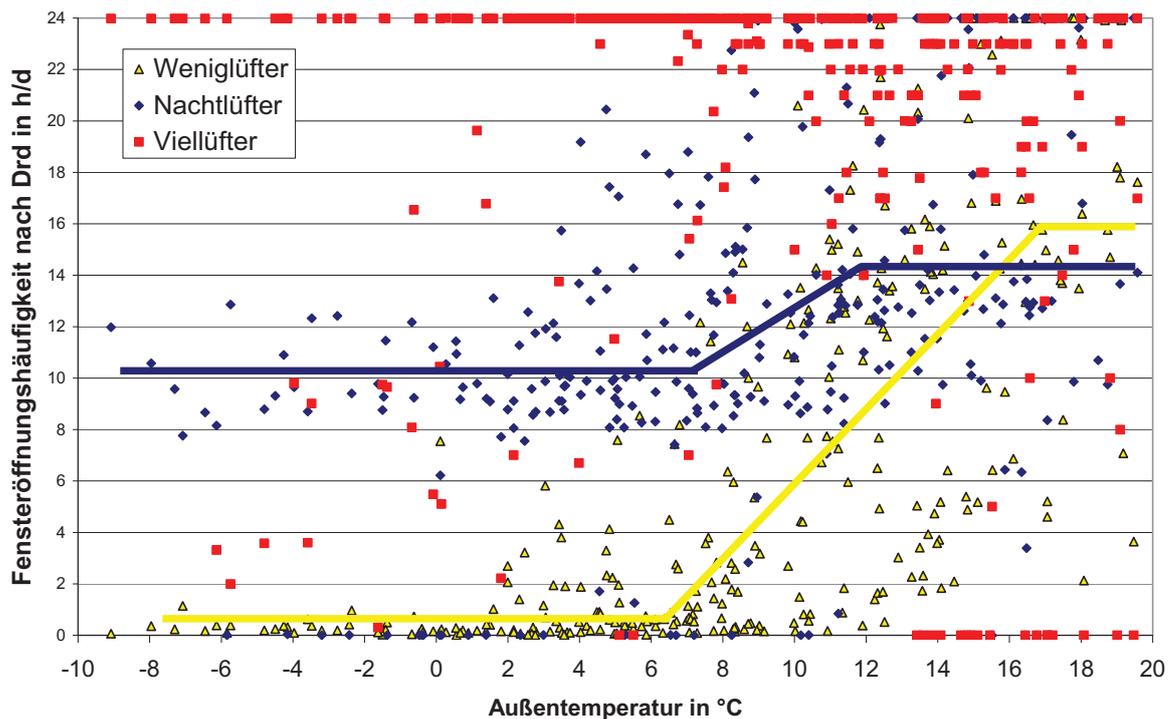


Abb. 6-11: Fensteröffnungshäufigkeit entsprechend Drd-Methode für 3 Wohneinheiten mit unterschiedlichem Fensteröffnungsverhalten in Abhängigkeit von der Außentemperatur

Weniglüfter: Die Bewohner der „Weniglüfter-Wohneinheit“ haben ein sinnvolles Lüftungsverhalten. Die Fenster werden bei niedrigen Außentemperaturen nur selten geöffnet. Steigt die Außentemperatur an nimmt die Fensteröffnungshäufigkeit zu.

Nachtlüfter: Die Bewohner der „Nachtlüfter-Wohneinheit“ öffnen nachts zum Schlafen wenigstens ein Fenster. Entsprechend liegt die Fensteröffnungshäufigkeit auch bei niedrigen Außentemperaturen mit ca. 10 h/d relativ hoch. Ansonsten liegt ein normales Lüftungsverhalten vor, mit einem Anstieg der Fensteröffnungshäufigkeit bei höheren Außentemperaturen.

Viellüfter: Bei der „Viellüfter-Wohneinheit“ ist keine klare Abhängigkeit der Fensteröffnungshäufigkeit von der Außentemperatur zu erkennen. Auch bei Temperaturen unter 0°C ist an vielen Tagen mindestens ein Fenster ständig gekippt.

Auf diese Bewohner wird die Bewertung entsprechend Abb. 6-5 angewendet. Ziel ist es zu überprüfen, ob die unterschiedlichen Lüftungsverhalten sich auch in plausibler Weise in der Bewertung widerspiegeln. Das Ergebnis zeigt Abb. 6-12.

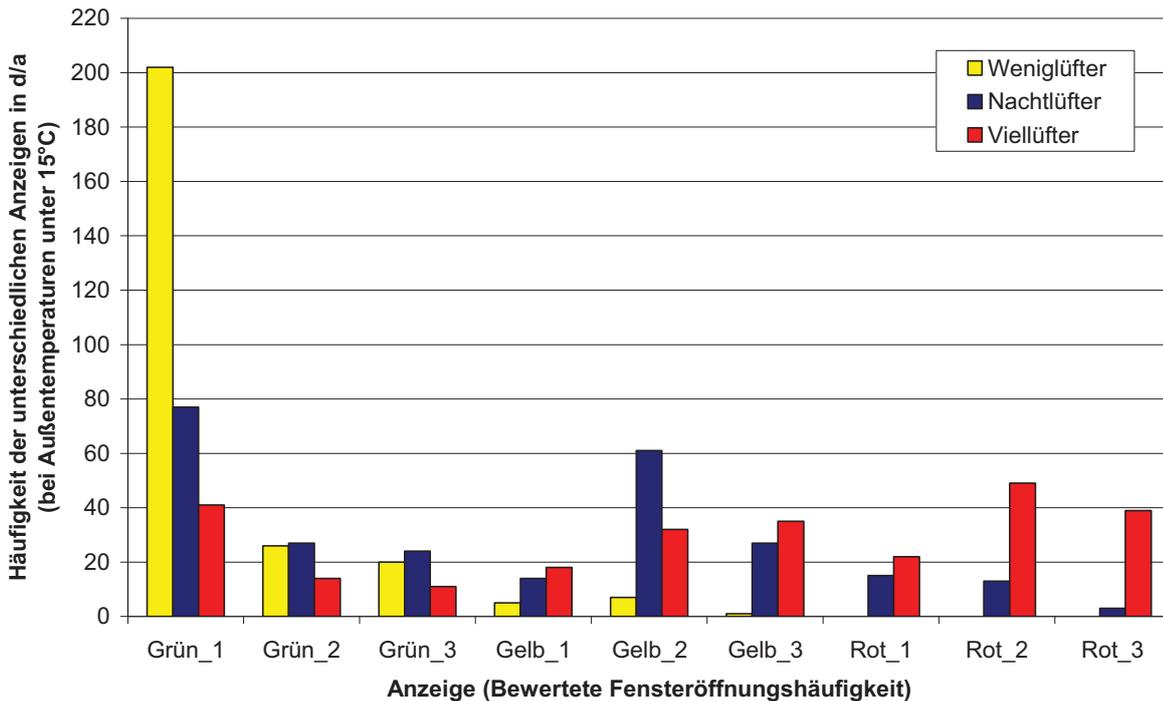


Abb. 6-12: Bewertung der unterschiedlichen Lüftungsverhalten über die hier definierte Bewertungsgröße bzw. Bewertungsskala

Die hier definierte Bewertungsskala zeigt ein plausibles Ergebnis. Der Weniglüfter liegt überwiegend im „grünen“ Bereich. Lediglich die im Außentemperaturbereich über 0°C auftretenden längeren Fensteröffnungen werden mit gelb bewertet.

Der Nachtlüfter hat den Schwerpunkt der Bewertung im „gelben“ Bereich. Da in einigen Nächten die Fenster doch geschlossen bleiben treten auch grüne Bewertungen auf. Eine „rote“ Bewertung ist die Ausnahme.

Der Viellüfter deckt das gesamte Spektrum der Bewertung ab, wobei die größte Häufigkeit im „roten“ Bereich auftritt. Dies ist insbesondere auf die ständig geöffneten Fenster bei tiefen Außentemperaturen zurückzuführen.

7 Weitere Anwendungsmöglichkeiten der Drd-Methode

Mit der Drd-Methode werden die Fensteröffnungen festgestellt. Hierzu wird ein Druckdifferenzsensor in dem Gebäude installiert. Im Folgenden werden weitere Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt, die über die bisher beschriebene automatische Volumenstromanpassung und Nutzerinformation hinaus aus dem Vorhandensein eines Differenzdrucksensors ergeben.

7.1 Luftmassenbilanz der Lüftungsanlage

In diesem Abschnitt wird untersucht, ob mit dem Druckdifferenzsensor die Luftmassenbilanz der Lüftungsanlage eingestellt und in regelmäßigen Abständen überprüft werden kann.

Wohnungslüftungsanlagen mit mechanischer Zu- und Abluftversorgung sollen im abgeglichenen Zustand betrieben werden. Dies bedeutet, dass der Zuluftmassenstrom gleich dem Abluftmassenstrom ist. Andernfalls ergeben sich ungewollte In- oder Exfiltrationen über die Gebäudehülle, die Einfluss auf die Lüftungswärmeverluste haben und zu bauphysikalischen Problemen führen können.

In der Realität verändert sich die Massenbilanz jedoch ständig, sofern keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Neben der Filterverschmutzung oder Änderungen an den Zu- und Abluftdurchlässen spielt wieder die Windgeschwindigkeit eine wichtige Rolle.

7.1.1 Einfluss des Wetters auf die Luftmassenbilanz

Insbesondere durch die Windgeschwindigkeit und Windrichtung wird die Massenbilanz einer Lüftungsanlage im Betrieb beeinflusst. Abb. 7-1 zeigt den Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Massenstrombilanz für zwei Windrichtungen. Angenommen wurde das in Abschnitt 3.1 beschriebene Gebäude mit der dort beschriebenen Zu- und Abluftanlagen. Die Massenbilanz ist ausgeglichen bei einer Windgeschwindigkeit von 0 m/s und einer Außentemperatur von 1,8 °C. Zur Quantifizierung der Disbalance wird folgender Quotient gebildet:

$$\text{Gl. 7-1} \quad \text{Disbalance} = \frac{(\dot{M}_{Zu} - \dot{M}_{Ab})}{\dot{M}_{Ab}}$$

Negative Werte sind also als Abluftüberschuss, positive Werte als Zuluftüberschuss zu interpretieren.

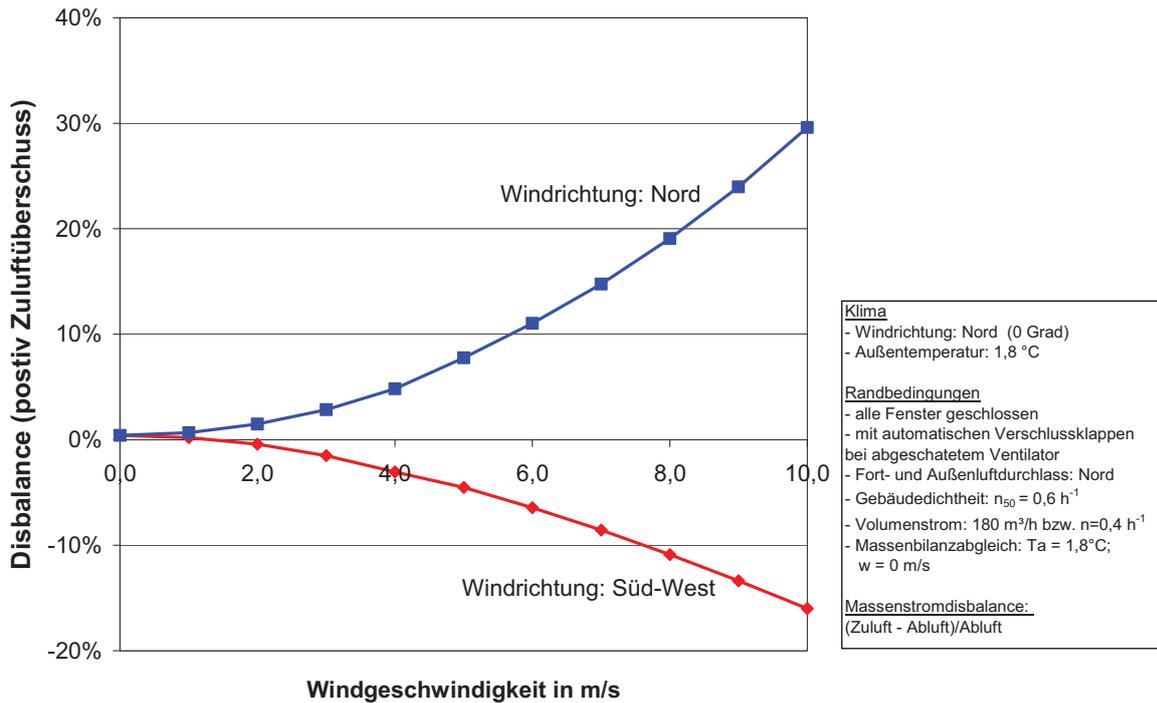


Abb. 7-1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Luftmassenbilanz einer Zu- und Abluftanlage

Die Luftmassenbilanz wird erheblich durch die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung beeinflusst. Bei normalem Volumenstrom ($n = 0,4 \text{ h}^{-1}$) treten beispielsweise bei einer extremen Windgeschwindigkeit von 10 m/s Disbalancen zwischen -15 % und 30 % auf.

Die Windgeschwindigkeit von 10 m/s ist eine Extremsituation. Um den mittleren Einfluss des Klimas auf die Massenbilanz abschätzen zu können, werden typische Klimabedingungen für die Heizzeit von gut gedämmten Gebäuden bestimmt. Ausgewertet werden die Monate November bis April des Testreferenzjahres Würzburg. Für die Außentemperatur T_a wird das arithmetische Mittel über die Monate gebildet. Da die Windgeschwindigkeit v_w quadratisch in die Berechnung einfließt, wird ein Mittelwert nach Gl. 7-3 bestimmt. Es ergeben sich folgende Werte:

Gl. 7-2
$$T_a = \frac{\sum_{i=1}^n T_{a,i}}{n} = 1,8^\circ\text{C}$$

Gl. 7-3
$$v_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_{w,i}^2}{n}} = 4,6 \text{ m/s}$$

Für typische Windgeschwindigkeiten von 4 bis 5 m/s ist der Einfluss auf die Massenbilanz der Lüftungsanlage deutlich niedriger. Hier liegt der Disbalance zwischen -4 % und 7 %.

Eine Erhöhung des Volumenstroms führt dazu, dass sich geringere Werte für den Zuluftüberschuss ergeben. Der wesentliche Grund hierfür ist der höhere Abluftmassenstrom, der als Bezugswert bei der Prozentbildung verwendet wird. Dadurch fallen bei gleicher absoluter Änderung die Zahlenwerte geringer aus.

7.1.2 Einfluss der Disbalancen auf die Lüftungswärmeverluste

Der Einfluss einer Disbalance der Lüftungsanlage auf die Lüftungswärmeverluste ist nach [Werner 2006] gering (Abb. 7-2).

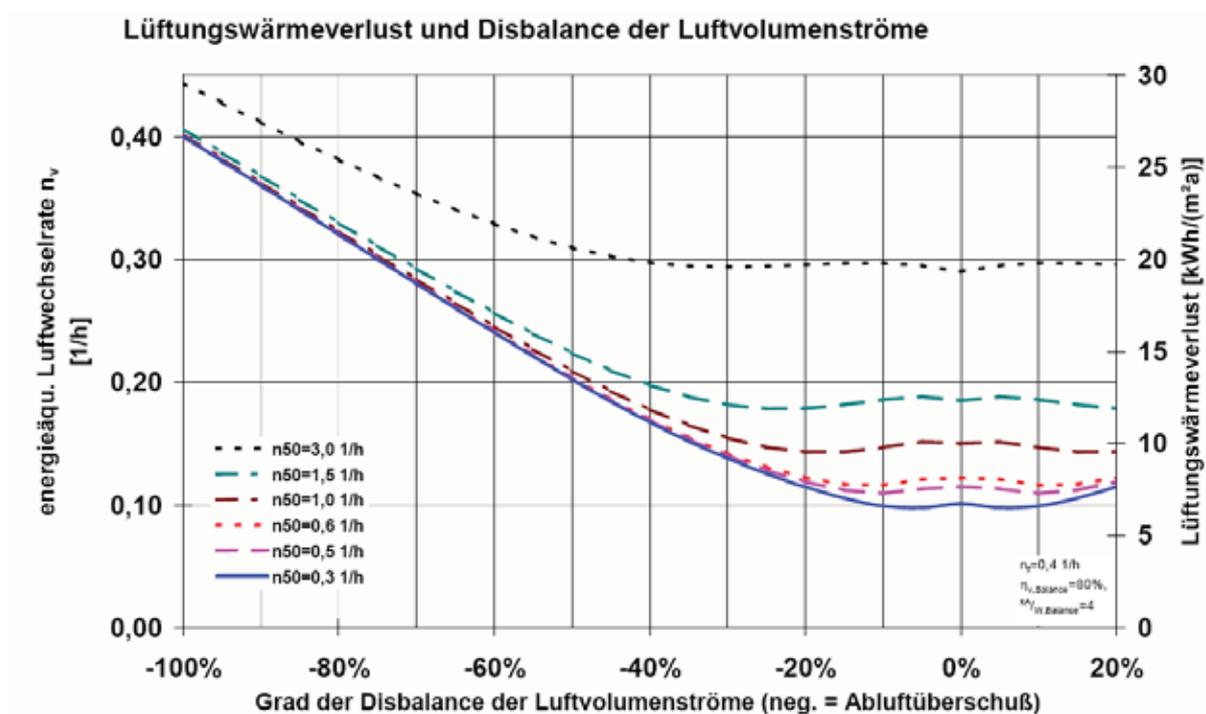


Abb. 7-2: Einfluss der Disbalance von Zu- und Abluftmassenstrom auf energieäquivalente Luftwechsel und die flächenbezogenen Lüftungswärmeverluste bei unterschiedlicher Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle n_{50} ($n_v=0,4 \text{ h}^{-1}$; $\eta_{Balance} = 80 \%$; $kA/W_{Balance} = 4$; negative Prozentangaben bedeuten Abluftüberschuss); Quelle [Werner 2006].

Bei einer Dichtheit der Gebäudehülle von $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$, einem Volumenstrom von $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$ und einer Rückwärmzahl von 80 % bleiben die Lüftungswärmeverluste bis zu einer Disbalance von $\pm 20 \%$ weitgehend unverändert. Erst bei größeren Disbalancen nehmen die Lüftungswärmeverluste in nennenswertem Umfang zu.

Der Grund für die weitgehende Unabhängigkeit der Lüftungsverluste bei Disbalancen zwischen $\pm 20 \%$ ist, dass durch die erzwungene In- bzw. Exfiltration ohnehin auftretende In- und Exfiltrationen substituiert werden. Gleichzeitig steigt der Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung an und kann so einen Teil der durch die Disbalance bei den Kapazitätsströmen hervorgerufenen Leistungsreduktion ausgleichen.

7.1.3 Bisherige Verfahren zur Einhaltung der Massenstromkonstanz

Üblicherweise wird die Massenstromkonstanz in Wohnungslüftungsanlagen mit Zu- und Abluftkanalnetz über die Ventilatoren sichergestellt. Insbesondere die neuere Generation der Ventilatoren weist eine sehr steile Volumenstrom-Differenzdruck-Kennlinie auf (Abb. 7-3). Auch wenn die externe Druckdifferenz zunimmt, wird der Volumenstrom hierdurch konstant gehalten.

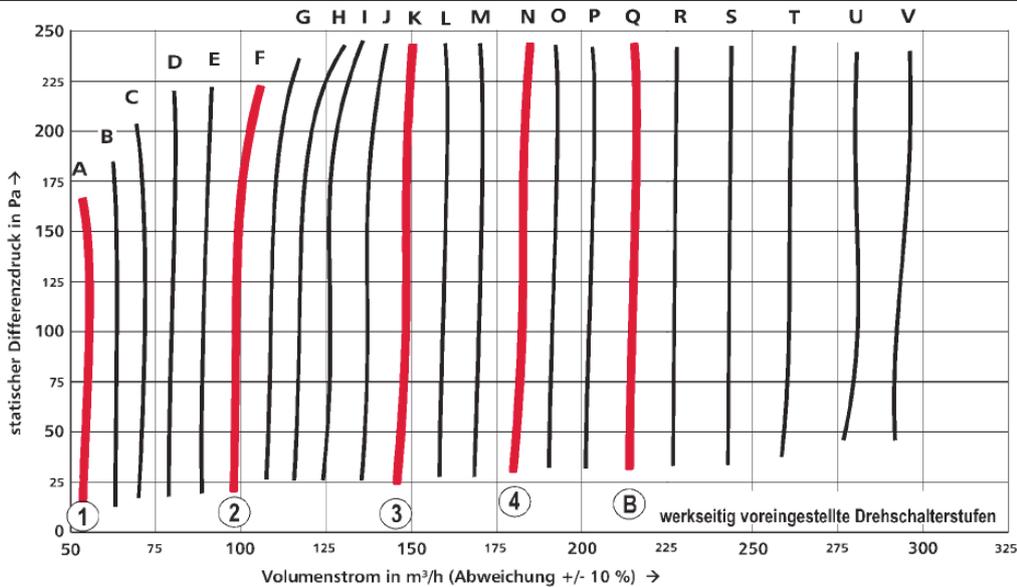


Abb. 7-3: Druck-Volumenstromkennlinie von Ventilatoren mit Konstantvolumenstromregelung [Quelle: Technische Produktinformation Aerex – UniBox R-300-01]

Eine neue Möglichkeit, die Massenstromkonstanz sicherzustellen stellt der so genannte „AirSwitcher“ dar [Strauß 2006]. Der „AirSwitcher“ besteht aus einem Differenzdrucksensor und einer Umschalteneinheit, über die unterschiedliche Messstellen auf den Sensor geschaltet werden können. Werden Messkreuze in das Zu- und Abluftkanalnetz eingebaut (vor den Ventilator), können die Volumenströme gemessen und die Massenströme konstant gehalten werden.

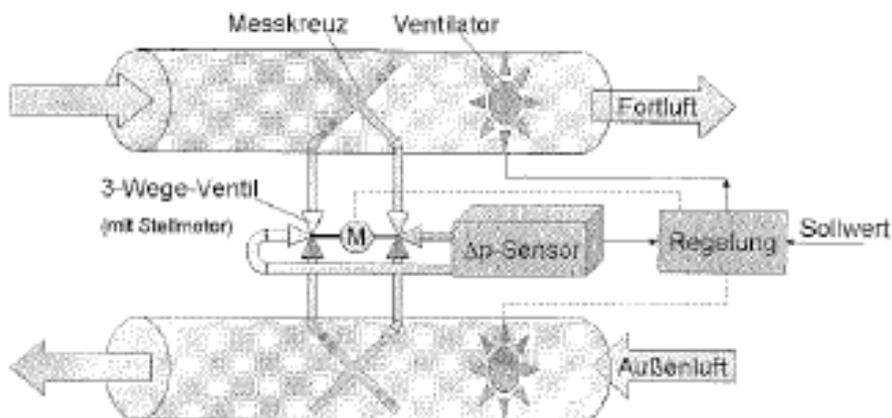


Abb. 7-4: AirSwitcher zum Einstellen der Massenstromkonstanz [Quelle: Strauß 2006]

7.1.4 Massenstromabgleich über die Drd-Methode

Wird die Drd-Methode bei einer Lüftungsanlage realisiert, ist ein Differenzdrucksensor vorhanden. Dieser misst die Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnerem und einer Außenmessstelle. Im Folgenden wird untersucht, ob mit den vorhandenen Komponenten die Massenbilanz bewertet werden und in regelmäßigen Abständen korrigiert werden kann.

Die These zur Bewertung der Massenbilanz ist, dass bei abgeglichenem Massenstrom von der Lüftungsanlage keine Änderung des Gebäudeinnendrucks hervorgerufen wird. Tritt hingegen eine Disbalance auf, wird der Gebäudeinnendruck hierdurch verändert.

Um den Einfluss des Wetters und die Beeinflussung auf die Außenmessstelle zu eliminieren, wird der Gebäudeinnendruck bei ausgeschalteter Lüftungsanlage als Referenzdruck herangezogen. Konkret wird der Massenstromabgleich durchgeführt, indem mehrere Betriebszustände durchlaufen werden, die im Weiteren als „Abgleichsequenz“ bezeichnet werden:

1. Lüftungsanlage wird abgeschaltet.
2. Druckdifferenz innen-außen wird unter den jeweils aktuellen Wetterbedingungen gemessen (Referenzdruck)
3. Abluftventilator wird mit einer vorgegebenen Nennleistung eingeschaltet
4. Zuluftventilator wird eingeschaltet und Leistung so variiert, bis Druckdifferenz innen-außen dem Wert des Referenzdrucks entspricht.

Die theoretischen Berechnungen zeigen, dass auf diese Weise die Massenstrombilanz eingestellt werden kann. Die Abgleichsequenz kann für unterschiedliche Leistungsstufen des Abluftventilators durchgeführt werden, so dass der Abgleich auch für unterschiedliche Volumenstromstufen erfolgen kann.

Aus Abb. 7-1 wird deutlich, dass die Massenstrombilanz durch Windgeschwindigkeit und Windrichtung wesentlich beeinflusst wird. Hieraus ergeben sich zwei Strategien für die Einstellung der Massenstrombilanz:

1. Der Massenstromabgleich wird für die jeweils aktuelle Windsituation durchgeführt. Die in Abb. 7-1 dargestellten Disbalancen können jeweils ausgeglichen werden. Da wechselnde Windkräfte jedoch eine Änderung der erforderlichen Druckerhöhungen von Zu- und Abluftventilator hervorrufen, muss bei dieser Strategie der Abgleich regelmäßig erfolgen (z. B. in 10 Minuten-Abständen). Geschieht dies nicht, können sich bei einem Wechsel der Windrichtung die Disbalancen verstärken. Die Umsetzung dieser Strategie erfordert automatische Verschlussklappen, da sonst Windkräfte und Thermik den Referenzdruck bei abgeschalteten Ventilatoren stark beeinflussen.
2. Der Massenstromabgleich wird nur bei Windstille bzw. geringen Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Dieser Wert wird beibehalten auch, wenn die Windgeschwindigkeiten ansteigen. In dem Fall werden die in Abb. 7-1 dargestellten Disbalancen in Kauf genommen. Da diese bis auf hohe Windgeschwindigkeiten aus Norden (Fortluft und Außenluftansaugung in Luv) im Bereich von Disbalance von $\pm 20\%$ liegen, ergeben sich keine wesentli-

chen Auswirkungen auf die Lüftungswärmeverluste. In dem Fall muss der Massenstromabgleich nur in größeren Abständen durchgeführt werden. Denkbar wäre ein Intervall von 2 bis 3 Monaten. Auf diese Weise könnten Filterverschmutzungen und Änderungen der Einstellung der Luftdurchlässe ausgeglichen werden.

Um die Häufigkeit von Testsequenzen zu begrenzen erscheint das Szenario 2 sinnvoller. Die Durchführung des Massenstromabgleichs sollte dabei auf Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s beschränkt werden. In dem Fall haben Windgeschwindigkeit und Windrichtung nur noch einen geringen Einfluss auf die Luftmassenbilanz.

Die Windgeschwindigkeit ist per se nicht bekannt und soll nur zum Zweck des Massenstromabgleichs nicht extra gemessen werden. Aus in [Großklos 2002] gewonnenen Messdaten kann jedoch ein mittlerer Zusammenhang zwischen Druckschwankungen an der Außenmessstelle und Windgeschwindigkeit gefunden werden.

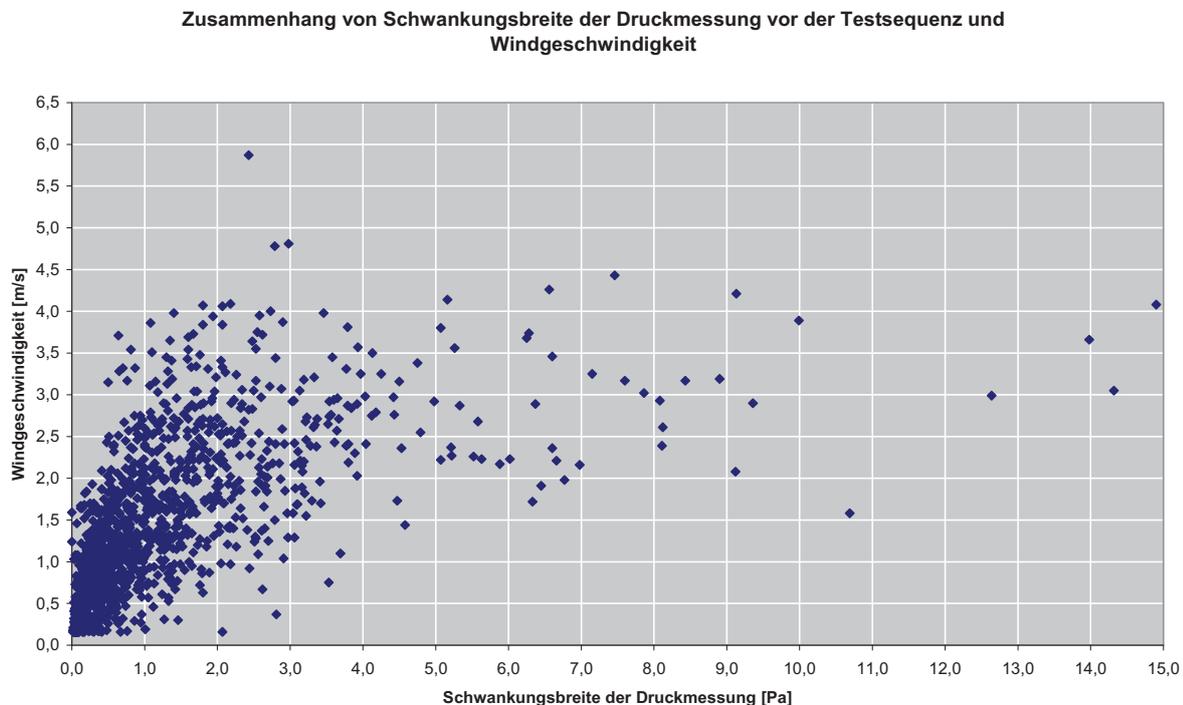


Abb. 7-5: Mit Messdaten aus [Großklos 2002] ermittelter Zusammenhang von Druckschwankungen an der Außenmessstelle (Turbulenzen) und der Windgeschwindigkeit

Wird eine maximale Druckschwankung der sechs 10-Sekunden-Mittelwerte einer Minute an der Außenmessstelle von maximal 1 Pascal angesetzt, wird ein Bereich mit Windgeschwindigkeiten unter 3 m/s eingegrenzt.

7.1.5 Einfluss von Messfehlern auf den Drd-Luftmassenabgleich

Theoretisch kann die Massenbilanz über das beschriebene Verfahren mit hoher Genauigkeit eingestellt werden. Praktisch müssen jedoch geringe Druckdifferenzen im Pascal-Bereich gemessen werden. Dies ist in der Regel mit Fehlern behaftet. Unschärfen ergeben sich aus:

- Der Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit der Differenzdruckmessung (Sensoren)
- Dem Einfluss von Druckschwankungen beim Gebäudeinnendruck
- Dem Einfluss von Druckschwankungen an der Außenmessstelle, z. B. durch Windböen.

Die Auswirkungen von Unschärfen bei der Differenzdruckermittlung auf die erforderliche Druckerhöhung des Zuluftventilators bzw. auf die Massenbilanz sind in den folgenden Abbildungen für unterschiedliche Volumenströme dargestellt. Angenommen wird dabei eine Gebäudedichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$, was der Anforderung an Passivhäuser entspricht.

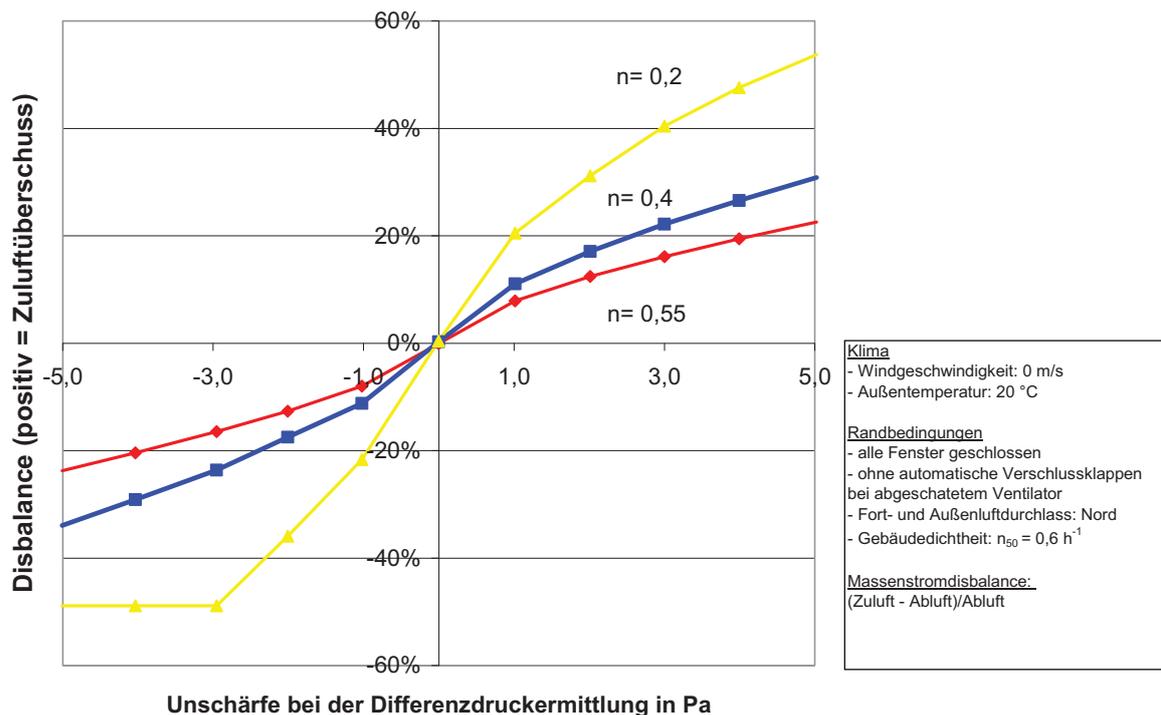


Abb. 7-6: Einfluss von Unschärfen bei der Differenzdruckermittlung auf die Druckerhöhung des Zuluftventilators für eine Gebäudedichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$

Für den Fall eines mechanischen Luftwechsels von $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$ (etwa Nennbetrieb) und der Annahme einer maximalen Unschärfe bei der Differenzdruckermittlung von $\pm 1 \text{ Pa}$ kann eine Disbalance von $\pm 11 \%$ auftreten.

Wird von einer Unschärfe bei der Differenzdruckermittlung von $\pm 2 \text{ Pa}$ ausgegangen, ergibt sich bereits eine Disbalance von $\pm 17 \%$.

Die bisherigen Betrachtungen unterstellen eine Gebäudedichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$. Abb. 7-7 zeigt die sich einstellende Disbalance für eine Dichtheit der Gebäudehülle von $n_{50} = 1,0 \text{ h}^{-1}$.

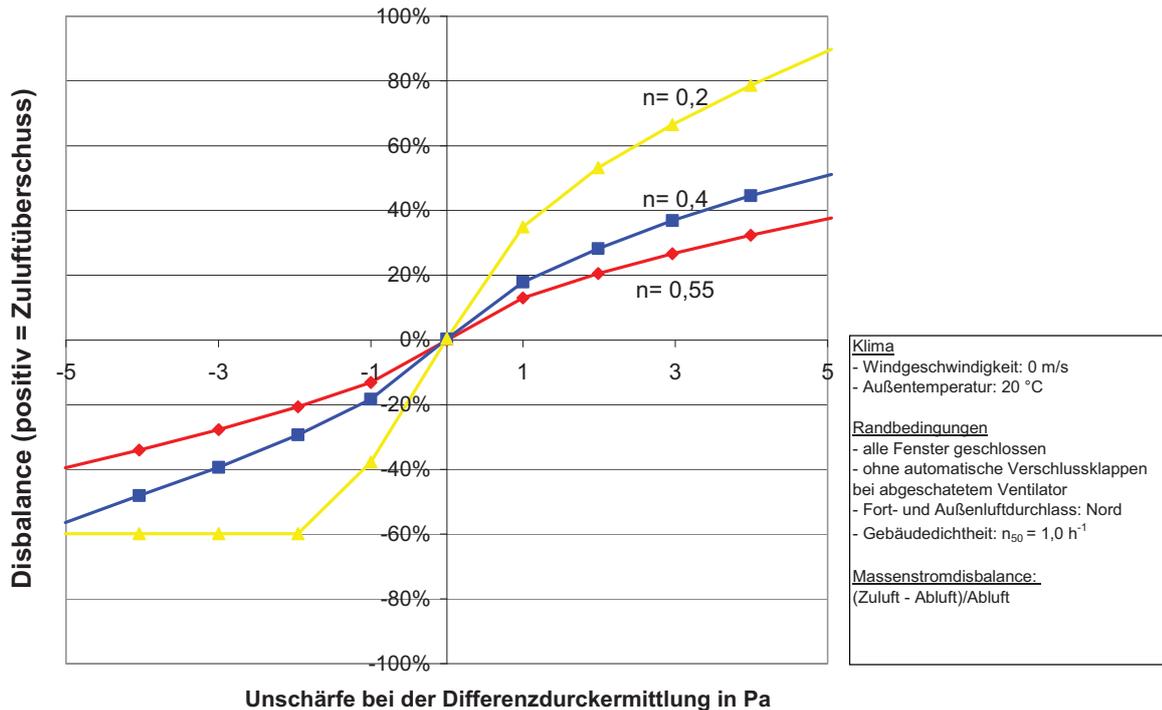


Abb. 7-7: Einfluss von Unschärfen bei der Differenzdruckermittlung auf die Massenbilanz für eine Gebäudedichtheit von $n_{50} = 1,0 \text{ h}^{-1}$

Hier ergibt sich bei einer Unschärfe von 1 Pascal und einem Luftwechsel von $0,4 \text{ h}^{-1}$ bereits eine Disbalance von +/- 18 %. Um eine maximale Disbalance sicherzustellen, muss eine höhere Genauigkeit bei der Ermittlung der Differenzdrücke erreicht werden, was in der Praxis vermutlich schwierig werden wird.

7.1.6 Bewertung

Die Durchführung des Massenstromabgleichs durch messen der Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnen- und Außendruck ist theoretisch möglich. Die rechnerischen Abschätzungen zeigen jedoch, dass eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der Druckdifferenzen erforderlich ist. Vor diesem Hintergrund wird die Realisierung des Massenstromabgleichs nur für sehr dichte Gebäude mit einem $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ als Erfolg versprechend eingeschätzt. Die Dichtigkeit entspricht den Anforderungen für Passivhäuser [Feist 1993]. Wenn eine maximale Disbalance von +/- 10 % bei Auslegungsluftwechsel als Mindestgenauigkeit gefordert wird, ist eine Unschärfe bei der Ermittlung der Druckdifferenzen von +/- 1 Pascal erforderlich.

Die hier vorgenommene Bewertung der Möglichkeit zum Massenabgleich beruht auf theoretischen Untersuchungen. Insbesondere für sehr dichte Gebäude mit $n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ sollte der Ansatz durch Messungen in realen Gebäuden verifiziert werden und im praktischen Betrieb getestet werden. Da in dem vorliegenden Forschungsprojekt die Volumenströme bereits durch die Drd-Methode und die luftqualitätsgeführte Volumenstromregelung beeinflusst werden, können Untersuchungen zur Massenstrombilanz nicht in die hier durchgeführten Messungen aufgenommen werden.

7.2 Überprüfen der Fensterstellung beim Verlassen des Gebäudes

Ist die Drd-Methode in der Lüftungsanlage umgesetzt, kann ergänzend zu der automatischen Anpassung des Volumenstroms und der Nutzerinformation zur Fensteröffnung die Möglichkeit vorgesehen werden, dass der Bewohner beim Verlassen des Gebäudes über einen Schalter eine Drd-Sequenz auslöst und nach ca. 15 Sekunden einem Hinweis darüber bekommt, ob alle Fenster geschlossen sind oder nicht.

Die Haftungsfragen müssen in dem Fall natürlich mit Sorgfalt bedacht werden. Auch wenn die Vorhersagegenauigkeit der Drd-Methode in Bezug auf den Fensteröffnungszustand nach [Grosklos 2002] bei über 99 % liegen kann, so entspricht ein lüftungstechnisch geschlossenes Fenster nicht automatisch einem sicherheitstechnisch geschlossenen Fenster. Beispielsweise kann ein Magnetschließer die lüftungstechnische Dichtheit unter Umständen erreichen. Sicherheitstechnisch ist dies jedoch nicht gegeben.

Auf jeden Fall sollte eine entsprechende Testsequenz im Unterdruckbetrieb gefahren werden, damit angelehnte Türen und Fenster tendenziell geöffnet werden.

7.3 Sichern eines Mindestluftwechsels

Es ist denkbar, dass auch bei abgeschalteter Lüftungsanlage, die Drd-Sequenz in größeren Zeitabständen durchfahren wird. Werden über längere Zeit geschlossene Fenster festgestellt, z. B. während die Bewohner in Urlaub sind, kann sich die Lüftungsanlage für definierte Zeitintervalle einschalten und so einen bauphysikalisch notwendige Mindestluftwechsel sicherstellen.

7.4 Erkennen des Betriebs von Abluft-Dunstabzugshauben bzw. Abluft-Wäschetrocknern

Beim Betrieb von Dunstabzugshauben im Abluftbetrieb oder Abluft-Wäschetrocknern wird zeitlich begrenzt ein hoher Abluftvolumenstrom aus dem Gebäude gefördert. Dieser kann deutlich über dem Volumenstrom der mechanischen Lüftungsanlage liegen. Moderne Abluftshauben erreichen je nach Einbauzustand Volumenströme von bis zu 1.000 m³/h. Der Volumenstrom von Abluft-Wäschetrocknern liegt nach [Wazula 2006] zwischen 100 bis 300 m³/h. Aus energetischer Sicht und aus Sicht der Drd-Methode sollte auf derartige Geräte verzichtet werden und alternativ eine Umluft-Dunstabzugshaube oder ein Kondensationswäschetrockner verwendet werden.

Kann dies nicht realisiert werden, könnte zumindest der Abluftventilator der mechanischen Lüftungsanlage ausgeschaltet werden, wenn die Geräte mit zusätzlichem Abluftvolumenstrom in Betrieb genommen werden. Zu beachten ist dabei jedoch, dass in dem Fall die gerichtete Gebäudedurchströmung aufgehoben wird, so dass z. B. bei Betrieb der Dunstabzugshaube Gerüche aus dem Bad bzw. der Toilette in das Gebäude gezogen werden können. Gegebenfalls sollte der Abluftvolumenstrom deswegen nur auf die reduzierte Lüftung (Minimum) verringert werden.

Es stellt sich die Frage, ob das Einschalten von Dunstabzugshaube oder Wäschetrockner über die Drd-Methode erkannt werden kann. Ausgewertet werden muss hierzu der Gebäudeinnendruck bei abgeglicherer Lüftungsanlage. Beim Einschalten der Geräte mit zusätzlichem Abluftvolumenstrom wird der Gebäudeinnendruck sinken (Unterdruck). Die Änderung des Innendrucks kann von dem Drucksensor festgestellt werden. Sie muss vor dem Hintergrund der Druckänderungen bewertet werden, die durch das Wetter hervorgerufen werden. Nach Abb. 3-6 kann die Druckänderung aufgrund von extremen Wettersituationen bis zu 15 Pascal betragen (max. Klima Süd). Diese Extremsituationen sind jedoch selten, und die Änderung des Wetters vollzieht sich langsam. Quantitative Aussagen zu üblichen Änderungen des Innendrucks aufgrund des Wetters können zu einem späteren Zeitpunkt aus den Messungen der Phase III abgeleitet werden.

Mit dem Gebäudemodell wird im Folgenden berechnet, wie groß die Änderungen im Innendruck sind, wenn ein solches Gerät eingeschaltet wird. Der Unterdruck wird für unterschiedliche Abluftvolumenströme und drei Ausprägungen der Gebäudedichtheit bestimmt. Vereinfachend wird dabei der zusätzliche Abluftvolumenstrom vorgegeben und nicht aus der Geräte-kennlinie berechnet. Dies kann bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt für ein konkretes Gerät erfolgen.

Die Änderung der Gebäudeinnendrucks beim Einschalten eines Geräts mit zusätzlichem Abluftvolumenstrom ist in Abb. 7-8 dargestellt.

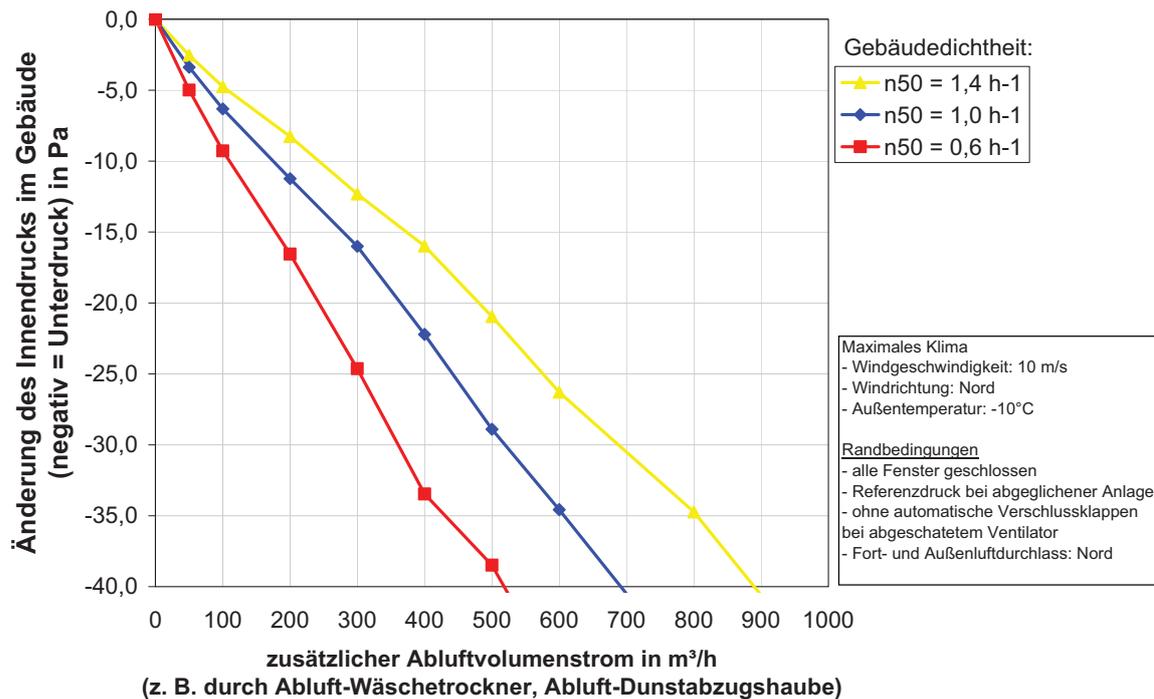


Abb. 7-8: Änderung des Gebäudeinnendrucks bei Betrieb eines Geräts mit zusätzlichem Abluftvolumenstrom für unterschiedliche Werte der Gebäudedichtheit

Die Antwort, ob das Einschalten von Geräten mit zusätzlichem Abluftvolumenstrom von der Drd-Methode erkannt werden kann, ist abhängig vom zusätzlich geförderten Abluftvolumenstrom und der Dichtheit der Gebäudehüllen. Bei einem Gebäude mit einer Dichtheit von $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ (Passivhausanforderung) erzeugt ein zusätzlicher Abluftvolumenstrom von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ eine Änderung im Innendruck von 10 Pa . Beträgt die Gebäudedichtheit $n_{50} = 1,4 \text{ h}^{-1}$, tritt lediglich eine Druckänderung von 5 Pa auf.

Prinzipiell kann das Einschalten von Abluft-Dunstabzugshauben und Abluft-Wäschetrocknern über den Drucksensor erkannt werden. Beantwortet werden muss jedoch noch die Frage nach der Höhe der wetterbedingten Schwankungen des Gebäudeinnendrucks und welcher Volumenstrom bei dem entsprechenden Gebäudeinnendruck tatsächlich von den Geräten noch gefördert wird (Gerätekennlinie).

8 Literatur

[Baumgartner 1989] Baumgartner, Tomas et al.: Luftaustausch in Gebäuden; AIVC (Fachinstitut für Gebäude und Klimatechnik); Bietigheim-Bissingen, 1989

[Brohmann 2000] Brohmann, Bettina; Cames, Martin & Anke Herold: Klimaschutz durch Minderung von Treibhausgasemissionen im Bereich Haushalte und Kleinverbraucher durch klimagerechtes Verhalten. Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes; Darmstadt, Berlin, Freiburg: Öko-Institut, 2000.

[Darby 2006] Darby, Sarah: The effectiveness of feedback on energy consumption. Environmental Change Institute, University of Oxford, 2006.

[Ebel et al. 2003] Ebel, Witta; Marc Großklos, Jens Knissel, Loga, Tobias; Kornelia Müller: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern – Teilbericht: Bauprojekt, messtechnische Auswertung, Energiebilanzen und Analyse des Nutzereinflusses; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 2003

[EPHW] Loga, Tobias; Ulrich Imkeller-Benjes: Energie-Pass Heizung/Warmwasser; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1997

[Feist 1993] Feist, Wolfgang: Passivhäuser in Mitteleuropa; Dissertation Gesamthochschule Kassel; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt, 1993

[Fischer 2007] Fischer, Corinna: Influencing Electricity Consumption via Consumer Feedback. A Review of Experience. TIPS Discussion Paper 8. Paper submitted to the ECEEE Summer Study, Berlin, 2007.

[Frick 2003] Frick, Jaqueline: Umweltbezogenes Wissen: Struktur, Einstellungsrelevanz und Verhaltenswirksamkeit. Dissertationsschrift, Philosophische Fakultät der Universität Zürich, 2003.

[Großklos 2002] Großklos, Marc; Jens Knissel: Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Erkennung von Fensteröffnungen über die Lüftungsanlage; nicht veröffentlichter Teilbericht zu dem Forschungsvorhaben „Wohnen in Niedrigenergie und Passivhäusern“ gefördert durch das Bundeswirtschaftsministerium Förderkennzeichen: 0327256A; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2002

[Hausladen 1990] Gerhard Hausladen: Handbuch der Schornsteintechnik. R. Oldenbourg Verlag München 1990

[Kempkes 2005] Kempkes, Christoph: Der Einfluss von windinduzierten Druckschwankungen auf das thermisch- hygrische Verhalten von durchströmten Leckagen. AiF-Bericht 13625N, Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V., Kassel 2005

[Loga 2003] Loga, T.: Heizgrenztemperaturen für Gebäude unterschiedlicher energetischer Standards; in: Bauphysik 25 (2003) Heft 1

- [PHPP] Passivhaus Projektierungs Paket; Passivhaus Institut; Darmstadt; 4 Auflage 2002
- [Roberts 2004] Roberts, Simon; Humphries, Helen & Verity Hyldon: Consumer preferences for improving energy consumption feedback. Report to OFGEM. Bristol: Centre for Sustainable Energy, 2004.
- [Schnieders 1998] Schnieders, J; M. Such: Untersuchungen der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim; Passivhaus Institut, Darmstadt 1998
- [Strauß 2006] Strauß, Rolf-Peter; Thomas Seebörger, Roland Schumacher: Innovative Lüftungsgeräte mit „AirSwitcher“ – erste Erfahrungen und Umsetzungen in die Praxis; im Tagungsband der 10. Passivhaustagung 2006; Passivhaus Institut; Darmstadt, 2006
- [Wazula 2006] Wazula, Herbert: Feuerstätten in Niedrigenergiehäusern, Landesverband für das Bayrische Kaminkehrerhandwerk; 2006
- [Werner 2006] Werner, Johannes, Matthias Laidig: EN 832 – Die Gebäudehülle als Teil des Lüftungssystems; Tagungsband des 1. Europäischen BlowerDoor-Symposium; Energie- und Umweltzentrum am Deister; Springe, 2006