

**„Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Altbaubestand
anhand von Blower-Door Messungen.**

**Korrelation zwischen den aus Blower-Door- und
Tracergasmessungen erhaltenen „natürlichen“ Luftwechsel“**

Von der Fakultät Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der
Technischen Universität Freiberg

genehmigte

und durch AnBUS (Analyse und Bewertung von Umweltschadstoffen) e.V.
in Fürth

unterstützte

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Geoökologe

Vorgelegt von:

Tino Weithaas

geboren am 01.06.1972 in Zwickau

Gutachter: 1. **Prof. Dr. Jörg Matschullat**

TU Bergakademie Freiberg

2. **Dr. Kirsten Pleßow**

TU Bergakademie Freiberg

Tag der Abgabe: 18.07.2003

Technische Universität Bergakademie Freiberg



Fakultät: Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau

Studiengang: Geoökologie

Vertiefungsrichtung: Atmosphäre- und Klimaforschung

Thema der Diplomarbeit:

„Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Althaubestand anhand von Blower-Door-Messungen. Korrelation zwischen dem mittels Blower-Door gemessenen Luftwechsel und dem mittels Tracergas Messungen ermittelten „natürlichen“ Luftwechsel“

bearbeitet von: Tino Weithaas

zur Erlangung des akademischen Grades: Diplom-Geoökologe

1. Prüfer/Gutachter: Prof. Dr. J. Matschullat
2. Prüfer/Gutachter: Dr. A. Pleßow

Übergabetermins des Diplomthemas: 01.02.2003

Abgabetermin der Diplomarbeit: 18.07.2003

Vorsitzender des Prüfungsausschuss

Prüfer/Gutachter

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Härtensdorf, den 18.07.2003

.....

Tino Weithaas

Inhalt

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

1 Einleitung	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Natürlicher Luftwechsel.....	5
2.1.1 Einflussgrößen	5
2.1.2 Beschreibung der Bestimmungsmethoden	8
2.2 Luftdichtigkeit von Gebäuden → n_{50} - Wert.....	16
2.2.1 Grundlagen.....	16
2.2.2 Darstellung der Bestimmungsmöglichkeit.....	19
2.3 Bestehende mathematische Beziehungen	21
3 Praktische Umsetzung	25
3.1 Erläuterung der Verfahren.....	25
3.1.1 Tracergasverfahren.....	26
3.1.2 Blower-Door-Verfahren.....	33
3.1.3 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit	37
3.2 Durchführung	42

4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse	45
4.1 Ergebnisüberblick	45
4.2 Interpretation der erhaltenen Werte	48
4.2.1 Bestimmung der Güte der theoretischen Berechnungs- möglichkeiten	48
4.2.2 Untersuchung auf Gewichtung der Einflussgrößen	53
4.2.3 Überblick über die natürlichen und unter 50 Pa Differenzdruck erzwungenen Luftwechsel	64
4.2.4 Beispiel des Raumklimaverhaltens bei den bestehenden durchschnittlichen natürlichen Luftwechseln	67
5 Zusammenfassung	72
6 Literaturverzeichnis	74
7 Anhang	77

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Druckverhältnisse an einem windangeströmten Gebäude (Draufsicht).....	5
Abbildung 2: Druckverhältnisse in einem beheizten Innenraum (Seitenansicht).....	6
Abbildung 3: Einflussgrößen auf den Luftwechsel aus Heidt (1987a).....	8
Abbildung 4: einfaches Strömungsmodell eines Raumes (Hilbig, 1999: 35).....	8
Abbildung 5: typische Abklingkurve bei der Konzentrationsabfall-Methode aus Reinhold (1986: 10)	13
Abbildung 6: typischer Kurvenverlauf bei einer Konstant-Emissions-Methode aus Reinhold (1986: 13)	14
Abbildung 7: typischer Kurvenverlauf einer Konstant-Konzentrations-Methode aus Reinhold (1986: 12)	15
Abbildung 8: luftdicht eingebaute Gebläse und Manometer in der Praxis nach Cordes (2001)	20
Abbildung 9: Prinzip eines IR-Photometers (Baumbach 1992: 173)	29
Abbildung 10: Allgemeine Versuchsanordnung der Tracergasmessungen.....	31
Abbildung 11: Gebäude, bei dem ein erzwungener Differenzunterdruck erzeugt wird .	35
Abbildung 12: Exemplarisches Volumenstrom-Druckdifferenz-Diagramm einer Über- und Unterdruckmessung.....	36
Abbildung 13: Kalibriergerade bei jeweiliger Zugabe von 90 ppmv	39
Abbildung 14: Standorte der Messobjekte.....	43
Abbildung 15: Vergleich gemessener natürlicher Luftaustausch mit berechnetem natürlichen Luftwechsel nach der Strömungsformel	48
Abbildung 16: Vergleich zwischen gemessenem natürlichen Luftwechsel und berechnetem Wert nach Klopfer	49

Tabelle 1: Ideale Tracergase nach VDI 4300 (2001), Blatt 7	11
Tabelle 2: Grenzwerte für die Spurengasanwendung aus VDI 4300 (2001), Blatt 7 ...	12
Tabelle 3 : Kalibrierung des CO ₂ -Analysegerätes.....	38
Tabelle 4: Druckdifferenzabweichung während der Messperiode einer Blower-Door- Messung	41
Tabelle 5: Überblick über die Messgrößen und die erzielten Ergebnisse.....	45
Tabelle 6: Oneway Anova, durchgeführt mit dem Statistikprogramm SPSS.....	51
Tabelle 7: Wesentliche Ergebnisse des Vergleiches zwischen Reihenhäusern und freistehenden Gebäuden.....	61
Tabelle 8: Perzentilwerte der Blower-Door-Messungen und der Bestimmung des natürlichen Luftwechsels bei verschiedenen Fensterbaujahren.....	66
Tabelle 9: CO ₂ -Grenz- bzw. Richtwerte aus Bade.....	69
Tabelle 10: Durchschnittliche Luftwechselwerte in h ⁻¹ bei normaler manueller Lüftung.....	70

1 Einleitung

Während des Studiums der Geoökologie ist der Verfasser dieser Arbeit hauptsächlich mit den Umweltbelastungen im Außenbereich konfrontiert worden. Vor allem in der Atmosphärenforschung werden fast ausschließlich Problemstellungen bearbeitet, welche klimatisch eher regionale und globale Relevanz besitzen. Soll allerdings die alltägliche Umwelt eines durchschnittlichen mitteleuropäischen Menschen auf ihre gesundheitliche und ökologische Qualität hin untersucht werden, so ist dem umbauten Innenraum die entscheidende Aufmerksamkeit zu schenken. In diesem Milieu bewegt sich eine typische Person im Mittel 90% am Tag. Da die stoffliche Zusammensetzung der Innenraumluft erhebliche Unterschiede im Vergleich zur Außenluft aufweist, muss diese auch getrennt davon untersucht werden. Nur so können neuartige Krankheitsbilder oder verschiedenste mikrobiologische Probleme mit der baulichen Hülle verstanden und behandelt werden.

Die Luft von bewohnten Räumen kann zum Beispiel durch eine Vielzahl von Stoffen belastet sein. Hierzu sind besonders flüchtige und mittelflüchtige organische Verbindungen, welche aus Baustoffen und Einrichtungsgegenständen emittieren können, aber auch Geruchsstoffe oder Hausstaub zu zählen. Durch die Gebäudenutzer werden beim Kochen oder Waschen eine erhebliche Menge Wasserdampf freigesetzt, was bei zu langsamem Abtransport zur Tauwasser-, und damit zur Schimmelbildung auf oder unter kühlen Oberflächen führen kann. Dies würde eine zusätzliche Beeinträchtigung der klimatischen Verhältnisse ergeben und die Bausubstanz beanspruchen. Auch wird bei der Atmung reichlich CO₂ abgegeben. Nicht zuletzt verschlechtern die Nutzer z.B. durch Zigarettenrauch die Atemluft beträchtlich.

Aus diesen Gründen sieht der Gesetzgeber in der Energieeinsparverordnung 2002 eine Mindestluftwechselrate zur Aufrechterhaltung der Raumlufthygiene vor. Dabei entstehen immer wieder Zielkonflikte mit dem Wärmeschutz, da der Energieverbrauch von Gebäuden durch den Luftaustausch der Gebäudehülle stark beeinflusst wird. Die geforderte Frischluftzufuhr soll somit ein verträgliches Mittel zwischen Schadstoffabfuhr und Wärmeverluste durch zu viel Lüftung darstellen.

Im Zuge der intensivierten Energieeinsparmaßnahmen in den letzten Jahren wurde aber durch energetische und schallschutztechnische Konstruktionen die Gebäudehülle besser abgedichtet, um den Wärmeverlust durch Fugen und Ritzen weitestgehend zu verhindern. Den Planern ist es bisher kaum möglich, den hygienisch erforderlichen

Luftwechsel sicherzustellen, da in der Regel keine Daten über Luftwechselzahlen in Altbauten vor und nach einer energetischen Sanierung vorliegen. Weiterhin ist die Erfassung der natürlichen Luftwechselzahlen für den praktischen Baualltag zu aufwändig in Bezug auf Durchführung und Kosten. So können Problemstoffe aus dem Innenraum durch Leckagen nicht mehr ausreichend abtransportiert werden. Dabei kommt dem Nutzungs- und Lüftungsverhalten der Bewohner eine immer größere Bedeutung zu.

Zielsetzung dieser Diplomarbeit ist es, eine einfache aber reproduzierbare Methode zur Bestimmung des Luftwechsels n zur Verfügung zu haben. Diese ist definiert als der Quotient aus dem ausgetauschten Luftvolumenstrom und dem Raumvolumen. Da die Durchführung eines „Blower-Door-Testes“ vor und nach einer Altbausanierung eine für die Planung und Qualitätskontrolle der Bauausführung notwendige Untersuchung ist, liegt es nahe, das „Blower-Door“ Verfahren zu wählen. Diese Daten liegen in der Regel schon vor, können ansonsten aber auch einfach ermittelt werden. Bisher fehlt jedoch noch der Zusammenhang zwischen diesem erzwungenen Wert aus der Luftdichtigkeitsmessung und dem Luftwechsel unter realen Bedingungen. Insofern soll bei einer repräsentativen Auswahl von Bauten der Luftwechsel bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen mit beiden Methoden erfasst und dokumentiert werden, um die Chance zu haben, eine Korrelation zwischen den beiden Verfahren mit ausreichender Signifikanz feststellen zu können. Unabhängig von einer bestehenden Korrelation soll eine statistische Untersuchung von erzwungenen und natürlichen Luftaustausch in den verschiedensten Gebäudetypen vorgenommen werden.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Natürlicher Luftwechsel

2.1.1 Einflussgrößen

Nach Reinhold (1986) wird der Luftwechsel in Innenräumen maßgeblich von zwei Einflussgrößen bestimmt.

Zum Einen führen die herrschenden Windverhältnisse zwischen Innen- und Außenseite des Gebäudes zu Druckunterschieden, welche einen Luftaustausch über die Leckagen der Gebäudehülle bewirken.

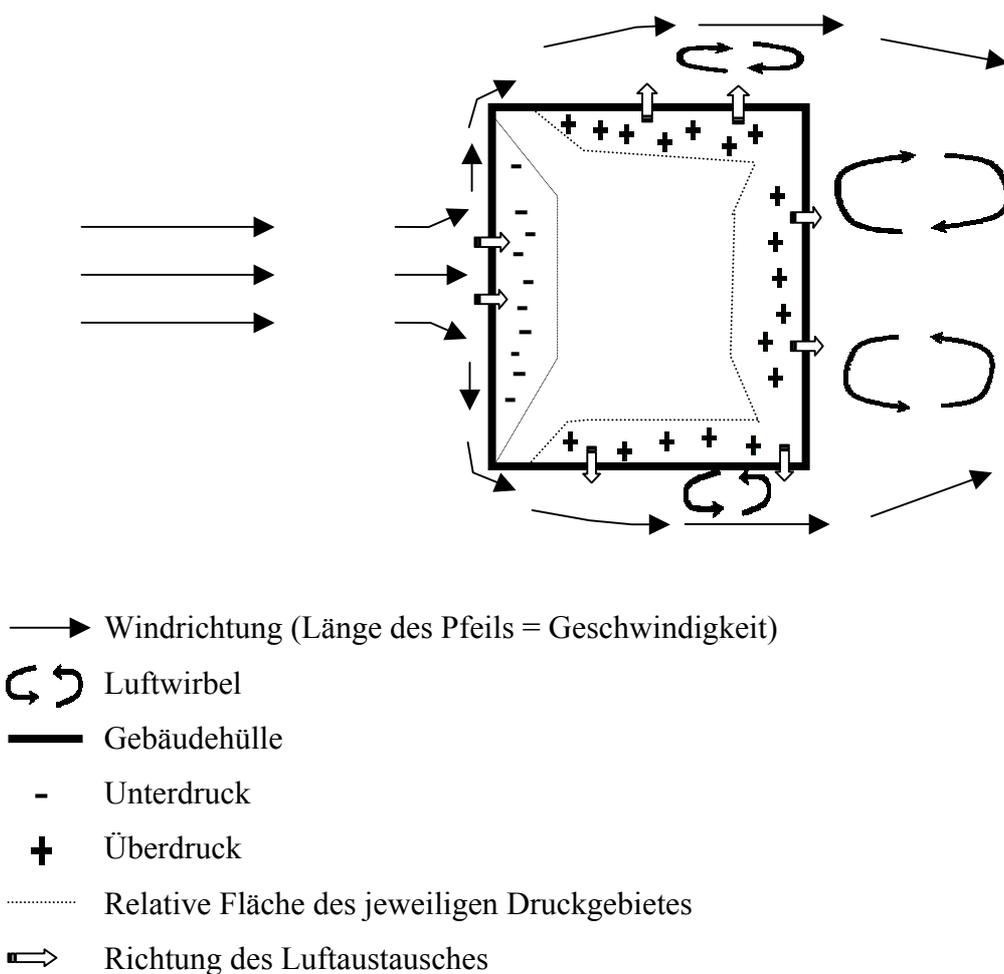


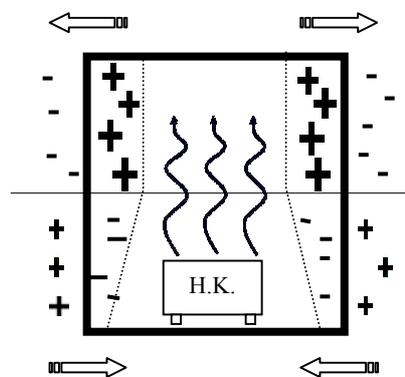
Abbildung 1: Druckverhältnisse an einem windangeströmten Gebäude (Draufsicht)

Dabei wird durch die auftreffenden Luftmassen ein Überdruck und damit ein Differenzdruck zwischen der äußeren und inneren Wandoberfläche erzeugt, der durch Ausgleichströmung von Luftmolekülen kompensiert wird. Je höher die Windgeschwindigkeit ist, umso größer ist der Differenzdruck und umso mehr Luft wird ausgetauscht. Auch der Anströmwinkel hat Bedeutung. Er schafft bei 90° den höchsten Staudruck an der angeströmten Wand, da die Windgeschwindigkeit abgeschwächt und dabei ein Teil der kinetischen Strömungsenergie in potentielle Druckenergie umgewandelt wird.

An den parallel angeströmten Gebäudeseiten und an der Rückseite nimmt die Geschwindigkeit des Windes wieder zu und es entsteht ein Unterdruck an den Außenflächen, was wiederum einen Ausgleichsstrom zwischen Raum- und Außenluft zur Folge hat.

In Abbildung 1 sind die möglichen vorherrschenden Druckunterschiede an einem Gebäude bei senkrecht einfallenden Wind graphisch dargestellt.

Zum Anderen kommt es durch Unterschiede der Temperaturen zu Druckdifferenzen und damit zu Ausgleichströmungen. Je größer diese Differenzen sind, umso größer ist auch der Luftaustausch.



- Gebäudehülle
- Relative Fläche des Druckgebietes
- ⊕ Überdruck durch höhere Temperatur (je größer umso höher der Überdruck)
- ⊖ Unterdruck durch niedrigere Temperatur
- ⇄ Richtung des Luftaustausches
- ⤴ aufsteigende aufgeheizte Raumluft
- H.K. Heizkörper
- Neutrale Zone

Abbildung 2: Druckverhältnisse in einem beheizten Innenraum (Seitenansicht)

In Abbildung 2 ist ein durch Konvektionswärme beheizter Raum dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass eine Temperaturexpansion mit steigender Raumhöhe vonstatten geht. Dabei entsteht im Raum ein Überdruck. Diese, durch die Auftriebskraft der aufgeheizten Luft bewirkte Druckzunahme bis zur Geschossdecke, muss zum Beispiel bei offenen Treppenhäusern oder Aufzugschächten in mehrgeschossigen Gebäuden bei der Berechnung mit beachtet werden, weil unterhalb der „neutralen Zone“ (d.h. Zone, in der weder Über-, noch Unterdrücke herrschen) ein Luftausgleich von außen nach innen erzeugt wird. Nach Reinhold (1986: 14 ff) kommt es bei normalen geschlossenen Geschossen dadurch allerdings nur zu geringen Druckunterschieden.

Da in hier betrachteten Fällen größtenteils Wohnräume mit 3 m Zimmerhöhe untersucht werden, wird angenommen, dass der Druck auf der gesamten Höhe ausgeglichen ist und keine Differenzen durch Temperaturunterschiede im Raum existieren.

Wie stark die Luft, angetrieben von den oben genannten Kräften, ausgetauscht wird, hängt entscheidend von der Dichtheit der Gebäudehülle ab.

Aus Krooß et al. (1997) wird ersichtlich, dass durch diese „freie Lüftung“ bei Gebäuden, die nach der Wärmeschutzverordnung erbaut wurden, der erforderliche Mindestluftwechsel nicht mehr erreicht werden kann. Die bestehende Differenz muss durch eine „manuelle Lüftung“, welche über den Nutzer erfolgt oder mittels „mechanischer Lüftung“, z.B. einer Klimaanlage, ausgeglichen werden.

Abbildung 3 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Einflussparameter auf den Luftwechsel. Hier sind neben den schon angesprochenen auch subjektive Größen, wie Lärm, Raumluftqualität und andere psychologische Faktoren dargestellt.

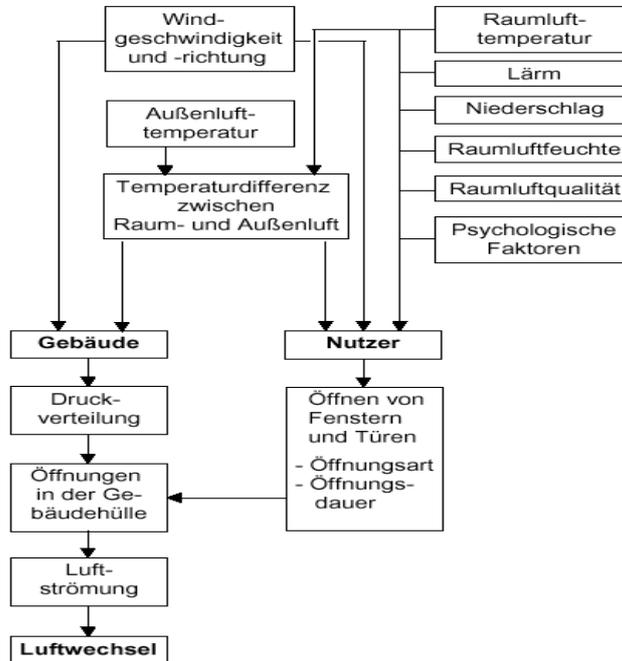


Abbildung 3: Einflussgrößen auf den Luftwechsel aus Heidt (1987a)

2.1.2 Beschreibung der Bestimmungsmethoden

mathematische Berechnungsmöglichkeiten:

Im Folgenden werden die wichtigsten mathematischen Zusammenhänge aufgezeigt, die zur Ermittlung des Luftwechsels führen (Ihle 1997: 156 f; Reinhold 1986: 21 f). Auf Herleitungen wird verzichtet, da sie nicht Gegenstand dieser Arbeit sind.

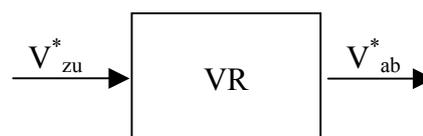


Abbildung 4: einfaches Strömungsmodell eines Raumes (Hilbig, 1999: 35)

Der Luftwechselkoeffizient n kann durch folgende Beziehung definiert werden:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{V}^*}{\mathbf{V}_R} \quad \{1\}$$

n = Luftwechselkoeffizient in h^{-1}
 V^* = Luftvolumenstrom in m^3/h
 V_R = Luftvolumen des Raumes in m^3

Zur Veranschaulichung der Gleichung {1}, ist in Abbildung 4 ein einfaches Strömungsmodell dargestellt.

Für Fenster und Türen, die der Luftströmung einen bestimmten Widerstand entgegen stellen, wurde durch zahlreiche experimentelle Messungen folgende Beziehung entwickelt:

$$\mathbf{V}^* = \mathbf{a} * \mathbf{l} * \Delta\mathbf{p}^{2/3} \quad \{2\}$$

V^* = Luftvolumenstrom in m^3/h
 a = Fugendurchlasskoeffizient in $m^3/mhPa^{2/3}$
 l = Fugenlänge in m
 Δp = Druckdifferenz zw. Innen- und Außenseite in Pa

Hierbei ist der Fugendurchlasskoeffizient vom Hersteller der Tür oder des Fensters zu erfahren. Weiterhin ist die Fugenlänge abzumessen. Zur Berechnung des Differenzdruckes zwischen der Außen- und Innenseite des Raumes ist jeweils der Wandoberflächendruck zu bestimmen.

Aus {1} und {2} folgt nun:

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{a} * \mathbf{l} * \Delta\mathbf{p}^{2/3}}{\mathbf{V}_R} \quad \{3\}$$

Zu erwähnen ist, dass diese rechnerische Ermittlung nur zur groben Bestimmung des Luftwechsels dienen kann. Es ist so zum Beispiel überprüfbar, ob die bei praktischen Messungen gewonnenen Werte in der richtigen Größenordnung liegen.

Es kann keine Einbeziehung von bestimmten Gegebenheiten, wie Lüftungsverhalten und damit verbundene sich ändernde Öffnungsweiten von Fenstern erfolgen. Damit ist

eine Ermittlung des Luftaustausches unter Alltagsbedingungen nicht möglich. Soll dieses durchgeführt werden, sind weitere aufwändigere Berechnungen notwendig oder praktische Messverfahren erforderlich. Einige solcher Verfahren werden nachfolgend näher betrachtet.

Tracergasmethoden:

Die Bestimmung des Luftwechsels erfolgt hier durch ein indirektes Messprinzip. Die Idee, welche schon seit langem in den verschiedensten Bereichen angewendet wird, besteht darin, in dem zu betrachteten Messraum ein geeignetes Tracergas (auch Spurengas) einzubringen. Es kann nun der Verlauf dieses Gases in der Messzone aufgezeichnet und nachfolgend durch einen mathematischen Ansatz ausgewertet werden (Lohmeyer 1992).

Das Prinzip eines einfachen Ein-Zonen-Modells (siehe auch Abbildung 4), von welchem auch in dieser Arbeit ausgegangen wird, ist die vollkommene Vermischung einer kleinen Menge des Tracergases mit der Raumluft. Weiterhin bleibt die Tracergaskonzentration auch in ihrer zeitlichen Entwicklung räumlich homogen.

Um dieses zu erreichen, muss das Tracergas folgende Eigenschaften erfüllen (Heidt 1987a; Raatschen 1995a):

- Seine Konzentration ist bereits bei sehr geringen Werten genau bestimmbar, d.h. auch, dass die Querempfindlichkeit des Nachweisverfahrens auf andere Inhaltsstoffe der Luft gering ist.
- Das Tracergas ist leicht verfügbar und preisgünstig.
- Es ist chemisch stabil, d.h. es zerfällt nicht und reagiert nicht mit den Bestandteilen der Luft oder des Gebäudes.
- Es adsorbiert (desorbiert) nicht an Wänden oder Einrichtungsgegenständen.
- Das Gas ist ungiftig, geruchlos, nicht brennbar und nicht explosiv.
- Es hat eine mit der Luft vergleichbare Dichte und ist daher mit ihr gut vermischbar.
- Die Tracersubstanz ist normalerweise in der Umgebung des Testraumes nicht enthalten und es gibt auch keine unbekannte Quelle im Raum.

In der Praxis sind eine Vielzahl von Gasen getestet worden. Keines konnte alle der oben genannten Kriterien erfüllen. Aber alle erfolgreich getesteten Spurengase erfüllten einen Großteil dieser Bedingungen. Die vielversprechendsten unter ihnen sind in ihrer Genauigkeit vergleichend untersucht worden (Reinmuth 1996). Das Ergebnis dieser Testreihe ist in der Tabelle 1 zusammengefasst. Hier werden die idealsten Tracergase mit ihren jeweiligen Nachweisverfahren und Nachweisgrenzen aufgelistet. Weiterhin ist das Verhältnis der zugehörigen Dichten im Verhältnis zur Dichte der Luft zu erkennen. Bei N_2O kann bei höheren Konzentrationen der MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration, siehe Tabelle 2) knapp erreicht werden. Bei permanenter N_2O -Konzentration von 500 ppmv wurde eine merkliche Verringerung der Reaktionsfähigkeit bei Testpersonen festgestellt. Deshalb dürfen keine anderen Personen außer dem Messpersonal im Raum sein. Weiterhin sollten die Konzentrationen bei der Messung unter 100 ppmv liegen. Je nach Genauigkeit des Messgerätes können die Konzentrationen natürlich heruntergefahren werden (Heidt 1987a).

Tabelle 1: Ideale Tracergase nach VDI 4300 (2001), Blatt 7

Gas	Hintergrund Vol. Anteile	Nachweismethoden	Messbereich in Vol. Anteile	Relative Dichte in Bezug zur Luftdichte
SF_6	(0,85-1,5) $\cdot 10^{-12}$	-Gaschromatograph m. Elektroneneinfangdetektor -Infrarot-Gasanalysator -Photoakustikdetektor	$5 \cdot 10^{-12}$ - $200 \cdot 10^{-9}$	4,5
C_6F_6	$1 \cdot 10^{-12}$	-Gaschromatograph mit Elektroneneinfangdetektor -Massenspektrometer	$50 \cdot 10^{-12}$ - $10 \cdot 10^{-9}$	
N_2O (Lachgas)	$315 \cdot 10^{-9}$	-Infrarot-Gasanalysator -Photoakustikdetektor	$1 \cdot 10^{-6}$ - $200 \cdot 10^{-6}$ $50 \cdot 10^{-9}$	1,53
CO_2	$360 \cdot 10^{-6}$	-Infrarot-Gasanalysator -Photoakustikdetektor	10^{-6} - $5000 \cdot 10^{-6}$ $3 \cdot 10^{-6}$	1,529

Tabelle 2 zeigt die zulässigen Indikatorgasmassenkonzentrationen, die zum Schutz des Messpersonals und der Bewohner eingehalten werden müssen.

Tabelle 2: Grenzwerte für die Spurengasanwendung aus VDI 4300 (2001), Blatt 7

Gas	MAK-Wert in mg/m ³	Spitzenbegrenzung*
N ₂ O	200 (100*10 ⁻⁶)	4
SF ₆	6000 (1000*10 ⁻⁶)	4
CO₂	9000 (5000*10⁻⁶)	4

* in einem 15 minütigen Zeitraum soll eine 4fache Grenzkonzentration nicht überschritten werden.

In der langjährigen Praxis hat sich Schwefelhexafluorid (SF₆) als ideales Tracergas bewährt. Es ist am besten detektierbar, wobei mittels gaschromatographischer Bestimmung die Konzentration sogar im pptv-Bereich liegen kann. Damit werden nur geringe Mengen benötigt und die bestehenden Grenzwerte weit unterschritten. Es zerfällt erst oberhalb 550°C und ist daher äußerst stabil. Beim Versuch mit Ratten wurden sogar bei Konzentrationen von 80 Vol.% SF₆ und 20 Vol.% O₂ keinerlei Reaktionen festgestellt (Raatschen 1995a).

Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurde CO₂ eingesetzt. Beim Einsatz dieses Gases ist zu beachten, dass es sehr viele natürliche Quellen gibt (Atmung, Außenkonzentrationen), die das Ergebnis beeinflussen können. Dagegen ist der MAK – Wert mit 5000 ppmv so hoch, dass keine Überschreitung zu befürchten ist. Weiterhin spricht für die Verwendung von Kohlendioxid, dass es relativ gut mittels gasanalytischen Handgerätes inklusive Datenlogger detektierbar ist.

Konzentrations-Abfall-Methode...Das Prinzip dieses Verfahrens (siehe Heidt 1987a; Lohmeyer 1992; Maas 1995: 13) beruht auf der Einbringung einer bestimmten Menge eines Tracergases, bis eine gewünschte Anfangskonzentration erreicht wird. Wichtig ist die gründliche Vermischung des Gases mit der Raumluft, damit die Konzentration überall im Raum gleich ist. Durch den Luftaustausch des Gebäudeteiles mit seiner Umgebung kommt es zum Konzentrationsabfall. Dieser ist in Form eines Konzentrations-Zeit-Diagramms auswertbar (Abbildung 5).

Die Messperiode liegt hier zwischen dem 2. und dem 7. Messwert. Danach wird wieder Tracergas zugeführt.

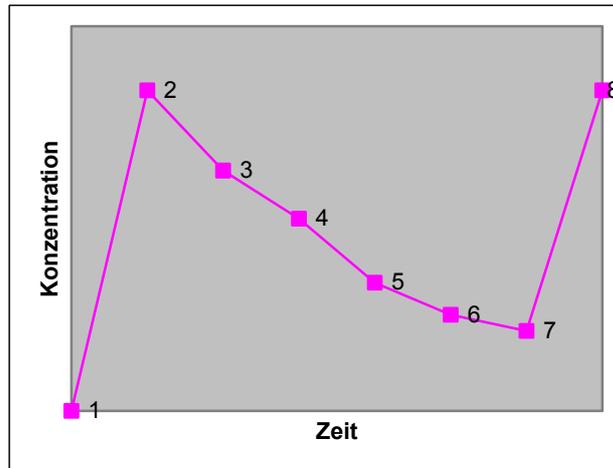


Abbildung 5: typische Abklingkurve bei der Konzentrationsabfall-Methode aus Reinhold (1986: 10)

Aus dem zeitlichen Konzentrationsabfall kann nun der Luftwechsel nach folgender Formel berechnet werden:

$$n = \frac{\ln(C_2/C_3)}{\Delta t} \quad \{5\}$$

n = Luftwechselkoeffizient in h^{-1}
 C_2 = Tracergaskonzentration zur Zeit t_2 in ppmv
 C_3 = Tracergaskonzentration zur Zeit t_3 in ppmv
 Δt = $t_3 - t_2$ in h

Es handelt sich hier um die am häufigsten verwendete Spurengasmethode, da auf eine komplizierte Gassteuerung verzichtet werden kann. Außerdem wird diese Methode für Raumvolumina kleiner 500 m^3 und Raumhöhen kleiner 4 m favorisiert (Reinmuth 1996). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen der Luftwechselrate werden nach der Konzentrationsabfall-Methode ausgeführt.

Konstant-Emissions-Methode...Im Gegensatz zur Abkling-Methode (siehe oben) wird bei diesem Verfahren die Tracergaszufuhr erst bei Versuchsbeginn gestartet. Danach wird sie über den gesamten Zeitraum konstant gehalten. Die Schwierigkeit liegt hier in der Durchmischung des Spurengases mit der Luft, da jener Vorgang erst vollständig ausgeführt ist, nachdem schon die Messung begonnen hat. Es muss immer

mit einer bestimmten Verzögerung bis zur Erfassung der durch das ständige Einblasen hervorgerufenen Konzentrationsänderung im Raum gerechnet werden. Diese Verzögerung wird beim Absaugen an mehreren Messstellen jeweils verschieden sein, da sie unterschiedlich weit vom Einblaseort entfernt liegen. Ein Konzentrations-Zeit-Diagramm hat folgendes Aussehen (Abbildung 6):

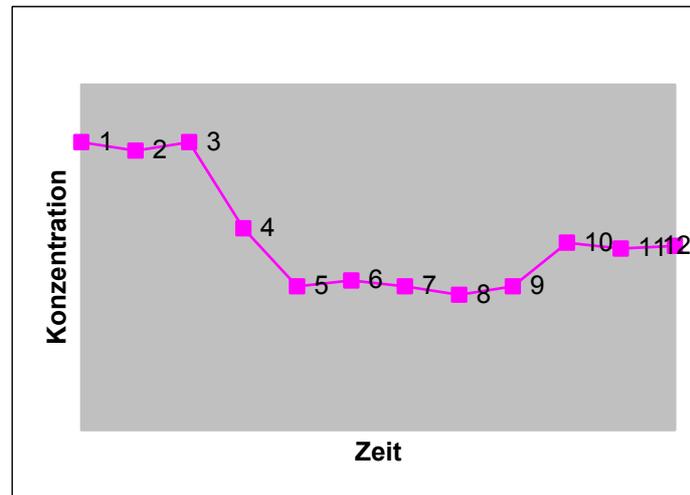


Abbildung 6: typischer Kurvenverlauf bei einer Konstant-Emissions-Methode aus Reinhold (1986: 13)

Dabei werden die Bereiche zwischen dem 3.–5. und dem 9.–10. Messwert als Übergangsperiode sowie zwischen dem 5.–9. Wert bzw. dem 10.–12. Messwert als Messperiode bezeichnet.

Mit folgender Beziehung ist nun der Luftwechsel berechenbar:

$$\mathbf{n = q / C * V} \quad \{6\}$$

n = Luftwechselkoeffizient in h^{-1}
 q = Tracergaseinspeisung cm^3/h
 C = Tracergaskonzentration in cm^3/m^3
 V = Volumen des Messraumes in m^3

Die Messung des zuströmenden Tracergasvolumenstromes ist recht aufwändig und wird meist nur für längerfristige Messungen und Bestimmungen größerer Luftwechsel angewendet. Ein rascher Konzentrationsabfall und eine dementsprechend kurze Messperiode kann durch eine passend dimensionierte ständige Injektion von Tracergas vermieden werden (Heidt 1987a; Lohmeyer 1992; Raatschen 1988a).

Konstant-Konzentrations-Methode...Ähnlich der Konzentrations-Abfall-Methode wird auch hier vor Beginn der Messung Tracergas in den zu untersuchenden Raum gegeben und gut mit der Luft vermischt. Ist die erforderliche Gaskonzentration erreicht, wird diese mittels geregelter Tracergaseinspeisung während der gesamten Messzeit konstant gehalten. Es wird das eingetragene Spurengasvolumen und die Gaskonzentration über die Zeit gemessen und in einem Konzentrations-Zeit-Diagramm ausgewertet (Abbildung 7).

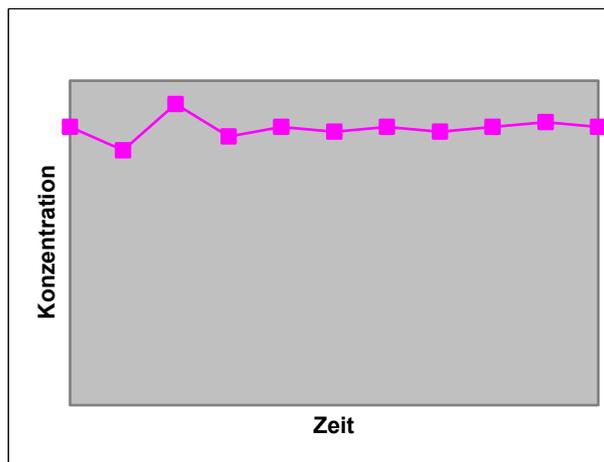


Abbildung 7: typischer Kurvenverlauf einer Konstant-Konzentrations-Methode aus Reinhold (1986: 12)

Es kann nun aus nachstehender Formel der Luftwechsel berechnet werden:

$$n = (1/C) * (1/V) * q \quad \{7\}$$

n = Luftwechselkoeffizient in h^{-1}
 C = Tracergaskonzentration in ppmv
 V = Volumen des Messraums in m^3
 Q = Tracergaseinspeisung in cm^3/h

Dieses Verfahren (Heidt 1987a; Lohmeyer 1992; Maas 1995: 16; Raatschen 1988c) ist durch die notwendige Regelung und Volumenmessung der Tracergaseinspeisung sehr teuer und aufwändig. Ein preiswerteres und einfacheres Verfahren, welches auch zur Konstant-Konzentrations-Methode zu zählen ist, wurde vom Brookhaven National Laboratory zur Bestimmung mittlerer Luftwechselraten entwickelt (Nowotny und Feustel 1996: 216). Mittels temperierten Emissionsröhrchen wird kontinuierlich eine bestimmte Menge an Spurengas (HFB oder Perfluorcarbon) pro Zeiteinheit in den zu

untersuchenden Raum diffusiv eingebracht. Im gleichen Raum vorhandene Adsorber (Sampler) sammeln die Gase in Abhängigkeit von der durch den Luftwechsel verdünnten Konzentration. Anschließend werden die an die Adsorber gebundenen Tracergaskonzentrationen gaschromatographisch ausgewertet. Der Luftwechsel berechnet sich daraus folgendermaßen:

$$n = \frac{s * V_P}{V_R * C * V_E} \quad \{8\} \quad n = \text{Luftwechselkoeffizient in h}^{-1}$$

s = Emissionsrate in $\mu\text{g/h}$
 V_P = Probenahmenvolumen in L
 V_R = gesamtes Raumvolumen in m^3
 C = Konzentration im Adsorber in $\mu\text{g/L}$
 V_E = Elutionsvolumen in mL

Es sind hier aber nur Mittelwerte der durchgeführten Messperiode bestimmbar. Kurzeitige Maxima oder Minima, wie sie in einer dauerhaften Aufzeichnung ermittelbar wären, sind nicht zu erkennen. Weitere Informationen in Cheong und Riffat (1995), Krooß et al. (1997) und Nowotny und Feustel (1996: 216).

2.2 Luftdichtigkeit von Gebäuden → n_{50} - Wert

2.2.1 Grundlagen

Die Forderung nach einer luftdichten Gebäudehülle begründet sich hauptsächlich auf die Ziele:

- vermeiden von Bauschäden,
- verbessern der Wohnqualität,
- erhöhen der Energieeffizienz.

Bauschäden infolge Leckagen können zustande kommen, wenn warme feuchte Luft aus dem Innenraum im Winter durch das Bauteil nach außen strömt, abgekühlt wird und dabei Wasser auskondensiert. Die Wohnqualität kann zum Beispiel dadurch negativ

beeinflusst werden, wenn durch größere Leckagen in Aufenthaltsbereichen kalte Außenluft nach innen einströmt und dadurch Zugluft erzeugt. Letztlich haben Undichtigkeiten in der Gebäudehülle einen erhöhten Abtransport von warmer Raumluft zur Folge. Nach Ebök (1995: 133) kann es zu Luftundichtigkeiten an folgenden Problembereichen kommen:

- linienförmige Anschlussstellen zwischen verschiedenen Bauteilflächen (Wand-Deckenanschlüsse),
- punktförmige Anschlüsse bei konstruktiven und haustechnischen Durchdringungen (Abflussleitungen),
- Bauelemente mit Schließ- und Einbaufugen (Fenster, Türen, Lugen),
- Undichtigkeiten in der Fläche (poröses undichtetes Mauerwerk).

Im Zuge dessen steigt der Heizenergieverbrauch des Gebäudes. Dieses hat neben zu hohen Energiekosten auch Einfluss auf die Klimaerwärmung durch vermehrten CO₂-Ausstoß (Ebök 1995: 61). Aus diesem Grund sind im Jahre 2001 die Normen DIN 4108, Teil 7 und DIN EN 13829 erschienen, welche die Anforderungen an die Luftdichtigkeit und deren Überprüfung regeln. In der DIN 4108, Teil 7, werden die Anforderungen an die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle formuliert. Dagegen wird in der DIN EN 13829 das Messverfahren beschrieben, wobei auch die genaue Durchführung der Bestimmungsmethode geregelt wird. Letztlich soll hier auch noch die am ersten Februar 2002 in Kraft getretene **EnergieEinsparVerordnung (EnEV)** genannt werden. Diese beschreibt quantitative Gesamtanforderungen für das Gebäude, sowie Einzelanforderungen für Fenster und Außenluftdurchlässe (Zeller 2002). Übereinstimmend wird in den oben genannten Normen und Verordnungen ein Luftwechsel bei einer erzeugten Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Gebäudeinnen- und Außenseite von $n_{50} = < 3 \text{ h}^{-1}$ für Gebäude ohne mechanische Lüftungsanlage und $n_{50} = < 1,5 \text{ h}^{-1}$ für Gebäude mit mechanischer Lüftungsanlage gefordert. Weiterhin werden nach Zeller (2002) für die Ermittlung dieser Werte einige Anforderungen an das Messverfahren hinsichtlich Druckdifferenz, Messzeitpunkt, zu untersuchende Gebäudeteile und Präparation der Gebäudehülle gestellt, welche nachfolgend erläutert werden.

Druckverfahren

Es wird ein Differenzdruckversuch empfohlen, bei dem Druckdifferenzen zwischen 50 und 100 Pa zwischen Gebäudeinnen- und Außenseite erzeugt werden sollten. Mittels Strömungsgleichung {11} wird dann ein genormter Luftwechselwert bei 50 Pa Druckdifferenz bestimmt. Generell soll ein Über- und ein Unterdrucktest (siehe Abschnitt 3.1.2) durchgeführt werden. Aus den zwei Ergebnissen ist anschließend ein Mittelwert zu bestimmen (Ebök 1995). Das erhöht die Messgenauigkeit. In der Praxis hat sich aber gezeigt, dass aus Zeitgründen meist nur ein Unterdruckversuch erfolgt (Zeller 2002).

Messzeitpunkt

Nach DIN EN 13829 kann die Luftdichtigkeitsprüfung erst dann stattfinden, wenn die Gebäudehülle fertiggestellt ist. In Fachkreisen wird dies allerdings als kritisch bewertet, da hier Ausbesserungen nur noch mit größerem Aufwand durchführbar sind (Zeller 2002). Sinnvoller wäre eine Untersuchung nach Fertigstellung der luftdichten Gebäudehülle aber vor Einbau der inneren Beplankung an Leichtbauteilen (Ingenieurgemeinschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH 1998).

Zu untersuchende Gebäudeteile

Nach europäischer Norm sind Gebäudeteile zu untersuchen, die absichtlich beheizt, gekühlt oder mechanisch belüftet werden. Weiterhin können auch einzelne Gebäudeteile, wie zum Beispiel separate Wohneinheiten in einem Haus, für sich gemessen werden. Bei Untersuchungen des gesamten Hauses würde anhand des volumenbezogenen Leckagestromes nicht erkannt werden, ob einzelne Gebäudebereiche besonders undicht sind (z.B. Dachgeschosse). Aus diesem Grund ist es ratsam, generell auch Einzelmessungen bestimmter Bereiche durchzuführen (Ebök 1995).

Gebäudehüllenpräparation

Die Präparation der Gebäudehülle ist laut Zeller (2002) nach der DIN EN 13829 eindeutig geregelt. Luftdurchlässe einer Lüftungsanlage werden zugeklebt. Fenster werden geschlossen. Weiterhin werden generell zwei Arten von Dichtheitsmessungen angewendet:

Typ A → Gebäude befindet sich im Nutzungszustand, d.h. sonstige Öffnungen werden geschlossen aber nicht verklebt.

Typ B (Test der Gebäudehülle) → sonstige Öffnungen, die sich nicht schließen lassen, werden verklebt.

Wichtig ist auch, dass offene Flammen im Untersuchungsbereich gelöscht werden müssen. Bei Kaminen sollten bei Unterdruckversuchen (siehe unten) die Öffnungen akribisch abgedichtet werden. Sonst kann es zum Eintrag von Rußpartikeln in den Innenbereich kommen (Dulle 1989).

2.2.2 Darstellung der Bestimmungsmöglichkeit

Blower-Door-Verfahren:

Nach der Ingenieurgesellschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH (1998) ermöglicht die Blower-Door-Methode die Untersuchung der Luftdurchlässigkeit von Gebäudehüllen, wie oben beschrieben, nach dem Differenzdruckverfahren. Es wird ein Drucktest des gesamten Gebäudes oder von einzelnen Gebäudeteilen durchgeführt. Dabei wird im Innenraumbereich eine stationäre Druckdifferenz zur Umgebung aufgebaut. Mittels Gebläse, welches mit Hilfe eines verstellbaren Rahmens und eines Nylontuchs luftdicht in den Rahmen einer Außentür eingebaut wird, muss ein Volumenstrom erzeugt werden. Dieser ist so groß, dass sich eine Druckdifferenz von 50 Pa einstellt. Mit dem für die Aufrechterhaltung dieses Druckes benötigten Luftstromes, welcher genau der Luftmenge entspricht, die durch die „Leckstellen“ der Gebäudehülle nachströmt, ist der

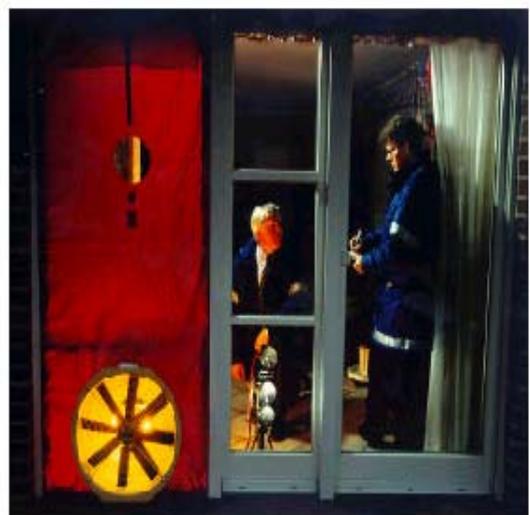
Luftwechselkoeffizient n_{50} bestimmbar. Dabei muss der ermittelte Volumenstrom durch das Raumvolumen geteilt werden. Die Größe n_{50} gibt an, wie oft das gesamte Raumvolumen bei einer Druckdifferenz von 50 Pa in einer Stunde ausgetauscht wird (Cordes 2001).

$$n_{50} = \frac{V_{50}^*}{V_R} \quad \{9\}$$

n_{50} = Luftwechselkoeffizient in h^{-1} bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$
 V_{50}^* = Volumenstrom in m^3/h bei $\Delta p = 50 \text{ Pa}$
 V_R = Raumvolumen in m^3



a)



b)

Abbildung 8: luftdicht eingebaute Gebläse und Manometer in der Praxis nach Cordes (2001) a) in eine Balkontür; b) in eine normale Außentür

Anzumerken ist, dass es bei dieser Methode einige Nachteile gibt. Zum Einen ist der Differenzdruck von 50 Pa nicht typisch für normal vorherrschende Bedingungen, bei denen selten höhere Druckunterschiede zwischen Innen- und Außenseite als 4 Pa auftreten. Daher ist der natürliche Luftaustausch um etwa eine Größenordnung niedriger. Weiterhin muss beim Vergleich der zwei Verfahren beachtet werden, dass bei der Tracergasmethode ein Luftaustausch auch durch die Eingangstür stattfindet. Diese Leckage tritt beim Blower-Door in den Hintergrund, da die Tür luftdicht verbaut wird. Es kann also nicht ohne Weiteres vom n_{50} -Wert auf den natürlichen Luftwechsel geschlossen werden. Dagegen ist diese Methode gut zur Untersuchung von Gebäuden

auf Leckagen geeignet. Dabei ist es grundsätzlich möglich, im Raum einen Über- oder Unterdruck zu erzeugen. Im ersten Fall wird durch das Gebläse ein definierter Volumenstrom in das Gebäude befördert, woraufhin Raumluft durch Undichtigkeiten nach Außen gedrückt wird. Einzelne Leckagen können durch den Einsatz von geeignetem Kunstnebel aufgedeckt werden, da dieser an den Stellen austritt und im Außenbereich erkennbar ist. Bei Unterdruckerzeugung wird dagegen die Raumluft nach außen transportiert. Dadurch wird ein bestimmter Luftstrom ins Gebäudeinnere nachgezogen. Besonders bei kälteren Außentemperaturen sind durch manuelles Abtasten mögliche Einströmquellen einfach ermittelbar. Weitere Hinweise auf bestehende Leckagen können durch den gleichzeitigen Einsatz von Thermografie-Kameras erhalten werden. Hier sind deutlich blaue Stellen durch entstandene kältere Zonen erkennbar, welche durch Undichtigkeiten hervorgerufen werden. Im Gegensatz dazu strömt in den Sommermonaten bei Unterdruck wärmere Luft ein, wodurch rötliche Bereiche für Zonen höherer Temperaturen entstehen (Ingenieurgemeinschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH 1998).

2.3 Bestehende mathematische Beziehungen

Da es Ziel dieser Diplomarbeit ist, anhand von Blower-Door-Messungen Rückschlüsse auf den natürlichen Luftwechsel ziehen zu können, müssen bestehende mathematische Berechnungsmöglichkeiten untersucht werden. Solche erlauben eine theoretische Berechnung des tatsächlichen Austausches der Luft unter realen Bedingungen aus praktisch bestimmten Blower-Door-Messwerten. Da es hier allerdings noch keine Beweisführung gibt, soll durch diese Untersuchungsreihe eine mögliche Korrelation mit ausreichender Signifikanz zwischen theoretisch berechneten und experimentell bestimmten, natürlichen Luftwechsel nachgewiesen oder gegebenenfalls verworfen werden.

Berechnung nach der DIN 4108, Teil 6

In der genannten Norm ist dargelegt, dass bei freistehenden Gebäudetypen (mehr als eine dem Wind ausgesetzte Fassade) in freier Lage vom n_{50} -Wert auf den natürlichen Luftwechsel geschlossen werden kann, indem eine Multiplikation des Blower-Door- n_{50} Wertes mit 0,1 erfolgt. Bei Reihenhäusern (nur eine dem Wind ausgesetzte Fassade) in geschützter Lage ist ein Faktor von 0,01 anzusetzen. Das heißt, die Messergebnisse nach einer Blower-Door-Untersuchung bei einem Druckunterschied von 50 Pa liegen durchschnittlich 10 – 100fach über den realen Luftaustauschwerten. Diese Überlegung beruht auf der vereinfachten Annahme, dass die natürlichen Druckdifferenzen in diesem Verhältnis unter den erzwungenen Drücken der Blower-Door-Messung liegen.

Berechnung nach der allgemeinen Strömungsgleichung

Nach Ingenieurgemeinschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH (1998) beruhen die Blower-Door-Messergebnisse auf einer Mehrpunkt-Druckmessung. Die dabei ermittelten Messwertpaare, bestehend aus dem Gebäudedruck und dem errechneten Volumenstrom, werden logarithmiert und dann durch eine Geradengleichung angenähert (Methode der kleinsten Quadrate). Daraus kann unter Verwendung der allgemeinen Strömungsgleichung der Koeffizient **C** und der Exponent **n** durch Logarithmieren gewonnen werden:

$$Y = a * x + b \quad \{10\} \quad \text{Geradengleichung}$$

$$V = C * dp^n \quad \{11\} \quad \text{Strömungsgleichung}$$

$$\log(V) = \log(dp) * n + \log(C) \quad \{12\} \quad \text{logarit. Strömungsgleichung}$$

V = Volumenstrom in m³/h

C = Strömungskoeffizient in m³/h Pa

(Schnittpunkt der y-Achse bei 1 Pascal Gebäudedruck)

dp = Differenzdruck in Pa Gebäudedruck

n = Strömungsexponent (Steigung der Geraden)

Durch Einsetzen der Größen C , \mathbf{dp} (natürliche Druckdifferenz) und \mathbf{n} , welche nach einer Blower-Door-Messung aus der Auswertungssoftware zu entnehmen sind, kann ein Volumenstrom ermittelt werden, der nach Teilung durch das Raumvolumen einen theoretischen natürlichen Luftwechsel ergeben würde. Dieser Wert wird nun auf seine Korrelation mit dem experimentell durch das Tracergasverfahren bestimmten Wert hin überprüft.

Berechnung nach Klopfer

Klopfer (2001) beschreibt, dass der Volumenstrom durch eine Fuge mittels Gleichung {2} errechnet werden kann. Der beim Blower-Door-Verfahren gemessene Gesamtvolumenstrom durch die zahlreichen Fugen \mathbf{i} kann also wie folgt gedeutet werden:

$$V^*_{50} = 50^{2/3} * \sum a_i * l_i = 13,54 * \sum a_i l_i \quad \{13\}$$

Sollen Rückschlüsse von Blower-Door-Messergebnissen auf reale Werte durch Tracergasversuche gezogen werden, so müssen die Druckverhältnisse bei beiden Methoden berücksichtigt werden. Herrschen beim Ersteren an allen Hüllflächen gleiche Druckwerte, so müssen beim natürlichen Luftwechsel die Windverhältnisse beachtet werden. Diese erzeugen bei direkter Windanströmung in der Mitte einer Fläche den höchsten Staudruck. Beim Blower-Door-Test wird eine durchschnittliche Gebäudedruckdifferenz gemessen. An diese muss eine Potenz $2/3$ angerechnet werden, da sich der Luftvolumenstrom mit der Potenz $2/3$ des Druckes verändert. Ferner stehen bei realem Windeinfluss nur etwa die Hälfte der Hüllflächen zum Eintritt von Außenluft zur Verfügung. Die andere Hälfte wird zum Luftaustritt benötigt. Daher wird der gemessene Druck mit $2/3$ potenziert und anschließend mit $0,5$ multipliziert. Danach muss der dabei erhaltene Wert mit $13,54$ dividiert werden, da die Potenz $2/3$ von 50 Pa den Wert $13,54$ besitzt (siehe {13}). So ist ein theoretischer natürlicher Luftwechsel erhältlich, welcher sich einstellen würde, wenn beim Blower-Door-Verfahren ein n_{50} -Wert von 1 h^{-1} bestimmt worden wäre. Bei höheren n_{50} -Werten ist auch der theoretisch bestimmte natürliche Luftwechsel proportional zu erhöhen.

Zusammenfassend kann dies in folgender Gleichung dargestellt werden:

theoretischer natürlicher n = {14}

$$\left[\frac{(\mathbf{dp} \text{ (durch Blower-Door bestimmt)})^{2/3} * \mathbf{0,5}}{13,54} \right] * \mathbf{n_{50}} \text{ (durch Blower-Door ermittelt)}$$

3 Praktische Umsetzung

3.1 Erläuterung der Verfahren

Die Konzentrationen typischer Innenraumschadstoffe sind im Gebäude größer als im Außenbereich. Durch Abdichtung der Bauten in Folge von Energiesparmaßnahmen, kommt es zur Anreicherung von toxischen Substanzen und dadurch zu möglichen Gesundheitsrisiken. Zur Einschätzung der Belastung ist die Kenntnis des Luftwechsels wichtig. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, eine einfache Methode zur Bestimmung dieser Größe zu finden. Das Augenmerk der Untersuchungen liegt dabei vorrangig auf Altbaubeständen. Später sollen mit dieser Methode einzelne Wohn- und Büroräume auf ihre Dichtheit und den damit verbundenen Luftaustausch überprüft werden. Da für die Planung und Qualitätskontrolle bei der Bauausführung von Altbautensanierungen Blower-Door-Tests von mehreren Normen (siehe Abschnitt 2.2.1) als notwendig erachtet werden, ist es sehr sinnvoll, diese Methode auch zur Bestimmung des natürlichen Luftwechsels einzusetzen. Weil aber dieses Verfahren unter erzwungenen Druckdifferenzen durchgeführt wird, müssen bestehende mathematische Beziehungen eingesetzt werden um auf den Luftaustausch unter realen Bedingungen zu schließen. Um diese theoretischen Berechnungen praktisch zu verifizieren, wird das Tracergasverfahren eingesetzt, um den tatsächlichen natürlichen Luftwechsel zu bestimmen. Beide Methoden werden im Folgenden näher erläutert. Die Durchführungen der einzelnen Messungen erfolgen generell nach den Verfahrensbeschreibungen, welche anschließend erläutert werden. Im Abschnitt 3.2 soll wegen der größeren Anzahl von Messungen nicht noch einmal explizit auf jede einzelne Untersuchung eingegangen werden. Die wichtigsten Informationen sind in der Interpretation der Ergebnisse im Kapitel 4 zu finden.

3.1.1 Tracergasverfahren

Zur Ermittlung des natürlichen Luftwechsels ist hier aus den oben erwähnten Gründen die Tracergasmethode anzuwenden. Da es sich meist um Räume mit Volumen kleiner **500 m³** und Raumhöhen niedriger **4 m** handelt, wird die Konzentrations-Abfall-Methode eingesetzt. Nach einschlägiger Prüfung der möglichen Versuchsanordnungen und Messausrüstungen, ist das nachfolgend erläuterte Verfahren als das für diese Aufgabe am geeignetsten ausgewählt worden. Die Theorie der Konzentrations-Abfall-Methode wurde schon unter 2.1.2 dargestellt. Die anschließend beschriebene Methode ist in Anlehnung des Verfahrens aus Laussmann (2001) durchgeführt worden.

Tracergasinjektion

Zur Injektion des Gases wurde eine Druckgasflasche mit angeschlossenem Druckminderungsventil eingesetzt, welche ein CO₂-Füllgewicht von sechs Kilogramm besitzt. Um abschätzen zu können, wie viel Gas aus der Flasche in den Raum in Abhängigkeit des Volumens gegeben werden muss, wurde zuerst berechnet, wie viel Volumen in der Flasche enthalten ist. Dies erfolgt über die thermische Zustandsgleichung eines idealen Gases:

$$P * V = n * R * T \quad \{15\}$$

P = Druck in Pa

V = Volumen in m³

n = Stoffmenge in mol

R = universelle Gaskonstante in
N*m/mol*K

T = Temperatur in K

$$n = m / M \quad \{16\}$$

M = Molare Masse in kg/mol
(für CO₂ = 0,044 kg/mol)

m = Füllgewicht in kg

$$= 6 \text{ kg} / (0,044 \text{ kg/mol}) = 136,4 \text{ mol}$$

$$V = (n * R * T) / P \quad \{17\}$$

$$V = (136,4 \text{ mol} * (8,314 \text{ N*m/mol*K}) * 293,15 \text{ K}) / 100000 \text{ N/m}^2$$

$$V = 3,32 \text{ m}^3$$

Um in einem Raum von beispielsweise **100 m³** Volumen eine CO₂-Konzentration von **2000 ppmv** zu erzeugen, sind **0,2 m³** ($100 \text{ m}^3 * 2000 * 10^{-6}$) Gasvolumen notwendig. Diese Anfangskonzentration wird so gewählt, um einen relativ hohen Startgehalt zu erreichen. Das sichert eine genaue Abklingkurve, da bei niedrigeren Konzentrationen mit Verfälschungen gerechnet werden muss. Das begründet sich mit der Tatsache, dass bei angrenzenden Räumen meist auch schon Kohlendioxidwerte von **600 – 1000 ppmv** auftreten. So könnte es bei unzureichender Menge im Untersuchungsraum passieren, dass eine Ausgleichsströmung nicht in dem Maße stattfindet, wie bei einer normalen Luftmasse. Die eingebrachte Menge an Kohlendioxid darf allerdings im Raum keine Konzentrationen über **2400 ppmv** erzeugen, da der verwendete Datenlogger keine höheren Werte aufzeichnet. Bei der Injektion ist weiterhin zu beachten, dass die natürliche Hintergrundkonzentration von **365 ppmv** noch zugerechnet werden muss. Damit reicht eine Gasflasche mit sechs Kilogramm Füllgewicht für insgesamt **1600 m³** Raumvolumen ($1600 \text{ m}^3 * 2000 * 10^{-6} = 3,2 \text{ m}^3$ Flaschenfüllung). Um nun aber in etwa bestimmen zu können, wie viel Gas ausgebracht werden muss, um die nötige CO₂-Konzentration im Raum zu erzeugen, wird die Gewichtsabnahme der Flasche berechnet, die dann der nötigen Gasmenge entspricht:

$$\mathbf{6 \text{ kg Flaschenfüllgewicht} = 3,32 \text{ m}^3 \text{ Gasmenge} \quad \{18\}}$$

$$\mathbf{\rightarrow 1 \text{ m}^3 \text{ Gasmenge} = 1,8 \text{ kg Flaschenfüllgewicht}}$$

Somit entspricht ein Flaschengewicht von **1,8 kg** einem Gasvolumen von **1 m³**. Soll nun diese Beziehung auf das jeweils bestehende Raumvolumen umgerechnet werden, so folgt:

$$V_{\text{Raum}} * 2000 * 10^{-6} * 1,8 = \mathbf{\text{Gewichtsreduzierung der Flasche in kg}} \quad \{19\}$$

Durch eine Digitalwaage kann nun während der Injektion abgeschätzt werden, wie viel Gas eingebracht werden muss. Generell wird natürlich das Leergewicht der Flaschen

und des Druckminderers herausgerechnet. Bei der Gaseinbringung ist darüber hinaus zu beachten, dass eine gleichmäßige Verteilung und Durchmischung des Tracergases mit der Raumluft erfolgt. Dieses wird durch Armbewegungen während der Injektion und durch das Aufstellen eines Ventilators erreicht. Um die Dauer der Messung zeitlich abschätzen zu können, ist es ratsam, eine theoretische Ermittlung des natürlichen Luftwechsels durchzuführen. Das ist möglich, indem die Fugenlängen der bestehenden Leckagen (Fenster und Türen), die zugehörigen Fugendurchlasskoeffizienten sowie die vorherrschenden Druckdifferenzen zwischen Gebäudeinnen- und Außenseite ermittelt werden. Diese Größen sind in Gleichung {3} einzusetzen. Mit den so bestimmten n kann nun die Formel {5} so umgestellt werden, dass beim Einsetzen der selbstgewählten CO₂-Konzentrationen der Zeitabstand einer möglichen Abklingkurve erhältlich ist. Damit wird ausgeschlossen, dass beispielsweise die Messdauer zu kurz angesetzt wird, was zu einer Fehlererhöhung (siehe Fehlerbetrachtung Abschnitt 3.1.3) führen würde.

Analyseverfahren

Das Grundprinzip dieser Methode beruht auf einer Langzeitaufzeichnung mittels Gasanalysator (siehe Abbildung 9). Dieses Gerät nimmt eine Dauermessung der Gaskonzentration vor. Damit eignet sich dieses Verfahren zum Beispiel auch dazu, zeitlich abhängiges Lüftungsverhalten der Nutzer experimentell zu überprüfen. Werden die Daten der Konzentrations-Abfall-Methode mit denen der Daueraufzeichnung der vorherrschenden Klimaparameter (Temperatur, Luftfeuchte usw.) verglichen, so können direkte Abhängigkeiten erkannt werden. Generell wird beim verwendeten Analysegerät die Strahlung im gesamten infraroten Bereich ausgesendet. Darum werden diese als nichtdispersive IR-Photometer (NDIR) bezeichnet. Um bei den Messungen eine stoffspezifische Selektivität zu erreichen, wird in den NDIR ein Strahlungsempfänger eingebaut, welcher mit dem zu messenden Gas gefüllt ist.

Bei der Strahlungsquelle in Abbildung 9 handelt es sich um elektrisch beheizte Glühdrähte. Der Lichtquelle schließt sich meist ein rotierendes Blendenrad an, welches zur Erhöhung der Empfindlichkeit durch das Modellieren der Strahlengänge (Wechsellichtverfahren) benutzt wird.

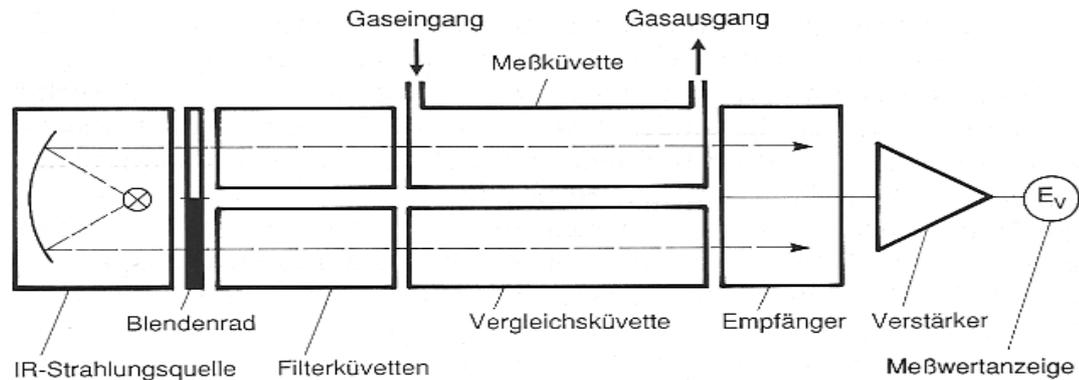


Abbildung 9: Prinzip eines IR-Photometers (Baumbach 1992: 173)

Der eigentlichen Mess- und Vergleichsküvette ist jeweils eine Filterküvette vorgeschaltet. Diese Filter reduzieren den Einfluss von Störgasen, indem sie mit den Störkomponenten gefüllt werden und somit der Strahlungsanteil dieser Verbindungen vorweg absorbiert wird. Hinter der Mess- und Vergleichsküvette schließt sich der Empfänger an, welcher aus zwei Kammern (mit dem zu messenden Gas gefüllt) besteht. Tritt nun der gesuchte Stoff in der Messküvette auf, so wird ein Teil der IR-Strahlung vor- absorbiert und in die Kammer des Empfängers gelangt weniger Strahlung. Somit kommt es in beiden Kammern zu einer unterschiedlichen Erwärmung der Gase und folglich entsteht eine Druckdifferenz. Aufgrund des rotierenden Blendrades ist die unterschiedliche Druckerhöhung periodisch zu beobachten. Die Amplitude ist ein Maß für die Konzentration des gesuchten Gases, da sie direkt von der Vor-Absorption der IR-Strahlung in der Messküvette abhängt (Baumbach 1992).

Auswertung

Durch das eingesetzte Gasanalysegerät erfolgt eine Aufnahme von Einzelkonzentrationen im vorher programmierten Zeitintervall. Am Ende kann dies in einem Konzentrations-Zeit-Diagramm als Abklingkurve ausgewertet werden. Mit Microsoft Excel erfolgt dann durch die Funktionsgleichung:

$$y = C_A * e^{-nx} \quad \{20\} \quad C_A = \text{Anfangskonzentration von CO}_2$$
$$\mathbf{n = \text{Luftwechsel in h}^{-1}}$$

welche das Programm bei Bedarf mit angibt, die mathematische Bestimmung der Luftwechselzahl n , die aus Gleichung {20} zu entnehmen ist. Falls im Programm die x-Achse in min angegeben ist, muss n noch durch 60 geteilt werden, um auf h^{-1} umzurechnen. Wichtig zu erwähnen ist weiterhin, dass es sich bei dieser Funktionsgleichung um die Ausgangsformel der Gleichung {5} handelt, welche dort nur nach n umgestellt wurde.

Zusammenfassend haben folgende Fakten zur Auswahl dieses Verfahrens geführt:

- es mussten keine Geräte angeschafft werden, da der CO_2 -Gasanalysator bereits vorhanden war,
- CO_2 ist preiswert und als idealer Tracer einzustufen,
- die Durchführung der Messung ist einfach und kann gegebenenfalls auch von Hilfskräften getätigt werden,
- es werden keine Grenzwerte überschritten,
- die nötige Auswertung ist mit normalen Softwareprogrammen durchführbar.

Versuchsanordnung

Um die Bestimmung aller erforderlichen Größen durchführen zu können, ist die in Abbildung 10 dargestellte Versuchsanordnung gewählt worden. Hier ist erkennbar, an welcher Stelle die Gaseinbringung und die jeweilige Messung erfolgte. Die Ermittlung der Druck- und Temperaturdifferenz zwischen der Innen- und Außenseite ist bei einzelnen Messobjekten aus Kontrollgründen vorgenommen worden. Damit konnten die durch das Blower-Door-Messverfahren erhaltenen Daten überprüft werden.

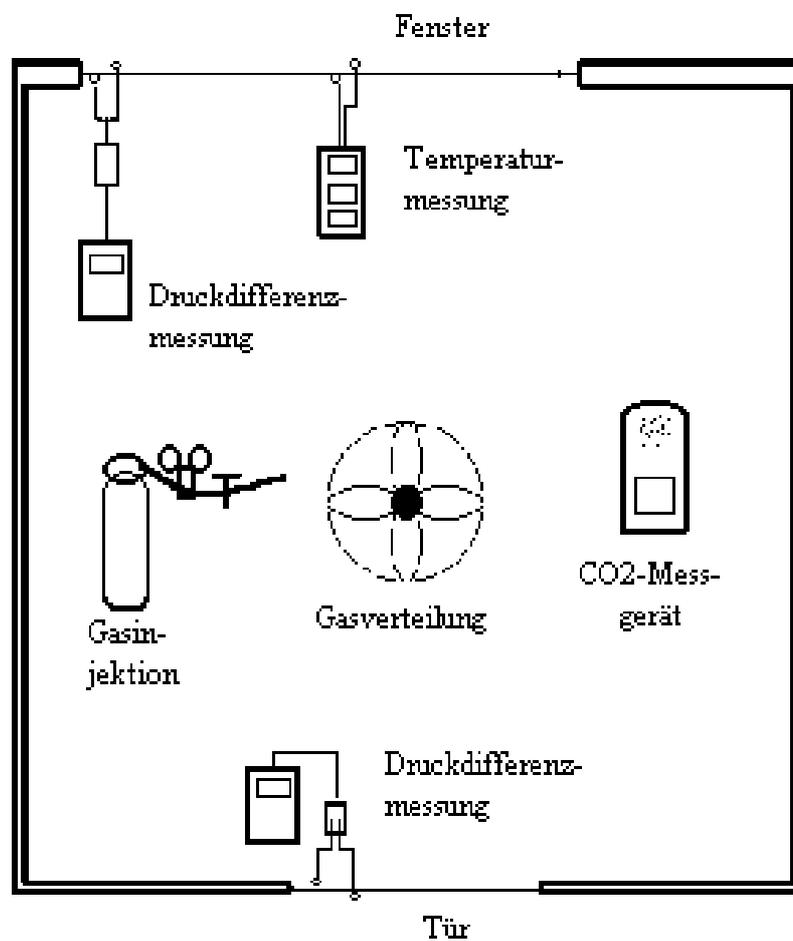


Abbildung 10: Allgemeine Versuchsanordnung der Tracergasmessungen

Beschreibung der Messgeräte

Differenzdruckmessung...Die Messung des Druckunterschiedes zwischen Innen- und Außenseite des Raumes zur Kontrolle der durch die Blower-Door-Messung bestimmten Druckdifferenz erfolgte mittels:

- Digital-Druck-Handmessgerät
GMSD 3110 der Firma GREISINGER elektronik GmbH
Hans-Sachs-Str. 26, D-93128 Regenstauf

Gemessen wurde mit dem Digital-Druck-Sensor GMSD 2,5 MR, der einen Messbereich von $-199,9 - +250,0$ Pa besitzt. Die kleinste ablesbare Teilung beträgt $0,1$ Pa.

Temperaturdifferenzmessung...Um die Innen- und Außentemperatur zu bestimmen, wurde das Gerät Telaire 7001 der Firma Engelhard eingesetzt. Dieses misst im Bereich von $0 - +50^{\circ}\text{C}$ mit einer Auflösung von $0,1^{\circ}\text{C}$.

Gasanalyse...Zur Bestimmung der einzelnen CO_2 -Konzentrationen im Raum wurde das Gerät Telaire 7001 der Firma Engelhard eingesetzt. Dieses misst im Bereich von 0 bis 9999 ppmv CO_2 mit einer Auflösung von 1 ppmv.

Aufzeichnung...Um die jeweiligen Messwerte auswerten zu können, wurden Aufzeichnungen mittels Datenlogger Hobo H8-Serie Logger, RH/Temp/Licht/Extern von Onset-Cooperation durchgeführt. Dieser kann 7944 Messwerte speichern und wurde auf ein Abtastintervall von 0,5 Sekunden eingestellt.

Abschließend sei daraufhingewiesen, dass im Anhang 6 im Ordner 02.Kornburg ein illustratives Photo einiger Geräte der Versuchsanordnung zu finden ist.

3.1.2 Blower-Door-Verfahren

Bevor eine Messung durchgeführt werden kann, sind noch einige Vorbereitungen zu treffen. Zum Beispiel ist unbedingt eine Aufnahme der Klimadaten vorzunehmen. Nach der Ingenieurgemeinschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH (1998) ist die Messung dann am genauesten, wenn:

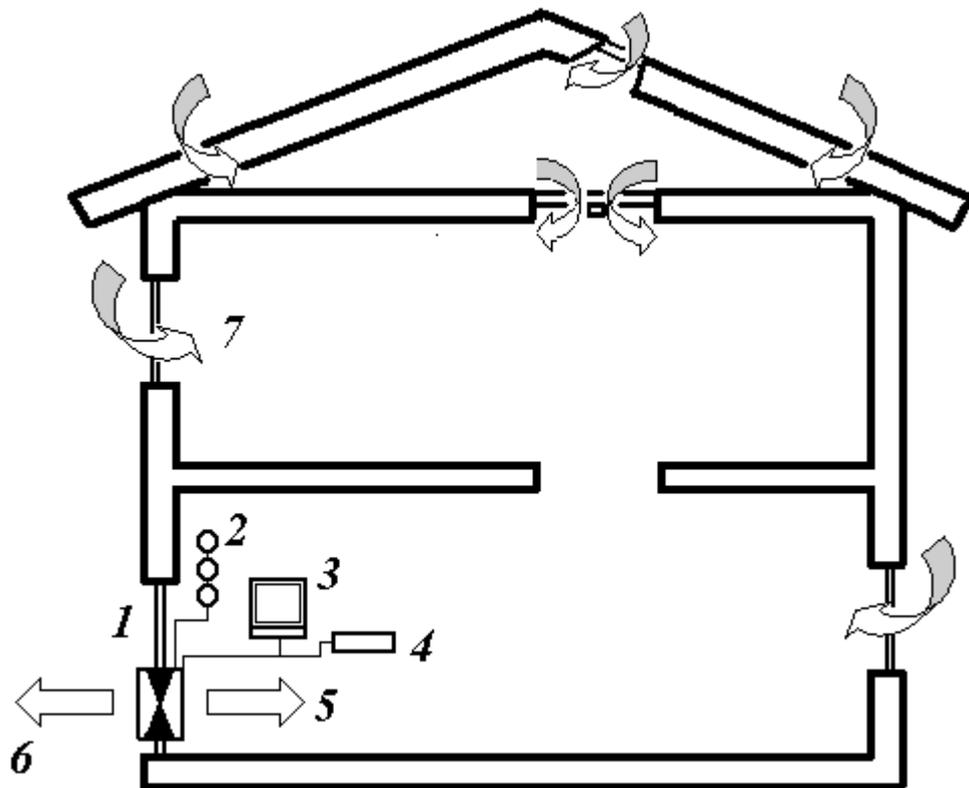
- das Produkt aus der **Temperaturdifferenz** zwischen Innen- und Außenseite des Gebäudes (in K) und der Gebäudehöhe (in m) $<$ als $500 \text{ K} \cdot \text{m}$ ist,
- die durch **thermischen Auftrieb** im Gebäude verursachte natürliche Druckdifferenz bei geschlossenen Gebläse $<$ $\pm 5 \text{ Pa}$ beträgt,
- die **Windgeschwindigkeit** $<$ 6 m/s ist.

Die Witterungsbedingungen waren generell an allen Untersuchungstagen akzeptabel. Nun folgt mit einer Gebäudebegehung der zweite wichtige Vorbereitungsschritt. Hierbei ist zu klären, welche Gebäudeteile der Luftdichtigkeitsprüfung unterzogen werden sollen. Hiervon sind die genauen Volumina zu bestimmen, da diese in das Auswertungsprogramm einzugeben sind. Auf deren Basis wird später in Abhängigkeit des geförderten Volumenstromes der Luftwechsel errechnet. Weiterhin müssen (wie unter 2.2.1 beschrieben) alle Fenster geschlossen und alle nicht gewollten Leckagen luftdicht verschlossen werden (Dulle 1989). Es sollte auch generell darüber Protokoll geführt werden, welche baulichen Gegebenheiten (Wandaufbauten, Fenster, Türen, Dach, Außenfassade) vorhanden sind. Weiterhin sind vorhandene offene Flammen zu löschen und wegen der Verrußungsgefahr luftdurchlässige Kamintüren abzudichten. Letztendlich sollten im gesamten Messbereich die Innentüren geöffnet werden, sodass ein konstanter Druck aufrecht gehalten werden kann. Dann ist mit dem Aufbau der Versuchsanordnung zu beginnen.

Im Zuge dieser Arbeit wurde zur Durchführung der erforderlichen erzwungenen Luftwechsellmessungen eine „Minneapolis-Blower-Door“ eingesetzt. In der Abbildung 11 ist eine Skizze der Versuchsanordnung dargestellt, bei der ein Unterdruck im Gebäude erzeugt wurde. Es kommt zum Nachströmen von Außenluft durch diverse Leckagen.

Versuchsanordnung

Es wird an dieser Stelle daraufhingewiesen, dass die folgende Abbildung 11 nur eine allgemeine Übersicht der eingesetzten Messapparatur darstellt. Hauptsächlich wurden während dieser Arbeit nur einzelne Wohnungen oder Wohnbereiche untersucht und keine gesamten Gebäude.



- 1 In Eingangstür luftdicht eingebautes **Nylontuch** mit **Gebläse**, welches durch den Transport eines Volumenstromes eine Druckdifferenz erzeugt;
Das drehzahlgeregelte Gebläse mit einer maximalen Leistung von 8000 m³/h bei 50 Pa Druck kann auf der Einströmseite mit **Reduzierblenden** versehen werden;
So ist der Messbereich nach unten erweiterbar, indem minimale Volumenströme von nur 20 m³/h gefördert werden können; damit wird die Genauigkeit erhöht
- 2 **Manometer**, was das manuelle Ablesen des erzeugten Gebäudedruckes und des geförderten Volumenstromes ermöglicht
- 3 **Computer**, welcher durch geeignete Software die Auswertung der Daten ermöglicht

- 4 **Automated Performance Testing System**, zur automatischen Steuerung des Verfahrens; Es können mit diesem Sonderzubehör die **Drehzahlregelung des Gebläses** und mehrere **elektronische Differenzdruckaufnehmer** mittels Computer **gesteuert** bzw. erfasst werden; So wird die Genauigkeit erhöht, die Messung automatisiert und eine umfangreiche Gebäudediagnose durchgeführt
- 5 **Volumenstrom** nach Innen, zur Erzeugung eines Überdruckes im Gebäude
- 6 **Volumenstrom** nach Außen, zur Erzeugung eines Unterdruckes im Gebäude
- 7 **Lufteintritt** von Außen nach Innen durch vorhandene Leckagen nach Erzeugung eines Unterdruckes im Gebäude

Abbildung 11: Gebäude, bei dem ein erzwungener Differenzunterdruck erzeugt wird

Es sei hier daraufhingewiesen, dass zur Veranschaulichung im Anhang 6 im Ordner 02.Kornburg ein illustratives Photo einer mit eingebauten Blower-Door-Equipment versehenen Tür abgebildet ist. Weiter kamen diverse Druckschläuche und eine Excel-Tabellenkalkulation (Auswertungsprogramm) zum Einsatz. Letztere protokolliert die Messung und liefert folgende Daten:

- Volumenstrom mit Fehlerberechnung,
- Luftwechselrate,
- weitere wichtige Daten für eine sorgfältige Analyse.

Wenn alle Vorarbeiten erledigt sind und das oben genannte Equipment wie erläutert aufgebaut ist, erfolgt die Messung. Zu Beginn und am Ende jeder Messung wird die Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnen- und Außenseite gemessen. Die hierzu benötigten Schläuche, welche zwischen Messraum und Außenseite verlegt werden, dürfen nicht in Nähe des Gebläses oder in sonstigen Windverwirbelungen liegen. Sonst würden unrealer Drücke, die nicht für das ganze Gebäude anzunehmen sind, das Messergebnis verfälschen. Der Messvorgang wird ansonsten vollautomatisch von einem APT (**Automated Performance Testing System**) gesteuert. Dieses kann über einen Laptop bedient werden. In das Programm müssen nur die Klimadaten, die Volumina der Untersuchungsräume, die einzelnen Druckstufen (meist zwischen 10 und 50 Pa) und das angewendete Druckverfahren (Über- oder Unterdruck) eingegeben werden. Nun wird nacheinander so viel Luftvolumen transportiert, dass die jeweiligen Differenzdrücke erreicht werden. Dabei werden die geförderten Luftmengen gemessen und eine

Anstiegsgerade entwickelt (Abbildung 12). Das Programm gibt auf deren Basis und nach Teilung durch das Raumvolumen den Luftwechselwert bei 50 Pa Differenzdruck an (siehe auch Gleichung {9}).

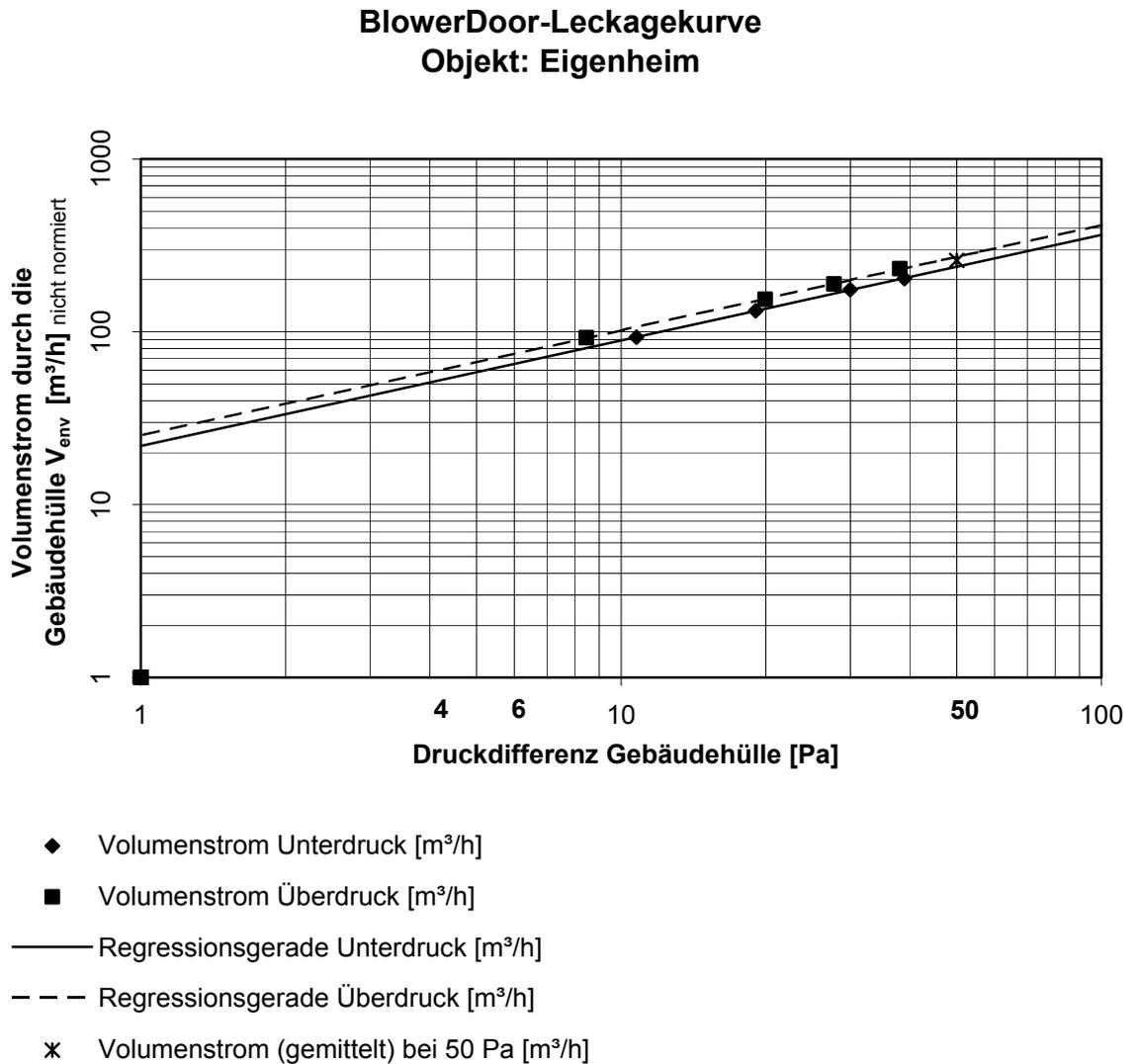


Abbildung 12: Exemplarisches Volumenstrom-Druckdifferenz-Diagramm einer Über- und Unterdruckmessung

Wird, wie oben dargestellt, jeweils ein Über- und Unterdruckversuch durchgeführt, so gibt das Auswertungsprogramm einen Mittelwert aus beiden Teilergebnissen an.

3.1.3 Genauigkeit und Reproduzierbarkeit

Tracergasmethode

Fehlerbetrachtung...Die Gültigkeit der theoretischen Annahme von der vollkommenen Durchmischung der Tracersubstanz in einem zeitlich konstanten effektiven Volumen ist ebenso für die Genauigkeit der bestimmten Luftwechselzahl n maßgeblich, wie die möglichen Messfehler bei der Bestimmung der Parameter $x_1 = C(t)$, $x_2 = C_0$.

Dabei wird die Zeit t als exakt messbar angenommen. Damit ist die Fehlerabweichung der ermittelten Zeit $\delta t = 0$. Durch die bekannten Fehlerangaben δx_1 und δx_2 folgt aus dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz:

$$(\delta n)^2 = \sum [(\partial n / \partial x_i) * \delta x_i]^2 \quad \{21\}$$

δ bezeichnet die Abweichung einer Variablen von ihrem Mittelwert. Aus dem vollständigen Differential von $n(C_0, C(t))$ aus Gleichung {5} kann unmittelbar $(\delta n)^2$ errechnet werden:

$$(\delta n)^2 = 1/t^2 * [(\delta C/C)^2 + (\delta C_0/C_0)^2] \quad \{22\}$$

δC , δC_0 und C_0 werden als konstant angenommen. Der Fehler δn nimmt dann rasch mit zunehmender Zeit ab. Wird allerdings $C(t)$ ebenfalls sehr klein, steigt der Fehler δn wieder an, da δC eine geräte- oder anzeigebedingte Konstante ist. Die optimale Messzeit liegt in der Nähe von $1/n$. Da diese Methode nur bei kleinen oder mittleren Luftwechselzahlen eingesetzt wird, ist die verfügbare Messzeit immer groß genug, um den Zeitbereich mit immer wachsenden Fehler zu vermeiden (Heidt 1987; Otto 1995: 24 ff). Nachfolgend wird getestet, welche prozentualen Fehler für die einzelnen Messparameter anzusetzen sind.

Überprüfung der Genauigkeit der Tracergasmessung...Zur Überprüfung der Genauigkeit des Analyseverfahrens muss der verwendete IR-Gasanalysator kalibriert werden, um eventuelle Fehlergrößen herauszufinden. Dafür ist mit einem Exsikator eine

geeignete Prüfkammer verwendet worden. Um kein Vakuum darin erzeugen zu müssen, wird die Hintergrundkonzentration von Kohlendioxyd als Blindwert gesehen. Das Messinstrument wird komplett in die Prüfkammer gestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Messwertanzeige sichtbar ist. In einem Seitenanschluss der Kammer befindet sich ein Septum aus Silicon. Durch dieses wird mittels gasdichter Spritze eine definierte Menge an Tracergas, welches vorher aus einem 100%ig gefüllten Gasbeutel entnommen wurde, eingespritzt und durch einen batteriebetriebenen Ventilator gleichmäßig verteilt. So wurden in 90 ppmv Schritten für die Messung typische Konzentrationen zwischen 700 und 1700 ppmv erzeugt. Um durch die Injektion auch exakte Konzentrationen erzeugen zu können, ist vor dem Kalibrierversuch das genaue Volumen der Prüfkammer mittels Ausliterung bestimmt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 und im Diagramm in der Abbildung 7.1 im Anhang 1 dargestellt.

Tabelle 3 : Kalibrierung des CO₂-Analysegerätes

Exakt erzeugte Konzentration in ppmv	angezeigte Konzentration in ppmv	Abweichung vom Istwert in ppmv	Fehler in %
Blindwert 710	710	0	0
800	814	14	1,75
890	894	4	0,45
980	983	3	0,31
1070	1070	0	0
1160	1152	-8	0,67
1250	1241	-9	0,72
1340	1320	-20	1,5
1430	1410	-20	1,4
1510	1496	-14	0,93
Mittelwert		9,2	0,77

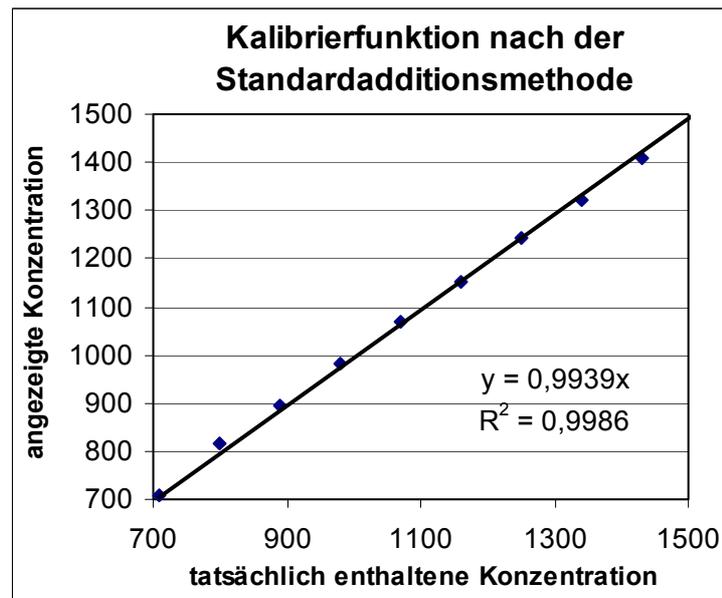


Abbildung 13: Kalibriergerade bei jeweiliger Zugabe von 90 ppmv

Durch diese Qualitätsüberprüfung der CO₂-Gasmessung wurde festgestellt, dass mittels verwendeten IR-Gasanalytator bei jeder gemessenen Einzelkonzentration mit einem mittleren systematischen Fehler von +/- **0,77%** gerechnet werden muss. Die zugehörige Anstiegsgeraden der Kalibrierfunktion wird in Abbildung 13 aufgezeigt.

Weiterhin ist aus der Güte der Anstiegsgeraden ($r = \mathbf{0,99}$) des Diagramms in Abbildung 7.2 im Anhang 1 ersichtlich, dass eine exakte Zugabe von 90 ppmv eingehalten wurde. Wäre dies nicht so, dann würden diverse unregelmäßige Stufen in der Geraden zu finden sein. Generell kann damit gesagt werden, dass die verwendeten Injektionsmaterialien und die benutzte Prüfkammer für eine genaue Kalibrierung geeignet sind.

Blower-Door-Methode

Fehlerbetrachtung...Während dieser Messreihe ist ein Automated Performance Testing System zur automatischen Steuerung des Verfahrens eingesetzt worden. Dabei wird die Fehlerrechnung für die Methode von der dafür konzipierten Auswertungssoftware selbst ausgeführt und im Messprotokoll jeweils angegeben. Folgende Einzelfehlerquellen werden bei dieser Berechnung berücksichtigt:

- Fehler der Volumenstrommesseinrichtung,
- Fehler aus der Gebäudedruckmessung,
- Fehler aufgrund des Windeinflusses,
- Statistischer Fehler des Leckagestromes,
- Fehler aus der Dichtekorrektur (Luftdruck),
- Fehler der Bezugsgrößen,
- Fehler beim Auslassen der Über- oder Unterdruckmessung.

Eine daraus entstehende Messunsicherheit in % wird zu jedem bei 50 Pa Differenzdruck ermittelten Luftwechselwert mit angegeben. Beim Nichtvorhandensein eines APT`s mit zugehörigem Auswertungsprogramm können bei Kenntnis der wichtigsten Klimadaten Korrekturfaktoren aus diversen Tabellen entnommen werden. Durch deren Anwendung sind zum Beispiel Temperatur- oder Windverhältnisse, welche die Messung der Luftwechselzahl stark beeinflussen können, mit einbeziehbar.

Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Druckdifferenzmessung...Wie aus den oben dargestellten Berechnungsmöglichkeiten des theoretischen natürlichen Luftwechsels aus den Werten der Blower-Door-Messung ersichtlich wird, besitzen die ermittelten Druckdifferenzen zwischen der Gebäudehülle und dem Außenbereich die höchste Wichtigung. Aus diesem Grund soll hier überprüft werden, ob es sich bei den bestimmten Drücken, die jeweils vor und nach einer Messung aufgenommen werden, nur um zufällige Momentwerte handelt oder ob sie reproduzierbare Mittelwerte der gesamten Messperiode darstellen. Dazu ist eine Daueraufzeichnung der natürlichen Druckdifferenzen über eine Zeitdifferenz vorgenommen worden, welche auch einer typischen Messperiode entspricht. Hieraus ist erkennbar, in welchem zeitlichen Rahmen sich die Druckdifferenzen ändern. Dabei sind die Start- und Endwerte fett markiert. Diese werden im Auswertungsprogramm des Blower-Door-Versuches angegeben. Bei der Berechnung wird der Mittelwert aus diesen beiden einbezogen. Während der Messzeit von **6 min (5000 Messpunkte)** schwankten die Druckdifferenzen im Bereich der Werte, die in Tabelle 4 zwischen dem Start- und Endwert angegeben sind.

Tabelle 4: Druckdifferenzabweichung während der Messperiode einer Blower-Door-Messung

Gemessene Druckdifferenzen in Pa während einer Messperiode	Abweichung vom Mittelwert 0,25 in Pa	Fehler in %
0,1 (Start)	-0,15	60
0,2	-0,05	20
0,1	-0,15	60
0,3	0,05	20
0,1	-0,15	60
0,1	-0,15	60
0,3	0,05	20
0,4 (Ende)	0,1	60
Mittelwert aus Start- und Endwert	0,25 (welcher in die Rechnung eingeht)	
Standardabweichg.	0,1313	45

Die Messwerte liegen zwischen **0,1** und **0,4** Pa. Wie aus der Tabelle 4 ersichtlich wird, ist der in den oben beschriebenen Rechnungen {11} und {14} eingehende Mittelwert aus Start- und Enddruckdifferenz mit einem zufälligen Fehler von **45%** behaftet. Das ist nicht verwunderlich, da es während der gesamten Messperiode der Blower-Door-Messung immer zu Windschwankungen an der Außenseite kommen kann, die dann zu teils erheblichen Druckunterschieden führen. Diese prozentualen Fehlerwerte wurden durch drei Wiederholungsversuche bestätigt. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei diesen niedrigen Druckdifferenzen eine Schwankung um beispielsweise **0,1** Pa eine große Wirkung auf die Fehlerrechnung hat. Hier würden aber auch sehr niedrige natürliche Luftwechsel errechnet werden, bei denen ein Fehler von **45%** keinen extremen Einfluss auf die Größenordnung hat. Weiterhin sollen die Messungen unter praxisbezogenen Bedingungen durchgeführt werden. Es kann so einem Messteam, welches später mit Versuchen unter gleichen Verhältnissen auf bestehende natürliche Luftwechsel Rückschlüsse ziehen muss, ein Hinweis über die Genauigkeit gegeben werden. Dazu gehören auch derartige typische Druckschwankungen durch verschiedene Windbedingungen während einer Messperiode. Es ist daraufhin zu weisen, dass diese Fehleranteile in dieser Höhe nicht mit in die Berechnungen nach der Strömungsformel {11} und nach Klopfer {14} einbezogen werden. Der Grund liegt darin, dass die Aufgabe besteht, trotz dieser Ungenauigkeiten zu überprüfen, welche Korrelation

erreicht wird. Nur so ist eine Anwendung in der Praxis sinnvoll, da mit einer genaueren Druckdifferenzmessung mit einem Handgerät zwar eine größere Genauigkeit erzielt werden würde. Der zeitliche Mehraufwand macht jedoch die Untersuchung unrealisierbar (luftdichter Druckschlauchdurchgang durch die Gebäudehülle muss geschaffen werden). In diesem Zusammenhang ist weiter darauf hinzuweisen, dass entgegen der Literaturangaben (Klopfer 2001; Ingenieurgemeinschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH 1998) zur Berechnung des natürlichen Luftwechsels nicht die Druckdifferenz eingesetzt werden dürfte, welche während dem Blower-Door-Versuch ermittelt wurde. Es wäre mit Sicherheit eine bessere Korrelation zwischen den zu vergleichenden Größen zu erwarten, wenn in die Gleichungen {11} und {14} der tatsächliche Druckunterschied zwischen der Gebäudehülle während der Tracergasmessung eingesetzt werden würde. Somit wäre ein realer Wert über die lange Messzeit aufnehmbar und die zufälligen Fehler, welche sich auf das Ergebnis des berechneten natürlichen Luftaustausches enorm auswirken können, würden stark reduziert. Um diese Ungenauigkeiten zu verringern, sollten wenigstens vor und nach jeder Blower-Door-Messung die natürlichen Druckdifferenzen über eine gewisse Zeit (fünf Minuten) mit dem APT aufgenommen werden. Mit den daraus berechneten Mittelwerten sind reproduzierbarere Werte für die Berechnung vorhanden.

3.2 Durchführung

Um der Aufgabenstellung zu entsprechen und eine möglichst aussagekräftige, reproduzierbare Messreihe durchführen zu können, sind die Objekte so ausgesucht worden, dass ein möglichst breites Spektrum an geographischen, klimatischen und baulichen Gegebenheiten beleuchtet werden kann. Nur so sind statistische Signifikanzen zu ermitteln, welche anschließend generelle Aussagen der Ergebnisse zulassen. Dazu wurde das Untersuchungsgebiet auf 3 Bundesländer und sehr verschiedene Standortbedingungen ausgedehnt (siehe Abbildung 14). Die genauen Adressen der Untersuchungsräumlichkeiten sind aus Datenschutzgründen nicht detailliert genannt. Es wurden jeweils nur Synonyme und eine fortlaufende Nummerierung für jedes Messobjekt verwendet.

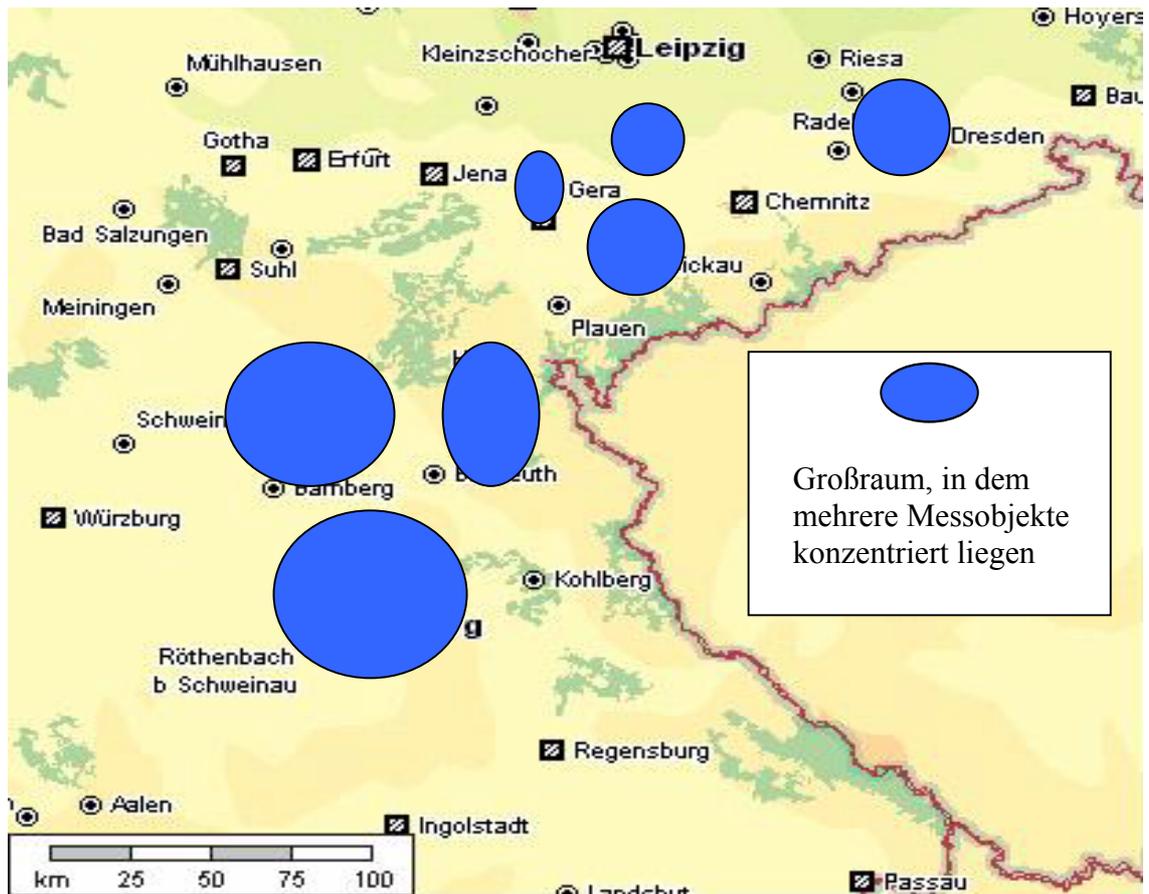


Abbildung 14: Standorte der Messobjekte

Um der VDI 4300 (2001), Blatt 7, zu entsprechen, wurden zur Durchführung der Konzentration-Abfall-Methode des Tracergasverfahrens nur Räumlichkeiten unter **500 m³** und kleiner **4 m** Raumhöhe untersucht. Darum sind auch meist nur Wohneinheiten oder Einzelräume vermessen worden. Diese Vorgehensweise war deshalb notwendig, da je größer die Untersuchungsräume sind, um so mehr Zeit für die intensive Verteilung des Tracergases aufgebracht werden muss. Das wäre wegen der relativ großen Anzahl an Messungen und dem damit verbundenen zeitlichen Aufwand nicht realisierbar gewesen. Weiterhin wäre dies auch nicht typisch für einen späteren praktischen Einsatz zum Beispiel parallel zu Schadstoffuntersuchungen. Die so benötigte Mehrarbeitszeit würde den Analysenpreis unverhältnismäßig ansteigen lassen. Um ein gesichertes Ergebnis mit dem Blower-Door-Verfahren zu erhalten, ist vor Beginn einer Messung das genaue Volumen des Untersuchungsobjektes berechnet worden. Weiterhin wurden die präzisen Klimaparameter aufgenommen. Die genaue Versuchsanordnung ist unter Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

4 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

4.1 Ergebnisüberblick

Durch die enorme Datenflut wird im Folgenden in der Tabelle 5 nur ein kleiner Überblick über die Messgrößen und die erzielten Ergebnisse der Untersuchungsreihe gegeben. Im Anhang 2 in Tabelle 7.1 und 7.2 sind alle entscheidenden Objektdaten zu finden. Dazu zählen neben allen gemessenen Werten auch wesentliche geographische, klimatische und bauliche Gegebenheiten der Messobjekte.

Tabelle 5: Überblick über die Messgrößen und die erzielten Ergebnisse

Messobjekt	Differenz- druck in Pa	Raum- volumen in m ³	n₅₀-Wert in h ⁻¹	natür- licher n in h ⁻¹	Gebäudetyp
3.Math.Str.1.OG linke WHG	1	157	7,9	0,36	Reihenhaus - unsaniert
5.Math.Str. 2.OG	1,8	280	4,45	0,17	Reihenhaus - saniert
19.Rödeltal- Waldsassen	0,4	50	10,45	0,23	freistehend - unsaniert
59.Oberasbach- Leiner	0,45	67	0,77	0,08	freistehend - saniert
6.Nürnberg-Jean- Paul-Platz (Passivhaus)	3,15	2700	0,35	0,14	Reihenhaus - saniert

Die zugehörigen Diagramme der einzelnen Tracergasmessungen zur Bestimmung des natürlichen Luftwechsels sind im Anhang 6 dargestellt. Es sind hierbei auch die entsprechenden Bestimmtheitsmaße mit angegeben, welche die jeweilige Güte der Abklingkurve aufzeigt. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Zeit für jeden Tracergasversuch nach der Konzentration-Abfallmethode natürlich durch die relativ

große Anzahl der Messungen beschränkt war. Dadurch sinken auch die Bestimmtheitsmaße der Tracergas-Abklingkurven (siehe Anhang 6) vereinzelt unter 0,5. Der Grund dessen wird in der Fehlergleichung {22} deutlich. Es ist erkennbar, dass der Fehler mit sinkender Messzeit zunimmt. Dagegen ändert das nichts am Endergebnis, da dieses durch eine Exponentialfunktion aus einer mittleren Trendlinie heraus berechnet wird. So bleibt der erhaltene Luftwechsel gleich. Er ist nur stärker fehlerbehaftet.

Im Anhang 6 sind auch alle Blower-Door-Auswertungsprogramme zu jedem Blower-Door-Versuch einsehbar. Dabei sind die aufgetretenen Fehler während jeder einzelnen Messung mit angegeben. Weiterhin sind, wie schon erwähnt, sämtliche Objektdaten im Anhang 2 in der Tabelle 7.1 zu finden.

Es folgen anschließend statistische Berechnungen, um Signifikanzen zwischen den einzelnen Messwerten beziehungsweise zwischen den verschiedenen Messreihen zu untersuchen.

4.2 Interpretation der erhaltenen Werte

4.2.1 Bestimmung der Güte der theoretischen Berechnungsmöglichkeiten

Es sollte im Folgenden überprüft werden, ob die Berechnungsmöglichkeiten nach der Strömungsformel {11}, nach Klopfer {14} und dem Verhältnis Blower-Door-Wert/natürlicher Luftwechsel nach DIN 4108, Teil 6, reelle Möglichkeiten darstellen, um den natürlichen Luftwechsel unter praktischen Bedingungen aus den Blower-Door-Werten zu ermitteln. Aus den Messdaten der Tabelle 7.2 im Anhang 2 sind die Diagramme erarbeitet, welche in Abbildung 15 und 16 dargestellt sind.

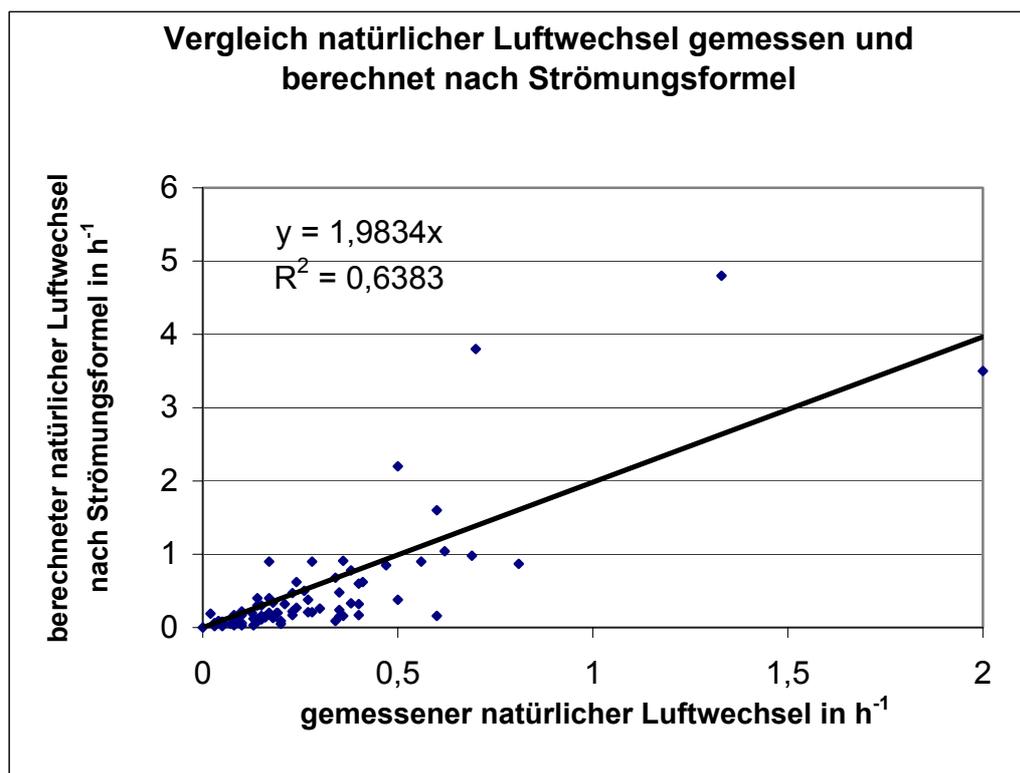


Abbildung 15: Vergleich von $n = 80$ Werten zwischen gemessenen und berechneten natürlichen Luftwechselzahlen nach der Strömungsformel {11}

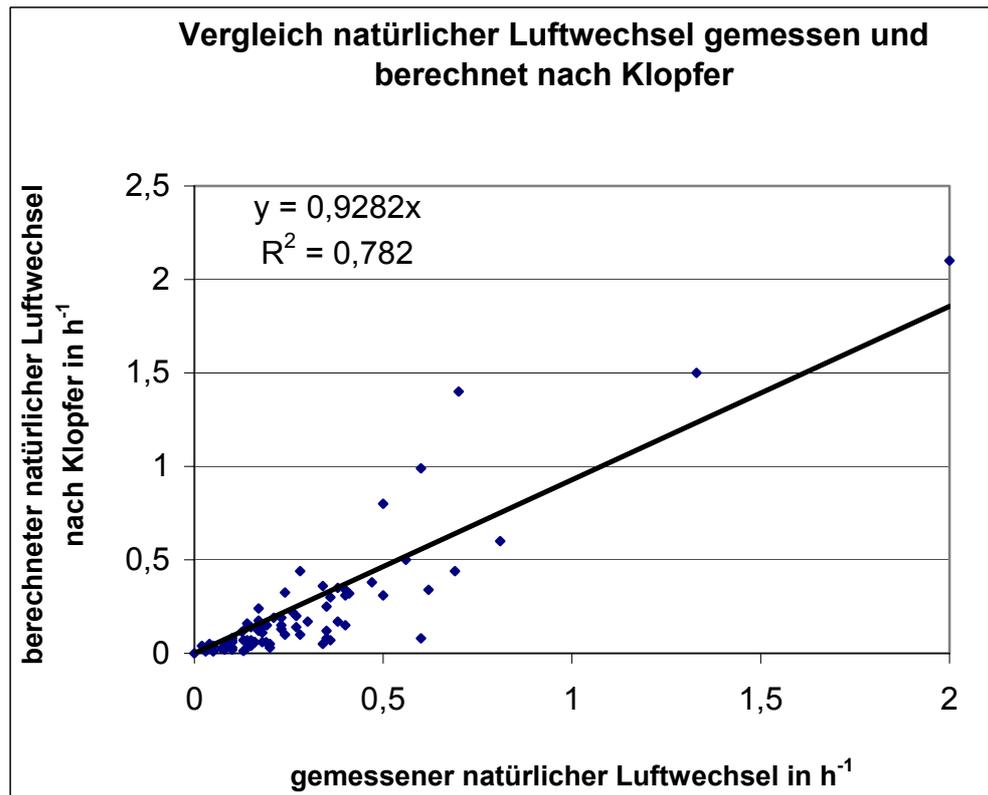


Abbildung 16: Vergleich von $n = 80$ Werten zwischen gemessenen und berechneten natürlichen Luftwechselzahlen nach Klopfer {14}

Die Berechnungsmöglichkeit nach DIN 4108, Teil 6, wurde keiner weiteren Prüfung unterzogen. Das liegt darin begründet, dass nach dieser Norm ein Verhältnis zwischen Blower-Door-Wert und natürlichen Luftwechsel von 10 bei freistehenden und 100 bei geschützten Reihenhäusern besteht. Aus Abbildung 7.5 im Anhang 5 ist erkennbar, dass der natürliche Luftaustausch allerdings zwischen **4** und **245**fach unter dem n_{50} -Wert liegt. Ein Blick in die letzte Spalte der Tabelle 7.2 im Anhang 2 zeigt, dass bei der Zuordnung dieser Werte zum Messobjekt (Tabelle 7.1 im Anhang 2) die höheren Ergebnisse eher bei den freistehenden ungeschützten Gebäuden bestimmt wurden. Das liegt auch daran, dass bei diesem Gebäudetyp generell etwas niedrigere Luftwechselzahlen gemessen wurden. Auf die möglichen Gründe dafür wird aber explizit bei der Abhandlung des Einflusses von der Bauweise auf den Luftaustausch im Abschnitt 4.2.2 eingegangen.

Aus dieser extremen Unsicherheit heraus wird deutlich, dass die Theorie nach DIN 4108, Teil 6, das erhaltene Blower-Door-Ergebnis durch einen bestimmten Wert zu teilen, um einen reproduzierbaren natürlichen Luftwechsel zu erhalten, während dieser Messreihe nicht bestätigt werden konnte. Der Grund für diese Abweichung liegt mit

Sicherheit auch darin, dass während dieser Arbeit keine kompletten Gebäude, sondern nur Wohnbereiche mit größtenteils einer Fassade untersucht worden sind. Das lässt die Theorie der Gebäudeeinteilung nach dieser DIN in den Hintergrund treten. Aus diesem Grund sind nachfolgend nur die in Abbildung 15 und 16 dargestellten Ergebnisse der Strömungsformel und der Gleichung nach Klopfer näher beleuchtet worden.

Soll eine Einschätzung der Güte der zwei Gleichungen erfolgen, so müssen zuerst die Gütekriterien erklärt werden. Grundsätzlich entspricht ein Korrelationskoeffizient r von 1 einer 100%igen Korrelation der untersuchten Werte. Ein Korrelationskoeffizient nahe 1 ist jedoch nur bei monokausalen Zusammenhängen unter Laborbedingungen (z.B. Kalibrationsgeraden in der Analytik) zu erreichen. Unter den hier zugrundeliegenden realen Praxisbedingungen, mit den schon besprochenen Randbedingungen, kann ein Korrelationskoeffizient von **0,5** als gute Übereinstimmung gelten (Benninghaus 1989). Somit wird erkennbar, dass die zwei theoretischen Berechnungsmöglichkeiten eine relativ gute Korrelation mit dem tatsächlich gemessenen natürlichen Luftwechsel zeigen. Das ist aus der Güte des Bestimmtheitsmaßes R^2 ($= r^2$) zu erkennen, welches den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgt wie der Korrelationskoeffizient. Es ist weiterhin ersichtlich, dass die Gleichung {14} nach Klopfer (siehe Abbildung 16) mit einem $r = 0,88$ einen eindeutig lineareren Zusammenhang mit den praktisch bestimmten Werten zeigt, als die Strömungsformel {11} (Abbildung 15) mit $r = 0,8$. Trotzdem besitzen nach Benninghaus (1989) beide eine gute Korrelation. Es gibt noch eine weitere Möglichkeit zu testen, ob der Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten und den berechneten Ergebnissen signifikant ist, oder ob die Korrelationskoeffizienten nur durch Zufälligkeiten entstanden sind. Der nachfolgend beschriebene F-Test wird meist zur Überprüfung des Bestimmtheitsmaßes einer Korrelation zwischen mehreren Einflussfaktoren verwendet. Bei jeweils nur zwei Regressoren ist das Bestimmtheitsmaß schon aussagekräftig genug. Zur Sicherheit ist aber dieses Verfahren noch herangezogen worden.

F-Test...Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist eine Maßzahl zur Beurteilung der „Güte“ der Schätzung (hier Berechnung der Luftwechselrate nach verschiedenen Formeln). Um zu überprüfen, ob sich die ermittelten Bestimmtheitsmaße der zwei Messreihen nur aufgrund zufälliger Einflüsse ergeben haben und in Wirklichkeit die Veränderung der errechneten Luftwechselwerte gar nicht im Zusammenhang mit den gemessenen

Luftwechselwerten stehen, wurde mit dem Statistikprogramm SPSS ein F-Test durchgeführt.

Tabelle 6: Oneway Anova, durchgeführt mit dem Statistikprogramm SPSS

n = 80		Quadrat -summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signi- fikanz
berechnet nach Strömungs- formel	Zwischen d. Gruppen	29,5	41	0,7	10,9	0
	Innerhalb d. Gruppen	2,5	39	0,07		
	Gesamt	32	80			
berechnet nach Klopfer	Zwischen d. Gruppen	6,7	41	0,17	9,6	0
	Innerhalb d. Gruppen	0,6	39	0,02		
	Gesamt	7,4	80			

Dafür ist der F-Wert aus obiger Tabelle 6 mit dem aus der existierenden F-Tabelle (in Backhaus et al. 1990) zu vergleichen. Um den zugehörigen Wert in der F-Tabelle herauszufinden, muss erst geklärt werden, welche Wahrscheinlichkeit für das Vertrauen des Testergebnisses vorgegeben werden soll. Vom Problem her werden **95%** Verlässlichkeit vorausgesetzt, dass eine Ablehnung der Nullhypothese nicht zu unrecht erfolgt. Die Nullhypothesen für diese Fälle würden besagen, dass kein Zusammenhang zwischen gemessenen und berechneten Luftwechselwerten besteht. Weitere wichtige Angaben sind die Zahlen der Freiheitsgrade. Diese berechnen sich aus der Zahl der Regressoren (hier jeweils zwei) und der durchgeführten Beobachtungen (hier **80**). Der mit diesen Größen ablesbare Tabellenwert aus Backhaus et al. (1990) beträgt **3,1**. Dieser ist niedriger als die beim F-Test der zwei Messwertreihen ermittelten F-Werte von **10,9** und **9,6** (siehe obige Tabelle 6). Damit kann die Nullhypothese laut Aufgabenstellung verworfen werden. Mit einer Wahrscheinlichkeit von über **95%** ist anzunehmen, dass der Zusammenhang, den R^2 ausdrückt, nicht zufällig ist (Backhaus et al. 1990).

Vergleich der Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechnetem Luftwechsel...Die folgenden Diagramme (Abbildung 17 und 18) zeigen, wie sich die Werte der einzelnen Berechnungsmöglichkeiten bei steigendem natürlichen Luftwechsel verhalten. Es können so bestimmte Schwächen oder Stärken der theoretischen Gleichungen für einzelne praktische Messbereiche erkannt werden.

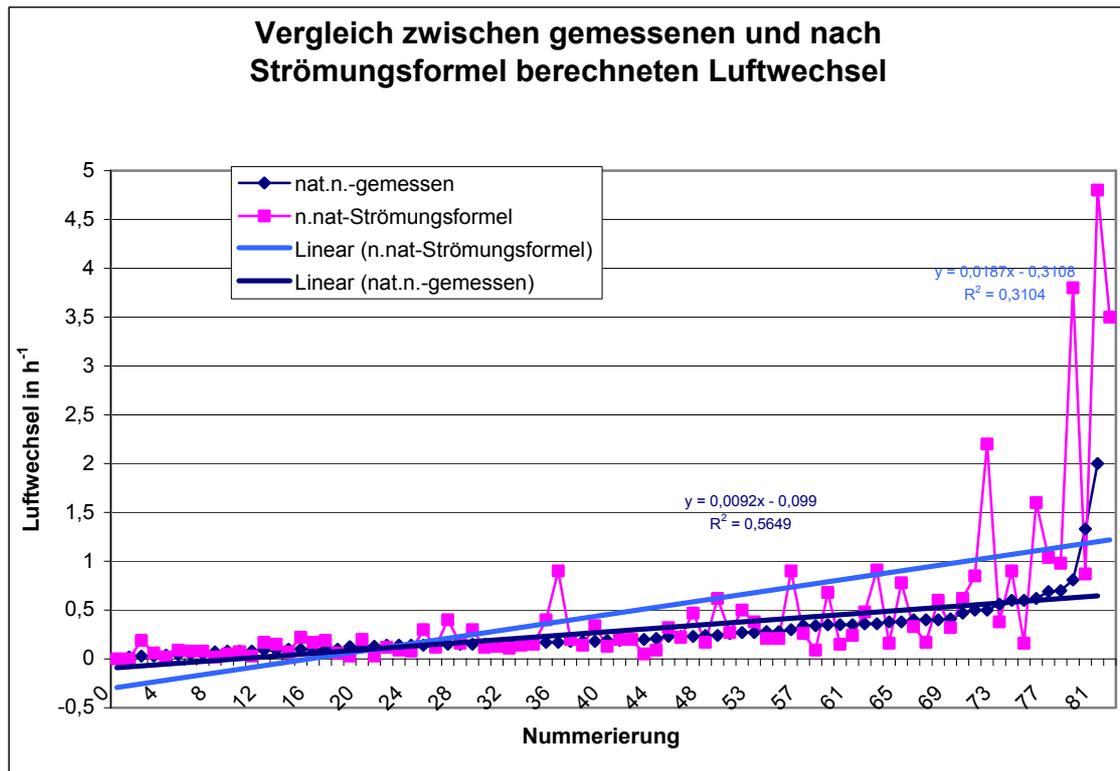


Abbildung 17: Verhalten des berechneten Luftwechsels nach der Strömungsformel bei steigenden natürlichen Luftaustausch ($n = 80$)

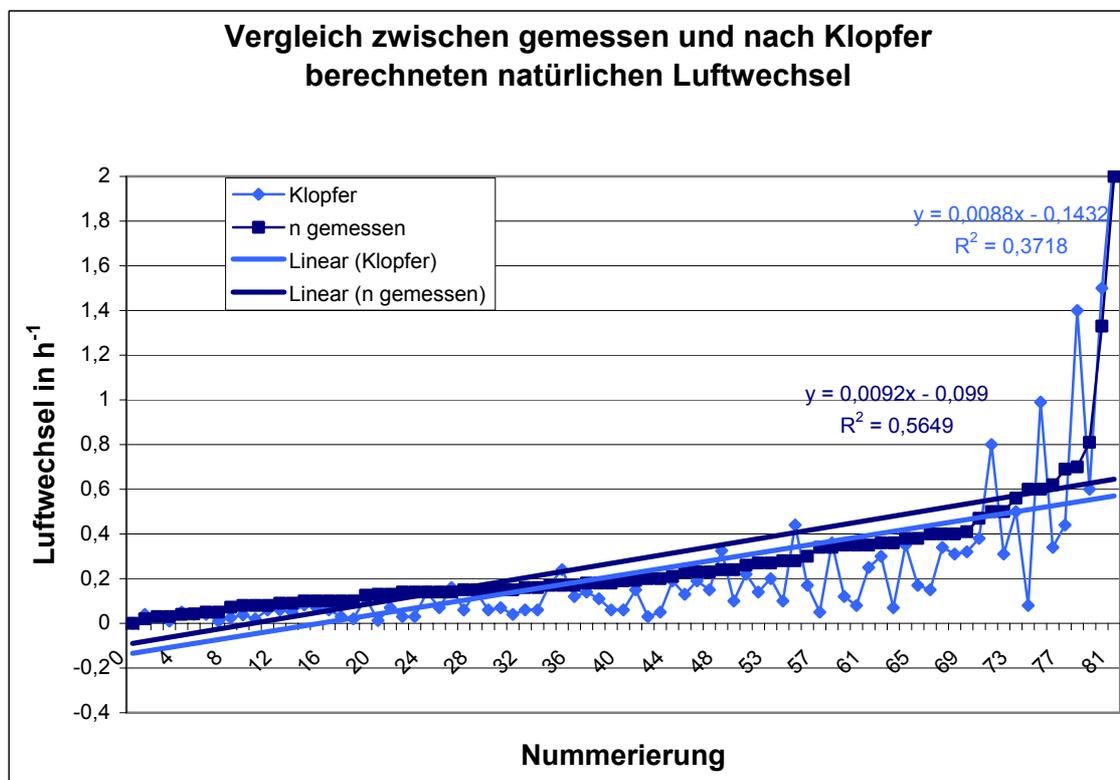


Abbildung 18: Verhalten des berechneten Luftwechsels nach Klopfer bei steigenden natürlichen Luftaustausch ($n = 80$)

Aus Abbildung 17 ist gut zu erkennen, dass die Berechnung nach der Strömungsformel bei niedrigen natürlichen Luftwechselwerten sehr gute Übereinstimmungen zeigt, aber mit steigenden Werten zu hohe Ergebnisse liefert. Dagegen liegen die Messergebnisse der Klopferformel (Abbildung 18) meist etwas unter den gemessenen Luftwechseln.

Diese Trends sollen nun genauer untersucht werden. Es müssen dafür die Einflussgrößen für die jeweiligen Berechnungen näher beleuchtet werden. So sind vielleicht Gründe für die erkannten Schwachpunkte der einzelnen theoretischen Methoden bei den oben beschriebenen Messbereichen aufzudecken. Möglicherweise könnten so Verbesserungen an diesen bestehenden mathematischen Beziehungen durchgeführt werden, um die Korrelation noch zu erhöhen.

Aus den gerade genannten Gründen besteht die nächste Aufgabe darin, die einzelnen Luftwechseleinflussgrößen auf ihre Gewichtung hin zu testen. Da in dem Zusammenhang die bestehende Druckdifferenz zwischen der Gebäudeinnen- und Außenseite sowie das Gebäudealter vermutlich die wichtigsten Komponenten sind, werden diese nun entsprechend untersucht.

4.2.2 Untersuchung auf Gewichtung der Einflussgrößen

Wichtig zu erwähnen ist, dass bei der Untersuchung nach Gewichtung einzelner Einflussgrößen auf den natürlichen Luftwechsel alle Vergleichsmessungen von Messobjekten mit Lüftungsanlage herausgelassen wurden ($n = 4$). Dies begründet sich damit, dass hier keine natürlichen Antriebskräfte, sondern manuell einstellbare Anlagen für einen natürlichen Luftaustausch sorgen.

Generell ist eine Untersuchung vorgenommen worden, inwieweit die Größen Druckdifferenz und Baujahr Einfluss auf den natürlichen Luftwechsel haben. Dabei ist beim Begriff „Baujahr der Untersuchungsgebäude“ das Jahr des Einbaus oder der Modernisierung der Luftdichtigkeitsschicht und damit vorrangig der Fenster gemeint. Diese Größe korreliert mit der Dichtigkeit des Gebäudes, was durch den n_{50} -Wert der Blower-Door-Messung nachgewiesen werden kann. Um die Gewichtung der einzelnen Größen zu überprüfen, wurde eine „Multiple Regressionsanalyse“ und eine „Varianzanalyse“ mit dem Statistikprogramm Statgraphics durchgeführt.

Beim ersten Verfahren wird überprüft, ob überhaupt ein Einfluss auf den natürlichen Luftwechsel von beiden Parametern ausgeht und welcher eventuell den höheren Einfluss besitzt. In der Abbildung 7.3 im Anhang 3 ist zu erkennen, dass die Werte bei der Druckdifferenz und auch beim Baujahr unter **0,05** liegen. Damit haben sie mit einer Wahrscheinlichkeit von über **95%** einen signifikanten Einfluss auf den natürlichen gemessenen Luftaustausch. Weiterhin ist erkennbar, dass beim Baujahr die Werte geringer sind. Damit besitzt diese Größe die höhere Gewichtung auf den natürlichen Luftwechsel.

Bei der „Varianzanalyse“ wurde festgestellt, dass die beiden Parameter insgesamt **94,3%** der Gesamtvarianz des gemessenen Luftwechsels erklären (siehe Abbildung 7.4 im Anhang 3). Nur **5,7%** können damit nicht nachvollzogen werden. So wird deutlich, dass hier die Haupteinflussparameter auf die gemessene Größe zu finden sind (Backhaus et al. 1990).

Weiter ist wichtig zu betrachten, wie sich der natürliche Luftwechsel in Abhängigkeit seiner Einflussgrößen verhält. Theoretisch könnte angenommen werden, je neuer desto dichter ist eine Gebäudehülle. Diese Vermutung wird durch Abbildung 21 bestätigt. Hier ist eine deutliche Abnahme der Luftwechselraten zu erkennen, umso jünger die Luftdichtigkeitsschicht ist. Weiter müsste bei zunehmender Dichtheit auch der n_{50} -Wert sinken, weil er der wichtigste Parameter für diese Gebäudeeigenschaft ist.

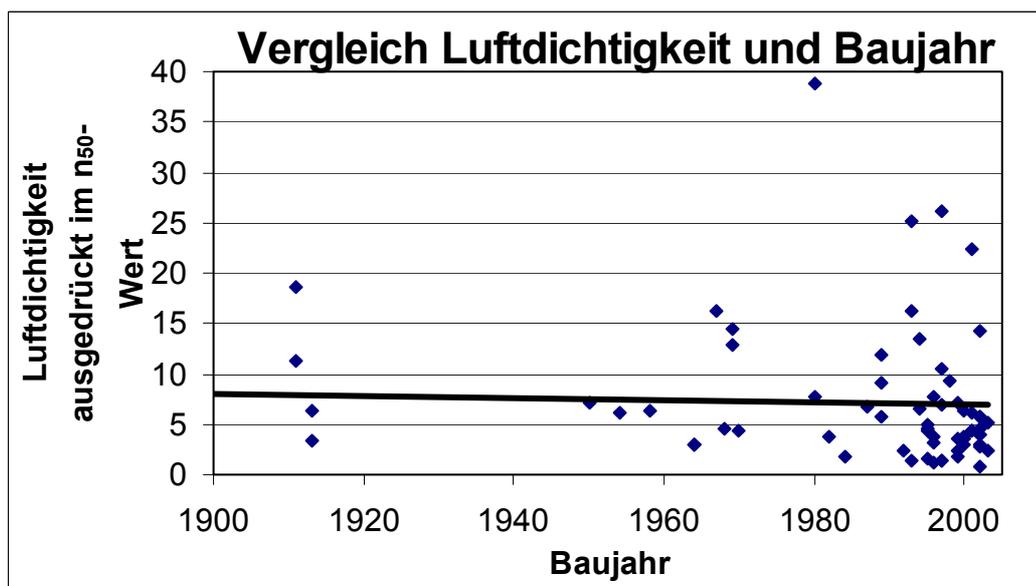


Abbildung 19: Vergleich zwischen der Luftdichtigkeit, ausgedrückt im n_{50} -Wert und dem Baujahr der Luftdichtigkeitsschicht der Gebäudehülle ($n = 76$ Werte)

In Abbildung 19 ist das Verhalten der während dieser Arbeit gemessenen Luftdichtigkeiten, ausgedrückt im n_{50} -Wert, im Bezug zum Baujahr der Messobjekte dargestellt. Daraus wird deutlich, dass die beim Blower-Door-Versuch bestimmten Luftaustauschwerte umso kleiner werden, je neuer eine Gebäudehülle ist. Das bekräftigt die oben aufgestellte Annahme. In Abbildung 20 ist letztlich das Verhalten des natürlichen Luftwechsels in Abhängigkeit der Luftdichtigkeit der Gebäude aufgezeigt. Wie erwartet besteht hier eine Korrelation. Je fugendichter, umso weniger Volumenstrom kann durch die Fassade strömen.

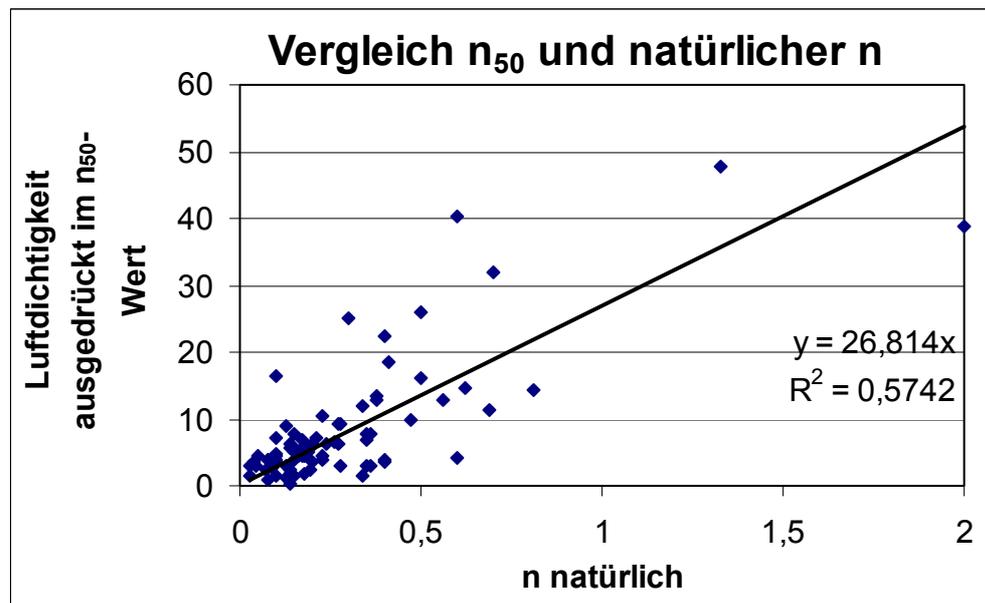


Abbildung 20: Vergleich zwischen der Dichtigkeit des Gebäudes, ausgedrückt im n_{50} -Wert und dem natürlichen Luftwechsels n in den Untersuchungsobjekten ($n = 76$ Werte)

Es folgt mit den Diagrammen 21a) und b) der Vergleich zwischen dem Baujahr (bzw. Bautyp) und dem dort vorherrschenden Luftwechsel. Es ist dabei eine Unterteilung in alte und neue Bundesländer vorgenommen worden.

→ Legende für den Vergleich des Baujahres mit den Luftwechselln

-  Typ 1: Gebäudebaujahr vor dem 20.Jh. ohne neuere Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 2: Gebäudebaujahr vor dem 20.Jh. mit Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 3: Gebäudebaujahr zwischen 1900 und 1935 mit Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 3a: Gebäudebaujahr zwischen 1900 und 1935 ohne neuere Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 4: Reihenhaus, Baujahr zwischen 1936 und 1959 mit Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 4a: Reihenhaus, Baujahr zwischen 1936 und 1959 ohne neuere Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 5: Gebäudebaujahr zwischen 1960 und 1969 mit Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 5a: Gebäudebaujahr zwischen 1960 und 1969 ohne neuer Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 6: Gebäudebaujahr zwischen 1970 und 1985 mit Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 6a: Reihenhaus, Baujahr zwischen 1970 und 1985 ohne neuere Modernisierung der Gebäudehülle
-  Typ 7: Gebäudebaujahr zwischen 1986 und 1995
-  Typ 8: neuere Gebäude

*Modernisierungen, welche den Luftwechsel beeinflussen, wie z.B. neue Fenster oder Außendämmung

Abbildung 21: Vergleich zwischen Baujahr und vorherrschenden Luftwechsel unterteilt in a) neue und b) alte Bundesländer (insgesamt n = 76 Werte)

Grundsätzlich ist auch hier erkennbar, dass seit den letzten Jahren der Luftwechsel abgenommen hat. Das begründet sich hauptsächlich mit der Wärmeschutzverordnung (WSchV 1995), welche niedrigere Fugendurchlasskoeffizienten bei neuengebauten Fenster vorschreibt.

Letztlich soll die eigentliche Antriebskraft des Luftwechsels, die Druckdifferenz zwischen der Gebäudeinnen- und Außenseite beleuchtet werden. Tabelle 7.2 im Anhang 2 zeigt (siehe auch Abbildung 22), dass eine Erhöhung der Druckdifferenz, durch einen hohen Temperaturunterschied zwischen Gebäudeinnen- und Außenseite oder eine starke und direkte Windanströmung, alleine nicht ausreicht, um den natürlichen Luftwechsel entscheidend ansteigen zu lassen. Vielmehr besitzt der Modernisierungszeitpunkt und die damit meist einhergehende Abdichtung der Fugen die größte Gewichtung (Tabelle 7.1 und 7.2 im Anhang 2). Das wird auch mit der durchgeführten „Multiplen Regressionsanalyse“ bekräftigt. Zur Verdeutlichung dieser These kann auch Abbildung 22 hinzugezogen werden. Wird ein konkretes Gebäude betrachtet, so ist mit steigenden Differenzdrücken zwischen Innen- und Außenseite des Gebäudes auch ein steigender Luftwechsel zu verzeichnen. Dieser Zusammenhang wäre auch bei der Gesamtheit der Bauten zu erwarten. Tabelle 7.2 im Anhang 2 zeigt aber, dass dies nicht der Fall ist. Die Ursache hierfür ist, dass die Druckdifferenz bei einem konkreten Gebäude von der Größe und Lage der einzelnen Leckageflächen abhängt.

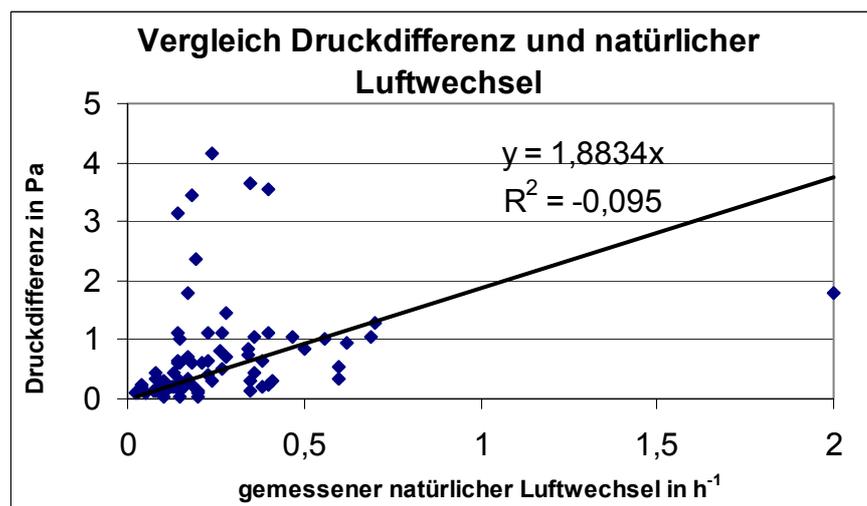


Abbildung 22: Vergleich zwischen natürlichem Luftwechsel und Druckdifferenz zwischen Gebäudeinnen- und Außenseite (n = 76 Werte)

Durch vorgenommene Energieeinsparmaßnahmen und die dadurch erfolgte Reduzierung der Gebäudefugen, können auch bei Druckerhöhungen nur noch geringfügige Luftmengen ausgetauscht werden. Die höheren Luftwechsel bis zu 2 h^{-1} konnten allein dadurch entstehen, dass die betreffenden Gebäudehüllen noch unsaniert waren und so doch einige Leckagen durch undichte ältere Fenster oder Rollladenkästen aufwiesen (siehe Messung 56. in Tabelle 7.1 im Anhang 2). Grundsätzlich sei hier aber nochmals daraufhingewiesen, dass eine Druckdifferenzerhöhung natürlich immer auch einen Anstieg der Luftwechselzahl bedeutet, ganz gleich wie dicht ein Gebäude ist. Das heißt, die relativen Auswirkungen sind die gleichen. Unterschiedlich sind nur die Dimensionen und damit die ausgetauschten Volumen. Wenn sich bei einem abgedichteten Haus beispielsweise eine Luftwechselzahl durch Differenzdruckerhöhung von $0,05$ auf $0,1 \text{ h}^{-1}$ verdoppelt, dann sind das bei weitem nicht solche Volumenstromerhöhungen, wie bei einem unsanierten Gebäude, bei dem sich während des selben Vorgangs der Luftaustausch von 1 auf 2 h^{-1} erhöht.

Es ist in diesem Zusammenhang auch überprüft worden, ob mit der Abdichtung der Gebäude auch eine generelle Druckdifferenzerhöhung zwischen Innen- und Außenseite vonstatten geht. Die Überlegung wäre, dass zum Beispiel durch Temperaturerhöhung in der Heizphase innen oder bei starken Windanströmungen außen, die Druckunterschiede durch unzureichende Ausgleichsströmungen höher sind, als bei unsanierten, fugenoffeneren Bauten. Ein Blick auf die Abbildung 23 kann diese Annahme allerdings nicht zufriedenstellend beantworten. Es müsste, um obige Theorie zu bestätigen, mit niedrigeren n_{50} -Werten ein Anstieg der Druckdifferenzen einhergehen. Dieser Trend ist aber nicht zu erkennen.

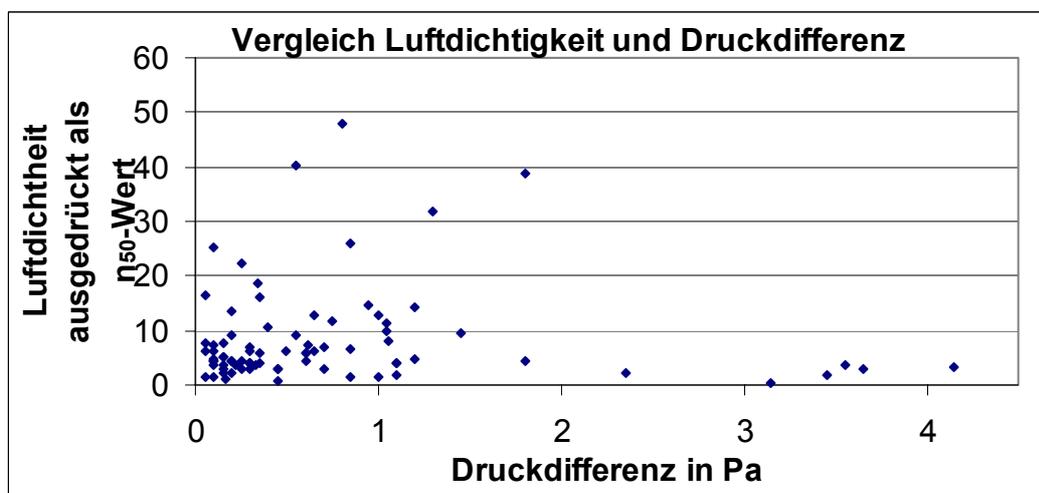


Abbildung 23: Vergleich der Gebäudedichtigkeit, ausgedrückt als n_{50} -Wert und der Druckdifferenz ($n = 76$ Werte)

Als weitere interessante Gebäudeeigenschaft neben dem Baujahr ist noch die Relevanz der Bauweise auf den natürlichen Luftwechsel überprüft worden. Dabei fand eine Einteilung in freistehende Gebäude und Reihenhäuser statt. Die zugehörigen Werte sind in Tabelle 7.3 im Anhang 4 einzusehen. Die wesentlichsten Ergebnisse sind in Tabelle 7 und illustrativ auch in den Abbildungen 21 a) und b) dargestellt.

Tabelle 7: Wesentliche Ergebnisse des Vergleiches zwischen Reihenhäusern und freistehenden Gebäuden

n = 76	Reihenhäuser	freistehende Gebäude
Mittelwert der natürlichen Luftwechsel in h^{-1}	0,29	0,24
10.Perzentil in h^{-1}	0,04	0,05
50.Perzentil in h^{-1}	0,19	0,17
90.Perzentil in h^{-1}	0,4	0,5
Mittelwert der Druckdifferenzen zwischen Innen- und Außenseite in Pa	0,9	0,6

Die DIN 4108, Teil 6, geht aufgrund theoretischer Überlegungen davon aus, dass bei freistehenden Häusern ein höherer natürlicher Luftwechsel auftritt, als bei Reihenhäusern, da dort mehr Außenwandfläche mit Leckagen für den Luftdurchtritt vorhanden ist. In der Praxis der durchgeführten Untersuchungen hat sich jedoch gezeigt, dass freistehende Bauten keinen signifikant anderen Luftwechsel aufweisen. So wurde bei den Reihenhäusern ein Mittelwert von **0,29** h^{-1} und bei den freistehenden Bauten ein Mittelwert von **0,24** h^{-1} aus den Messergebnissen errechnet. Auch bei Betrachtung der Perzentilwerte (Tabelle 7) sind keine auffällig höheren Zahlen bei den freistehenden Gebäuden zu finden. Diese Ergebnisse sind relativ aussagekräftig, da an den meisten Versuchstagen in etwa die gleichen Wind- und Temperaturverhältnisse herrschten (siehe auch Tabelle 7.1 im Anhang 2). Damit kann die in der DIN 4108, Teil 6, getroffene Annahme nicht bestätigt werden. Zu erklären ist dies dadurch, dass im Rahmen der Untersuchungen bei Reihenhäusern höhere Differenzdrücke auftraten (Tabelle 7), was auch aufgrund theoretischer Überlegungen (höherer zu vermutender Staudruck) zu erwarten ist.

Da der Luftwechsel mit dem Differenzdruck ansteigt, ist davon auszugehen, dass die geringere Lüftungsfläche bei Reihenhäusern durch diese erhöhte Druckdifferenz zwischen der Gebäudehülle aufgehoben wird.

Aus Tabelle 7.1 im Anhang 2 wird auch ersichtlich, dass ebenfalls nicht relevant ist, in welcher Etage die Messung stattfand. Damit bleibt das Alter der Gebäudedichtheitsschicht und damit die Dichtheit (ausgedrückt auch als n_{50} -Wert) die entscheidendste Größe.

In diesem Zusammenhang kann eine Unterteilung der verschiedenen Modernisierungsarbeiten unberücksichtigt bleiben. Zum Beispiel ist kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen erneuerten Fenstertypen (Isolier-, Wärmeschutzverglasung usw.) zu erkennen. Die neueren a -Werte (Fugendurchlasskoeffizienten) sind so niedrig, dass ohnehin nur ein verschwindend geringer Teil an Luft durchströmen kann. Viel entscheidender ist, ob die älteren Holzfenster schon durch neuere Kunststofffenster oder Holzfenster mit Kunststoffdichtung ersetzt worden sind oder nicht. Im Abschnitt 4.2.3 sind die Perzentile der Luftwechselzahlen bei älteren Fenstern und die von neuen Fenstern aus Kunststoff oder mit Kunststoffdichtung dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen die oben getroffenen Aussagen.

Nachdem nun die bedeutendsten Antriebskräfte näher beleuchtet und analysiert wurden, bleibt jetzt die Aufgabe, auf dieser Basis ein neues Rechenmodell zu finden. Dies soll die unterschiedlichen Gewichtungen der schon bestehenden Berechnungsmöglichkeiten und der oben getesteten Einflussgrößen berücksichtigen. Weiterhin sollen dabei die schon bestehenden Korrelationskoeffizienten zwischen berechneten und gemessenen Luftwechselwerten verbessert werden. Dazu wurden mit dem Statistikprogramm Statgraphics die verschiedensten Untersuchungen durchgeführt, um eine Verbesserung der zwei Gleichungen durch die Entwicklung einer neuen Formel zu erreichen. Leider konnte durch keine der vorgenommenen Analysen eine merkliche Steigerung des Korrelationskoeffizienten erzielt werden. Die einzige Variante ist die Korrektur der Gleichung nach Klopfer {14}. Wie aus Diagramm 18 ersichtlich wird, liegen die mit dieser Formel berechneten Werte generell etwas unter den gemessenen Luftwechselwerten. Durch Ausprobieren konnte ermittelt werden, dass eine Multiplikation der Werte nach Klopfer mit **Zwei** eine erhebliche Verbesserung der Korrelation mit den gemessenen Ergebnissen geschafft werden konnte (siehe Abbildung 24).

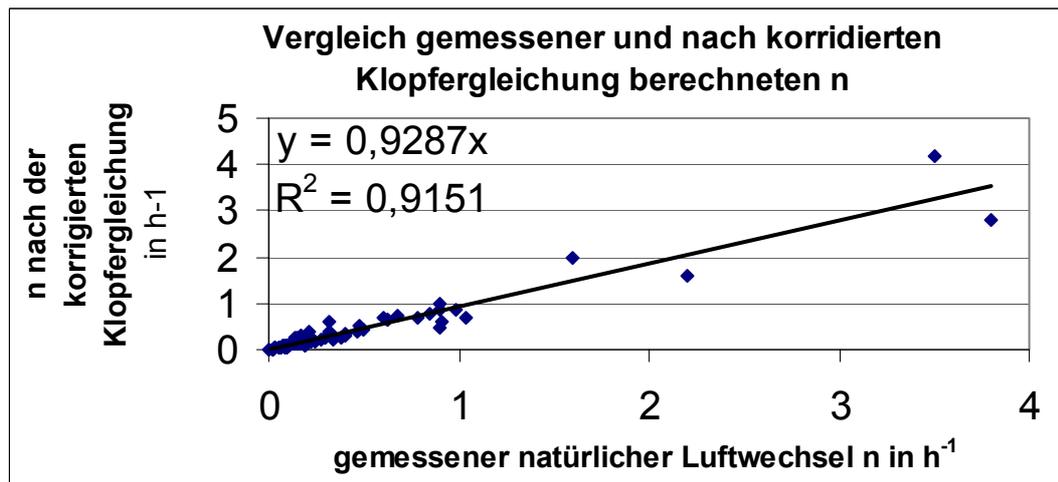


Abbildung 24: Verbesserte Korrelation durch Korrektur der Klopfergleichung (n = 76)

Durch diesen Rechenvorgang wird der schon enthaltene Faktor von **0,5** in Gleichung {14} wieder herausgerechnet. Dieser sollte, wie unter 2.3 beschrieben, den Fakt berücksichtigen, dass bei realem Windeinfluss nur etwa die Hälfte der Hüllflächen zum Eintritt von Außenluft zur Verfügung stehen. Die andere Hälfte wird zum Luftaustritt benötigt. Daher werden die Zahlenwerte um die Hälfte verringert, um einen Bezug zum Blower-Door-Test herstellen zu können. Hier steht durch einen überall einheitlichen Druck die gesamte Hüllfläche, mit all ihren Leckagen, zum Luftaustausch zur Verfügung. Da aber in dieser Versuchsreihe nur einzelne Wohneinheiten und Räume und keine Gesamtgebäude untersucht wurden, ist die Eingangstür als mögliche Leckage im Verhältnis zur restlichen Hülle nicht zu vernachlässigen. Es kann somit gesagt werden, dass die größeren Luftdurchgangswege beim Blower-Door-Versuch durch die fehlende, weil für den Blower-Door-Versuch benötigte und damit abgedichtete Tür, wieder ausgeglichen werden. Diese Leckage steht dagegen bei der Tracergasmethode für den Luftabtransport zur Verfügung. Möglicherweise ist hierdurch zu erklären, dass für diese Untersuchungsreihe der Faktor 0,5 weggelassen werden kann.

theoretischer natürlicher n = {23}

$$\left[\frac{(\text{dp (durch Blower-Door bestimmt)}^{2/3})}{13,54} \right] * n_{50} \text{ (durch Blower-Door ermittelt)}$$

Die dadurch erzeugte Korrelation zum gemessenen natürlichen Luftwechsel ist in Abbildung 21 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient **r** beträgt nun **0,96** ($\sqrt{R^2}$).

4.2.3 Überblick über die natürlichen und unter 50 Pa Differenzdruck erzwungenen Luftwechsel

Hier soll eine Übersicht gegeben werden, welche Ergebnisse generell bei den Untersuchungen ermittelt worden sind. Alle gemessenen Werte sind komplett in Tabelle 7.2 im Anhang 2 zu finden. Es wurden auch in diesem Zusammenhang nachfolgende Vergleichsmessungen zur Bestimmung der Luftwechselrate aus Untersuchungsobjekten mit raumluftechnischen Anlagen nicht berücksichtigt. So können die Dichtheit und der Luftaustausch unter worst-case Bedingungen in den Messräumlichkeiten abgeschätzt werden. Damit sind durch die relativ aussagekräftige Messreihe auch Rückschlüsse auf die Gesamtgebäudesituation in Deutschland zu ziehen.

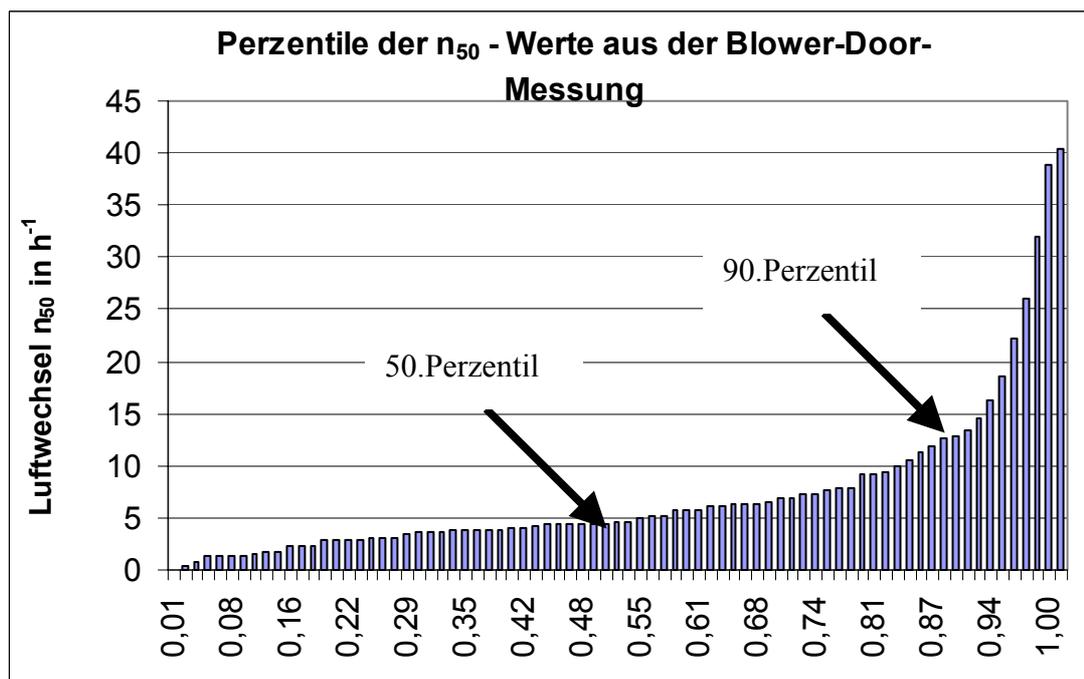


Abbildung 25: Perzentile der Blower-Door-Messung und zugehörige n₅₀-Werte (n = 76 Werte)

Ein Blick auf Abbildung 25 lässt erkennen, dass **50%** aller n₅₀-Luftwechselwerte aus der Blower-Door-Messung unter **5 h⁻¹** liegen. Das sagt das Perzentil **0,5** (50. Perzentil) aus, für das der entsprechende Luftwechselwert zugeordnet werden kann. 90% aller Werte sind unter **14,5 h⁻¹** einzustufen. Aus Tabelle 7.2 im Anhang 2 ist ein Mittelwert aus den Blower-Door-Messergebnissen von **7,4 h⁻¹** errechnet worden. Damit liegen diese

Ergebnisse für Altbaubestände in einem Bereich, der angesichts der Grenzwerte von 3 h^{-1} für Neubauten, erwarten werden kann. Hierbei ist natürlich entscheidend, ob eine Modernisierung der Gebäudehülle durchgeführt wurde. Durch die erzwungene Druckdifferenz von 50 Pa wird durch alle bestehenden Leckagen ein erheblicher Volumenstrom gefördert. Da hier auch unsanierte Bauten untersucht wurden, erklären sich die teilweise erhöhten Ergebnisse von bis zu 40 h^{-1} .

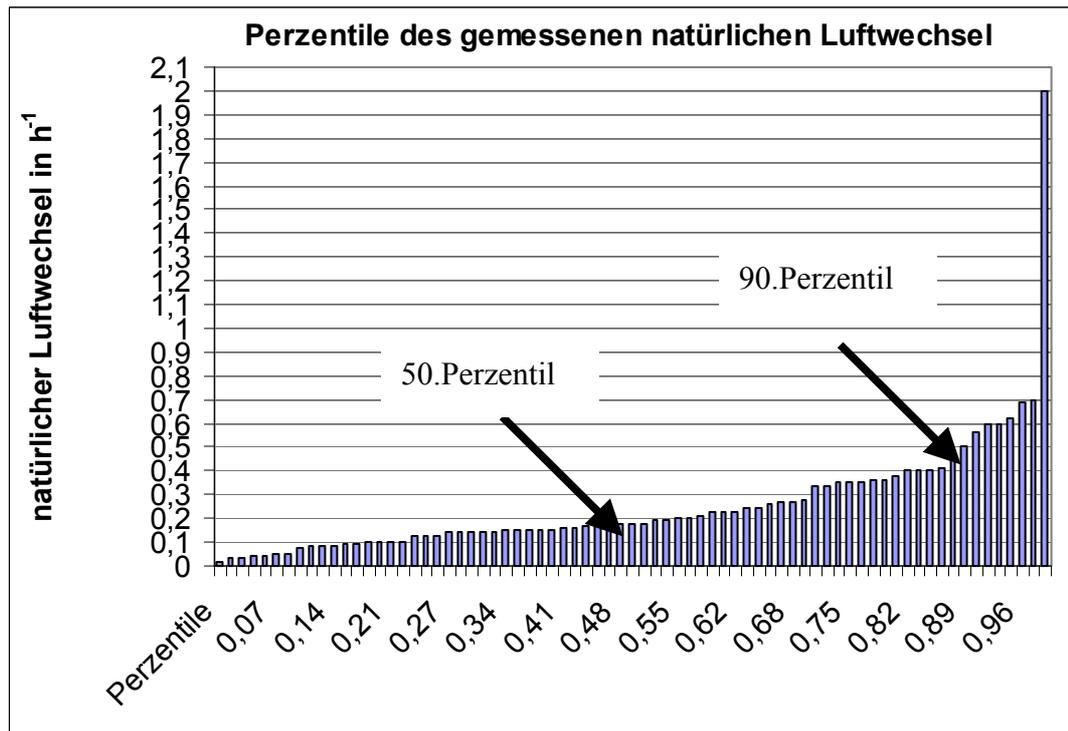


Abbildung 26: Perzentile des gemessenen natürlichen Luftwechsels ($n = 76$ Werte)

Aus Abbildung 26 ist erkennbar, dass das Perzentil **0,5** (50.Perzentil) den Luftwechselwert **$0,18 \text{ h}^{-1}$** besitzt. Dies sagt aus, dass 50% aller Messwerte unter **$0,18 \text{ h}^{-1}$** liegen. Auch wenn eigentlich hauptsächlich Altbaubestand untersucht wurde, liegen immerhin 90% aller Werte unter **$0,5 \text{ h}^{-1}$** . Der aus den Daten der Tabelle 7.2 im Anhang 2 berechnete Mittelwert aus den gemessenen natürlichen Luftwechselwerten beträgt **$0,26 \text{ h}^{-1}$** . Da dieses Ergebnis auch von Bauten ohne neuere Modernisierung der Gebäudedichtheitsschicht stammt, wird deutlich, dass auch bei undichteren Gebäuden keine sehr hohen natürlichen Luftwechsel auftreten. Das liegt in den im Mittel sehr geringen Druckdifferenzen während der gesamten Messperiode begründet (siehe auch Tabelle 7.2 im Anhang 2). Es ist aber generell damit zu rechnen, dass die Drücke im Durchschnitt nicht sonderlich ansteigen, da die Messreihe schon über einen

reproduzierbaren Zeitraum lief und sich das Messgebiet über eine größere geographische Fläche erstreckte.

Da es sich bei den oben dargelegten Ergebnissen um einen Überblick der gesamten Messungen handelt, soll im Folgendem ein Vergleich zwischen den ermittelten Luftwechselzahlen in Abhängigkeit der Fensterbaujahre vorgenommen werden. Dabei erfolgt eine Unterteilung in vor und nach 1980 angefertigte Fenster. Diese zeitliche Einteilung begründet sich damit, dass bis in die 70er Jahre Fenster ohne Kunststoffdichtung hergestellt wurden. Erst in den letzten 20 Jahren werden die Fenster durch spezielle Abdichtungsmaßnahmen und Verglasungen mit einem immer geringer werdenden a-Wert ausgestattet. Das lässt einen immer geringeren Luftvolumenstrom durch diese Bauteile zu. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 8 einzusehen.

Tabelle 8: Perzentilwerte der Blower-Door-Messungen und der Bestimmung des natürlichen Luftwechsels bei verschiedenen Fensterbaujahren

n = 76	10. Perzentil	50. Perzentil	90. Perzentil	Mittelwert
n₅₀-Wert in h⁻¹ Fensterbaujahr vor 1980	2,9	6,2	15	8,7
n₅₀-Wert in h⁻¹ Fensterbaujahr nach 1980	1,4	4,4	13,4	6,2
n natürlich in h⁻¹ – Fensterbaujahr vor 1980	0,09	0,27	0,63	0,38
n natürlich in h⁻¹ – Fensterbaujahr nach 1980	0,05	0,15	0,35	0,18

Es wird ersichtlich, dass die Werte bei den Objekten mit neueren Fenstern nach 1980 deutlich unter denen mit Fenstern vor 1980 liegen. Vor allem die natürlichen Luftwechselwerte (Tabelle 8) sinken bei heutigen Gebäudedichtheitsstandard im Mittel unter **0,2 h⁻¹**. Um einen für ein gesundes Raumklima ausreichenden durchschnittlichen natürlichen Luftaustausch von ca. **0,7 h⁻¹** zu erreichen, muss also unbedingt manuell oder automatisch gelüftet werden. Wie eine sinnvolle manuelle Lüftung durchgeführt werden könnte, ist beispielhaft im Abschnitt 4.2.4 dargestellt.

4.2.4 Beispiel des Raumklimaverhaltens bei den bestehenden durchschnittlichen natürlichen Luftwechsell

Im Folgenden werden die gewonnenen Ergebnisse auf ihre Auswirkungen auf das Raumklima hin untersucht. Dafür wird ein Raum angenommen, der ein durchschnittliches Volumen von **85 m³** besitzt. Weiterhin wird mit einem natürlichen Luftwechsel bei dichter Gebäudehülle von **0,18 h⁻¹** gerechnet. Das entspricht den mittleren Werten aller Messobjekte, die während dieser Arbeit untersucht wurden. Im Raum sollen sich zwei Personen aufhalten, was bei dieser Wohnungsdimension als realistisch angesehen werden kann. Als Raumklimaparameter ist einmal der Wasserdampfgehalt, als Hauptproblemgröße bei zum Beispiel Schimmelpilzbefall, untersucht worden. Weiterhin wurde der CO₂-Haushalt näher beleuchtet, welcher generell auch Aussagen auf das Verhalten anderer Luftschadstoffe zulässt.

Wasserdampfgehalt

Ein Zwei-Personenhaushalt erzeugt nach Cordes (2001) durchschnittlich **0,3 L/h** Feuchte in Form von Wasserdampf durch Atmung, Kochen, Waschen usw.. Bei einer Dichte des Wassers von 1 g/cm³ ist folgende Rechnung durchführbar:

- $1000 \text{ kg/m}^3 * 0,000332 \text{ m}^3/\text{h} = 0,332 \text{ kg/h} = 332 \text{ g/h}$
- bezogen auf ein Raumvolumen von 85 m³ * 1,18 (Luftwechsel /h) sind das $332 \text{ g}/100,3 \text{ m}^3 * \text{h} = 3,31 \text{ g/m}^3 * \text{h}$
- relative Feuchte = (absolute Feuchtemenge/Sättigung bei 20 °C) * 100%
= $(3,31 \text{ g/m}^3 * \text{h} / 17,3 \text{ g/m}^3) * 100\% = 19,1\%/\text{h}$.

Damit entsteht eine relative Luftfeuchte durch die Bewohner von 19,1%/h. Ausgehend von einer mittleren relativen Luftfeuchte von **50%** ergäbe das eine Summe von **69,1%**. Diese liegt bereits um **9,1%** höher, als der für ein gesundes Raumklima ideal bezeichnete Bereich von **40 – 60%**. In zwei Stunden stiege die relative Feuchte nach Gleichung {24} schon auf **87,7%** an (Abbildung 27).

$$C_t = C_A + \frac{E(1 - e^{(-n*t)})}{n * V_R} \quad \{24\}$$

C_A = Hintergrundanteil des Stoffes
 E = Emissionsrate des Stoffes in m^3/h
 V_R = Raumvolumen in m^3
 n = Luftwechselrate in h^{-1}
 t = Zeit in h

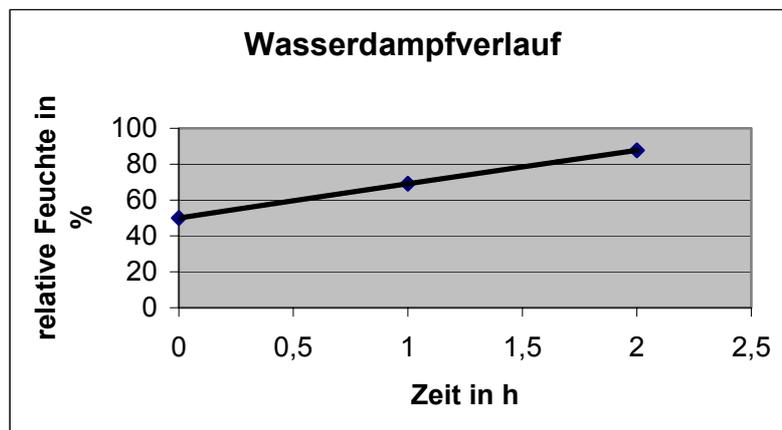


Abbildung 27: Anstieg der relativen Luftfeuchte ohne zusätzliche Lüftung

Somit entstehen Kondensationsprobleme an bestehenden Wärmebrücken der Wände, an denen sich die Raumluft abkühlt und die damit den hohen Feuchteanteil nicht mehr halten können. Nach zwei Stunden würde sich in diesem Beispiel eine absolute Feuchtemenge von **15,2 g/m³** einstellen.

➤ abs. Feuchte = (rel. Feuchte * Sättigungsmenge) / 100%

$$= (87,7\% * 17,3 \text{ g/m}^3) / 100\% = 15,2 \text{ g/m}^3$$

Bei einer Lufttemperatur von **18°C** entsprechen **15,2 g/m³** der Sättigungsmenge (100% relative Luftfeuchte; Baade 1996: 27). An einer kälteren Außenwand (<18°C) würde sich die überschüssige Luftfeuchte als Kondenswasser absetzen und die Wand durchfeuchten. Ein möglicher Schimmelbefall ist die Folge.

CO₂-Haushalt

Eine Person atmet bei leichter körperlicher Tätigkeit ca. **20 L/h CO₂** aus (Mittelwert von Baade 1996: 34 und Ihle 1997: 50). Das macht bei zwei Personen zuzüglich einer natürlichen Hintergrundkonzentration von **365 ppmv** einen Anteil am Raumvolumen von **796 ppmv/h** aus.

Die Berechnung folgt nach der Sättigungsfunktion mit Exponential-Glied (Laussmann, 2001: 344), welche den typischen Konzentrationsverlauf eines Schadstoffes wiederspiegelt. Dieser steigt bei kontinuierlicher Emissions-, und Lüftungsrate bis zu einer Sättigungskonzentration an (siehe Gleichung {24}).

Tabelle 9: CO₂-Grenz- bzw. Richtwerte aus Baade (1996: 35)

Raum	Grenzwert (MAK*) in ppmv	Richtwert nach Pettenkofer in ppmv
Wohnraum		1000
Büro	5000	1500
Arbeitsplatz**	5000	

*Maximale Arbeitsplatz Konzentration; ** gilt generell für Arbeitsplätze

Nach zwei Stunden würde die CO₂ - Konzentration schon auf **1155 ppmv** ansteigen. Damit ist der Richtwert nach Pettenkofer (Tabelle 9), der eine maximale Konzentration von **1000 ppmv** in Wohnräumen vorsieht, überschritten. Der Richtwert für Büros ist somit nach vier Stunden erreicht. Wird diese Rechnung auf durchschnittlich acht Stunden Schlaf bezogen, würde eine Konzentration von **2360 ppmv** entstehen (Abbildung 28).

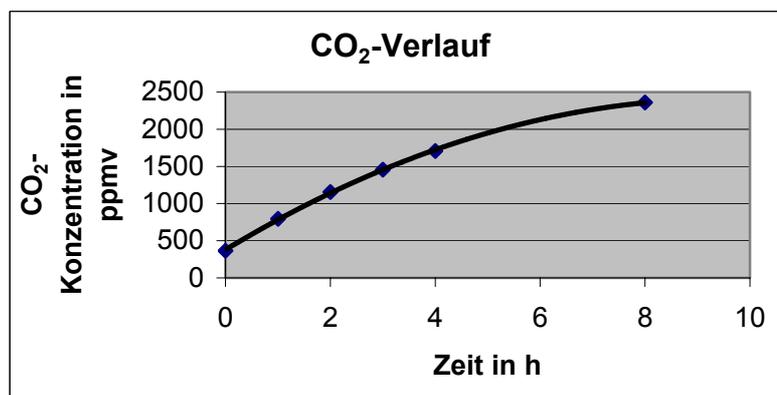


Abbildung 28: CO₂-Anstieg ohne zusätzliche Lüftung

Der schnelle Anstieg des CO₂ ist mit der sehr niedrigen Luftwechselzahl zu erklären. Der laut DIN 1946 geforderte Außenluft-Volumenstrom für Wohnräume von **30 m³** pro Stunde und Person (Baade 1996: 34) ist mit dem vorherrschenden Zuluft-Volumen von **15 m³/h** nicht annähernd gedeckt. Um beide Personen mit ausreichend Frischluft zu versorgen wäre ein Zuluftvolumenstrom von **60 m³/h** und damit ein Luftwechsel von mindestens **0,7 h⁻¹** erforderlich.

Ergebnisse einer normalen manuellen Lüftungsstrategie...Es wird nun versucht, durch experimentelle Untersuchungen herauszufinden, wie groß der durchschnittliche Luftwechsel am Tag bei normalen Lüftungsverhalten ist. Dazu ist in einem Raum von **80 m³** Raumvolumen ein Fenster repräsentative **25 min** auf gekippte Stellung gebracht worden. Das würde normalen Lüftungsbedingungen in Wohnungen entsprechen. Ein Querlüften wird erfahrungsgemäß nicht konsequent durchgeführt, da dass die Gegebenheiten um ein normales deutsches Fenster (Gardinen, Blumen usw.) nicht zulassen würden und die resultierende Zugluft aus Angst vor Erkältungen (Kleinkinder) nicht erwünscht ist. Anschließend erfolgte aus den aufgezeichneten Messwerten ein Aufrechnen des Luftwechsels in diesen **25 min** auf den gesamten Tag. Es wurde angenommen, dass dreimal an einem Tag so eine Lüftung vollzogen wird. Bei abgedichteter Gebäudehülle war ein typischer Luftaustausch von **0,2 h⁻¹** vorherrschend. Damit liegt dieser Wert (**0,2 h⁻¹**) bei geschlossenen Fenster und Türen im Bereich der mittleren natürlichen Luftaustauschzahlen, welche während dieser Arbeit bestimmt worden sind (**50. Perzentil = 0,18 h⁻¹**, **Mittelwert = 0,26 h⁻¹**). In Tabelle 10 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung abgebildet.

Tabelle 10: Durchschnittliche Luftwechselwerte in h⁻¹ bei normaler manueller Lüftung

	n natürlich - alles dicht	n bei 25 min Lüftung	n gesamt in 24 h nach dreimaliger manueller Lüftung
1 gekipptes Fenster	0,2	1,2	0,25
1 Fenster stoßgelüftet	0,2	8,8	0,65

Es ist ein durchschnittlicher Luftwechselwert über 24 h von **0,25 h⁻¹** errechnet worden. Dies wurde über folgende Gleichung ermittelt:

$$n_{\text{Gesamt}} = \frac{((n_{\text{nat.}} * t) + (n_{\text{bei Lüftg.}} * t))}{t_{\text{gesamt}}} \quad \{25\} \quad t = \text{Zeit, in welcher der jeweilige Luftwechsel vorherrscht}$$

In Tabelle 10 ist auch ein Beispiel enthalten, in dem ein zweites Lüftungsprinzip mit einem Fenster durchgeführt wurde. Hier herrschten mit einem natürlichen Luftwechsel von **0,2 h⁻¹** bei geschlossener Hülle gleiche Vorbedingungen wie bei Versuch 1. Während des zweiten Versuches ist das Fenster geöffnet worden und die Türen wurden parallel dazu verschlossen (Stoßlüftung). Die Zeiten blieben die selben. Der Tagesmittelwert bei dieser Lüftungsvariante liegt bei **0,65 h⁻¹**.

Die Ergebnisse in Tabelle 10 zeigen, dass bei der dreimaligen Fensterkipplüftung im Tagesmittel die angestrebten **0,7 h⁻¹**, die für ein gesundes Raumklima in dieser Wohnung notwendig sind (siehe Berechnung der Klimawerte oben), keineswegs erreicht würden. Soll dies nur durch so ein Lüftungsverhalten geschafft werden, dann müsste das Fenster extrem lange gekippt bleiben. Das führt mit Sicherheit, vor allem in den Wintermonaten, zum Auskühlen der Wandoberfläche. Effektiver ist da oben durchgeführte Stoßlüftung.

Wird eine ausreichende Lüftungsstrategie auch in der Heizperiode durchgeführt, so entstehen aber hohe Lüftungswärmeverluste. Dieser Versuch zeigt, dass es generell schwer ist, von einem Wohnungsnutzer ein Lüftungsverhalten zu verlangen, was einem ausreichenden Schadstoffabtransport einerseits und einem niedrigen Energieverbrauch andererseits Rechnung trägt. Eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung ist bei Problemen mit Feuchtigkeit und Schadstoffen sicherlich eine Alternative.

5 Zusammenfassung

Die Aufgabe dieser Diplomarbeit bestand darin, den natürlichen Luftwechsel anhand von Blower-Door-Messungen zu bestimmen. Dabei sollte die Korrelation zwischen dem mittels Blower-Door-Versuch gemessenen Luftwechsel bei 50 Pa n_{50} und dem mittels Tracergas Methode ermittelten „natürlichen“ Luftwechsel n bestimmt werden. Es wurde ein Tracergasverfahren nach der Konzentration-Abfall-Methode aus Literaturrecherchen heraus entwickelt, eingearbeitet und auf seine Genauigkeit überprüft. Als Tracergas wurde CO_2 eingesetzt. Für die Messung des erzwungenen n_{50} -Wertes ist eine Minneapolis Blower-Door verwendet worden. Hierbei ist durch die Überprüfung der Messgenauigkeit bei der Druckdifferenzmessung ein relativ hoher Fehler von 45% ermittelt worden. Dieser ist erklärbar durch die sich verändernden Windverhältnisse während einer Messperiode und soll aus Gründen der praxisbezogenen Aufgabenstellung akzeptiert werden. Um den Fehler stark zu verringern, wäre es geeigneter, die natürlichen Druckdifferenzen während der Tracergasmessung aufzunehmen. Dieses ist aber wegen der aufwändigen Versuchsanordnung nicht durchführbar gewesen.

Um aus den erhaltenen Daten der 80 vorrangig im Altbaubestand durchgeführten Vergleichsmessungen auf den natürlichen Luftaustausch schließen zu können, wurden verschiedene theoretische Berechnungsverfahren auf ihre praktische Relevanz hin untersucht. Dabei ist bei der Gleichung {14} nach Klopfer mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,88$ der beste Zusammenhang festgestellt worden. Das zweite Rechenverfahren nach der Strömungsgleichung {11} wies mit $r = 0,8$ auch noch eine akzeptierbare Korrelation auf. Die Messreihe hat weiter gezeigt, dass durch einen Korrekturfaktor in der Klopferformel {14} die Korrelation bis auf $r = 0,96$ verbessert werden konnte. Die Berechnung nach der DIN 4108, Teil 6, hat sich in dieser Testreihe als zu ungenau herausgestellt und kann für gleichartige Versuchsanordnungen nicht empfohlen werden. Das liegt daran, dass überraschenderweise bei freistehenden Gebäuden keine höheren natürlichen Luftwechselzahlen ermittelt wurden, als bei Reihenhäusern. Ein Grund könnte darin liegen, dass bei letzteren Bauweisen, bedingt durch die geringeren Lüftungsflächen, höhere Druckdifferenzen zwischen Innen- und Außenseite auftreten.

Bei der Gewichtungsanalyse der einzelnen Einflussgrößen auf den natürlichen Luftwechsel, ist das Jahr der Bebauung beziehungsweise der Modernisierung der

Gebäudehülle als entscheidendster Fakt identifiziert worden, da dort die Abdichtung der Lüftungsflächen erfolgt. Damit einher geht der Einfluss des n_{50} -Wertes aus der Blower-Door-Messung, weil dieser als Parameter für die Gebäudedichtheit gilt. Erst danach ordnet sich die vorherrschende Druckdifferenz zwischen der Gebäudeinnen- und Außenseite ein.

Während der Messreihe wurden hauptsächlich n_{50} -Werte bestimmt, die zu 50% unter **5** und bis zu 90% unter **14,5** h^{-1} (50. - 90. Perzentil), bei einem Mittelwert von **7,4** h^{-1} , lagen. 50% der gemessenen natürlichen Luftwechselwerte lagen unter **0,18** und 90% unter **0,5** h^{-1} (50. – 90. Perzentil), bei einem Mittelwert von **0,26** h^{-1} . Obwohl bei der Überprüfung des Gebäudebestandes auch unsanierte ältere Bauten untersucht wurden, bei denen die Blower-Door-Versuche erwartungsgemäß relativ viel Leckagen dokumentierten, sind die gemessenen natürlichen Luftwechsel als sehr gering anzusehen. Bei mittleren Werten um **0,2** h^{-1} ist von einem ausreichenden gesunden Luftaustausch nicht mehr auszugehen.

Es ist auch nicht damit zu rechnen, dass bei höheren Druckdifferenzen als während der Untersuchungszeit auch höhere natürliche Luftwechsel entstehen würden. Zum Einen wurden die Messungen schon über einen reproduzierbaren Zeitraum und eine größere geographische Fläche erstreckt. Dies lässt vermuten, dass die Druckdifferenzen nur an sehr vereinzelt Tagen ansteigen. Zum Anderen ist die Gebäudedichtheit für den durch die Bauteile strömenden Volumenstrom entscheidender.

Um eine ausreichende Frischluftzufuhr zu erhalten, reicht eine herkömmliche und zumutbare Lüftung, wie sie meist vorgenommen wird, im modernisierten Altbaubestand bei weitem nicht aus. Dies zeigen beispielhaft durchgeführte Berechnungen in dieser Arbeit. Dazu müsste mindestens dreimal am Tag die **25**minütige Stoßlüftung eines Fensters erfolgen. Das kann bei normaler Wohnungsnutzung eigentlich schon als unzumutbar angesehen werden, auch im Hinblick von Lüftungswärmeverlusten in der Heizphase. Ein Konzept zur Sicherstellung eines hygienisch notwendigen Luftwechsels sollte daher zu jeder Altbausanierung dazugehören, zumal es über differenzdruckgesteuerte Zuluftventile und kontrollierte Abluftanlagen bis hin zu dezentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ausreichend technische Möglichkeiten gibt, die auch im Altbau nachgerüstet werden können.

6 Literaturverzeichnis

- Baade W.** (1996): Elektrische Lüftungs- und Raumklimotechnik. Verlag Technik GmbH, Berlin, 185 S.
- Backhaus K., Erichson B., Plinke W., Weiber R.** (1990): Multivariate Analysemethoden. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hong Kong, Barcelona. 6. Auflage. 416 S.
- Baumbach G.** (1992): Luftreinhalte: Entstehung, Ausbreitung und Wirkung Luftverunreinigungen; Messtechnik, Emissionsminderung und Vorschriften. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, Hong Kong, Barcelona. 2. Auflage.
- Benninghaus H.** (1989): Deskriptive Statistik. Teubner Verlag Stuttgart. 6. Auflage. 280 S.
- Cheong K.W., Riffat S.B.** (1995): New Approach for Measuring Airflows in Buildings Using a Perfluorocarbon Tracer. Applied Energy 51, 223-232
- Cordes GmbH & Co. KG-Rotenburg** (2001): <http://www.cordes-row.de>.
- Dulle H.** (1989): Die Luftdichtigkeitsmessung. Diplomarbeit, Lehrstuhl für konstruktive Gestaltung der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen.
- Eböck – Ingenieurbüro für Energieberatung Haustechnik und ökologische Konzepte GbR** (1995): Luftdichtigkeit von Gebäuden. Luftdurchlässigkeitsmessungen mit der Blower Door in Niedrigenergiehäusern und anderen Gebäuden. 1. Auflage. Bericht, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, Darmstadt, 221 S.
- Eichmann R.A.** (1998): Grundlagen der Klimatechnik. C.F. Müller Verlag Heidelberg, 338S.
- Energy Conservatory** (2000): Automated Performance Testing System. Software User's Guide. The Energy Conservatory, 171 S.
- Geißler A.:** Blower Door und Thermographie – Möglichkeiten und Fallstricke. In: 7. Blower Door- Symposium des e.u.[z] (Würzburg 14.6.2002). Energie- und Umweltzentrum am Deister e.V. Springe-Eldachsen 2002-Tagungsbericht, S. 73-80.
- Graedel T.E., Crutzen P.J.** (1994): Chemie der Atmosphäre. Spektrumakademischer Verlag Heidelberg, 511 S.
- Hall M., Geißler A., Hauser G.** (2000): Quantifizierung einzelner Leckagen und Leckagewege bei Gebäuden in Holzbauart. Abschlussbericht, 2. Universität Gesamthochschule Kassel. Fraunhofer IRB Verlag, 51 S.

- Health and Safety Executive** (1992): Measurement of air change rates in factories and office. Occupational Medicine and Hygiene Laboratory MDHS 73, 1-8.
- Heidt F.-D.** (1987a): Messung des Luftwechsel mit Spurengasmethoden. Bauphysik 6, 272-278.
- Heidt, F.-D.** (1987b): Fortschritte bei der Luftwechsellmessung durch Mikrocomputer-einsatz. HLH 38, 8, 391-395.
- Higson H.L., Griffiths R.F., Jones C.D., Hall D.J.** (1995): Flow And Dispersion Around An Isolated Building. Atmospheric Environment 30, 16, 2859-2870.
- Hilbig G.** (1999): Grundlagen der Bauphysik. Fachbuchverlag Leipzig, 496 S.
- Ihle C.** (1997): Lüftung und Luftheizung. 6.Auflage. Bd.3. Werner Verlag Düsseldorf, 387 S.
- Ingenieurgesellschaft Bau + Energie + Umwelt GmbH** (1998): Minneapolis Blower Door. Anwenderhandbuch. Springe-Eldachsen, 105S.
- Jung A., Zeller M.** (1997): Bestimmung der Lüftungseffektivität von Zuluftdurchlässen bei Umluftbetrieb. KI Klima-Kälte-Heizung 3, 121-131.
- Jung A.** (1998): Bewertung von Raumluchtströmungen mit der Spurengasmesstechnik. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der R-W Technischen Hochschule Aachen.
- Klopfer H.** (2001): Wie erhält man aus dem n50-Wert einer Blower – Door – Messung den tatsächlichen Luftwechsel in einem Gebäude unter realen Bedingungen? Bauphysik 12, 70 - 71.
- Köpcke U.:** Aktuelle Bedeutung von Blower Door und Thermographie als Beweismittel im Baumängelprozess nach der großen Reform von Schuldrecht und Zivilprozessordnung. In: 7. Blower Door- Symposium des e.u.[z] (Würzburg 14.6.2002). Energie- und Umweltzentrum am Deister e.V. Springe-Eldachsen 2002-Tagungsbericht, S. 19-38.
- Krooß J, Siemers U. Stolz P, Weis N., Clausnitzer K.-D.** (1997): Luftwechselraten in Wohn- und Arbeitsräumen. Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft 57, 357-362.
- Laussmann D.** (2001): Luftwechselbestimmung mittels CO₂. In: 6.AGÖF-Fachkongress (Nürnberg 20./21.9.2001). AGÖF- Springe-Eldachsen Tagungsbericht, S.344-347
- Lohmeyer G.** (1992): Praktische Bauphysik. B.G.Teubner Verlag, 527 S.
- Maas A.** (1995): Experimentelle Quantifizierung des Luftwechsels bei Fensterlüftung. Dissertation, Fachbereich für Architektur der Universität der Gesamthochschule Kassel.

- Nowotny S., Feustel H.E.** (1996): Lüftungs- und klimatechnische Gebäude ausrüstung. Bauverlag GmbH Berlin, 514 S.
- Otto M.** (1995): Analytische Chemie. VCH Verlagsgesellschaft mbH Weinheim, 668 S.
- Raatschen W.** (1995a): Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik. Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 116, 2, 1, 78-87.
- Raatschen W.** (1995b): Tracergasmessungen in der Gebäudetechnik. Gesundheits-Ingenieur-Haustechnik-Bauphysik-Umwelttechnik 116, 3, 2, 129-137.
- Raatschen W.** (1988a): Was ist Lüftungseffektivität? KI Klima-Kälte-Heizung 5, 1, 226-231.
- Raatschen W.** (1988b): Was ist Lüftungseffektivität? KI Klima-Kälte-Heizung 6, 2, 291-296.
- Raatschen W.** (1988c): Was ist Lüftungseffektivität? KI Klima-Kälte-Heizung 7-8, 3, 331-334.
- Reinhold J.** (1986): Aufbau und praktischer Einsatz einer Luftwechsel-Messapparatur nach der Tracergasmethode. Diplomarbeit, Fachhochschule Stuttgart.
- Reinmuth F.** (1996): Raumluftechnik. Vogel Buchverlag, 412 S.
- Rietschel-Raiss** (1968): Heiz- und Klimatechnik. Band 1 Grundlagen, Systeme, Ausführung, 15. Springer Verlag.
- VDI 4300 Blatt 7** (2001): Bestimmung von Luftwechselzahlen in Innenräumen.
- Walther W.:** Zugluft durch Fugen – Quantität und Qualität. In: 7. Blower Door-Symposium des e.u.[z] (Würzburg 14.6.2002). Energie- und Umweltzentrum am Deister e.V. Springe-Eldachsen 2002-Tagungsbericht, S. 53-64.
- Walther W.:** Einflussnahme des Gebäudenutzers auf den Energiekennwert. In: Fachtagung zum Thema – Energiekennwerte des e.u.[z] (Hameln 10. - 11. 9.1998). Energie- und Umweltzentrum am Deister e.V. Springe-Eldachsen 1998 - Tagungsbericht, S. 55 – 63.
- Werner J.** (2001): Grundlagen und Anforderungen der Wohnungslüftung. Energie Effizientes Bauen 1, 11 S.
- Zeller J.:** Die neuen Messnormen DIN 4108 Teil 7 und DIN EN 13829 mit Anmerkungen. In: 7. Blower Door- Symposium des e.u.[z] (Würzburg 14.6.2002). Energie- und Umweltzentrum am Deister e.V. Springe-Eldachsen 2002-Tagungsbericht, S. 11-18.

7 Anhang

- Anhang 1 – Fehlerrechnung ----- 75
- Anhang 2 – Komplette Mess- und Objektdaten aller Untersuchungsräume-----76
- Anhang 3 – Statistische Analysen ----- 91
- Anhang 4 - Gemessene Luftwechsel in verschiedenen Gebäudetypen-----92
- Anhang 5 - Verhältnis Blower-Door und natürlicher Luftwechsel nach DIN
4108, Teil 6-----93
- Anhang 6 – CD-Rom mit allen Auswertungsprogrammen der Tracergas- und
Blower-Door-Versuche sowie zugehörige Fotos von den Objekten

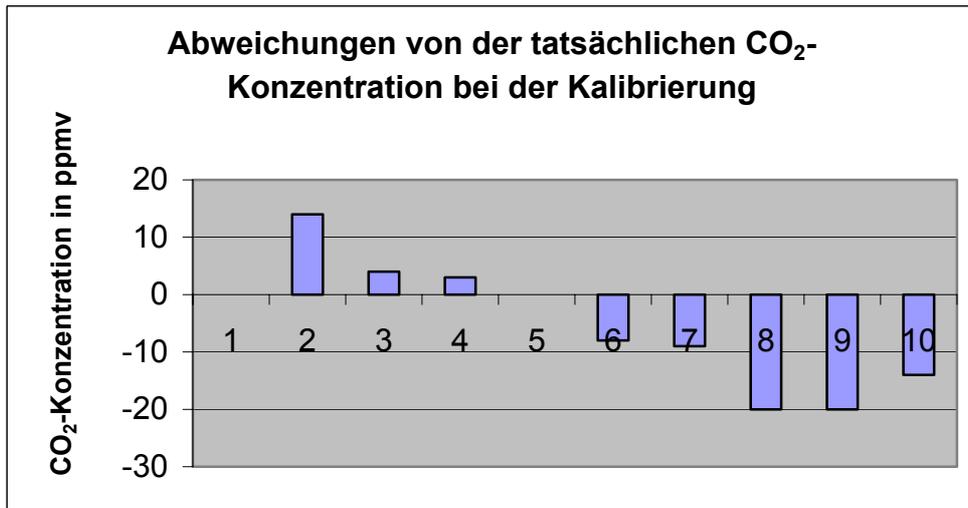
Anhang 1- Fehlerrechnung

Abbildung 7.1: Konzentrationsabweichung vom tatsächlichen Wert während der Kalibrierung

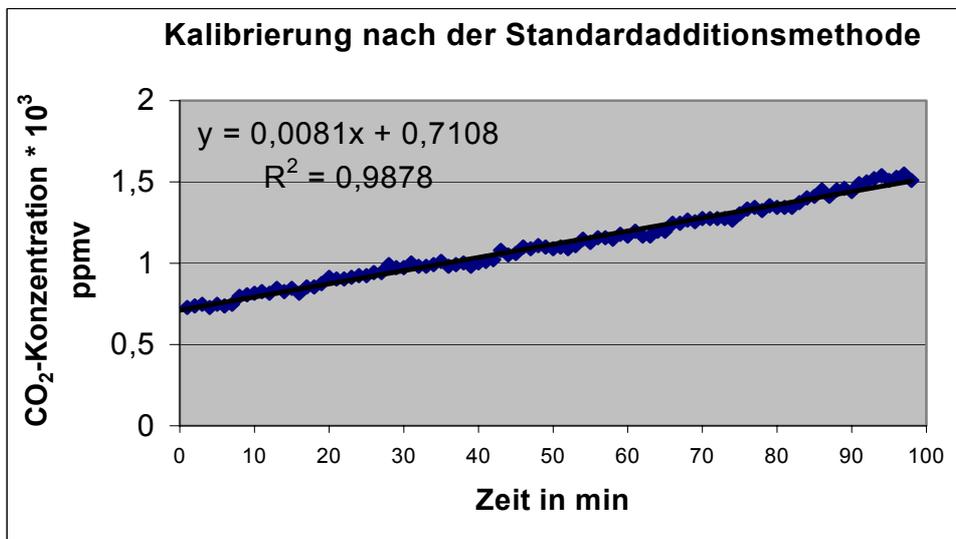


Abbildung 7.2: Güte der Konzentrationszugabe bei der Kalibrierung

Anhang 2 - Tabelle 7.1: Komplette Mess- und Objektdaten aller Untersuchungsräume

Ausrichtung des gemessenen Objektes	Windanströmung	Alter des Objektes	Bauteilbeschreibung	mögliche Leckagen	Heizungsart
Schlafzimmer in Richtung Nord-Ost; 2. OG	Raum auf Leeseite = Überdruck innen	1911	Ziegelmauerwerk ungedämmt; ältere Holzfenster	Fenster allgemein; Steckdosen	Zentralheizung (Gas)
Schlafzimmer in Richtung Westen; EG	Windanströmung direkt möglich = Unterdruck innen	1968	Fertigteilhaus, ungedämmt	Anschlussstellen der Wandteile; Fenster	Zentralheizung
Wohnung in Nord-Süd-Ausrichtung	Windanströmung meist parallel = Überdruck innen	1897	2 alte Holzfenster - Nord und 3 - Süd; ungedämmt	Fenster; Offenabzüge	2 Ölöfen
Wohnung in Nord-Süd-Ausrichtung	Windanströmung meist parallel = Überdruck innen	1897	2 alte Holzfenster - Nord und 3 - Süd; ungedämmt	Fenster; Offenabzüge	2 Ölöfen
Wohnung in Nord-Süd-Ausrichtung	Windanströmung meist parallel = Überdruck innen	1897	5 alte Holzfenster - Nord und 6 neue Holzfenster - Süd; ungedämmt	Fenster; Offenabzüge	4 Ölöfen
Reihenhaus in West-Ost Ausrichtung; gemessene Einheit nach Nord-Süd;	Windanströmung meist parallel = Überdruck innen	1950 Sanierung 2003	Passivhaus	Lüftungsanlage	Zentralheizung
Schlafzimmer in Richtung Westen; 1.OG	Windanströmung direkt möglich = Unterdruck innen	1950 Sanierung 2000	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Steckdosen	Gasthermeheizung in Wohnung
Wohnzimmer in Richtung Süden; 1.OG	Windanströmung meist parallel = Überdruck innen	1970 Sanierung 2002	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster; Rollläden außen	Fenster; Steckdosen; Rolllädenkästen	Zentralheizung
Hausausrichtung von Nord-West nach Süd-Ost-Richtung; Freistehend	Windanströmung aus Nord-Ost hier Unterdruck innen	1959 Sanierung 1999	Ziegelmauerwerk ungedämmt; neue Holzfenster	Fenster; Lüftungsanl.; Offenabzug	Zentralheizg.; zus. Kamin
Reihenhaus in West-richtung; gemessene Einheit nach Nord-Süd; 2.OG	Windanströmung meist parallel = Überdruck innen	1913	Mauerwerk ungedämmt; Holzfen.-alt an Nordseite; Kunststoff. an Südseite	Fenster; Offenabzug	Kaminofen; 2 Ölöfen
Büro in Richtung Westen; EG	Windanströmung direkt möglich - Unterdruck innen	1970	Mauerwerk unged.; an Westseite Asbestplatten; alte Holzfenster	Fenster	Zentralheizung
Wohneinheit in Richtung Süd-West; EG	Windanströmung direkt möglich-dann Unterdruck innen	1967 Sanierung 2003	Holzfenster-neu; Rollläden außen, TYP Bungalow	Fenster; Rolllädenkästen	Zentralheizung
Wohneinheit in Richtung Süd; Fenster in Richtung Süd und Ost	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1996	Mauerwerk gedämmt; Kunststofffenster und Kunststoffterrassentür	Fenster und Terrassentür; Kaminabzüge und Herdabzug	Zentralhgz.; 2 geschl. Kaminöfen

Ausrichtung des gemessenen Objektes	Windanströmung	Alter des Objektes	Bauteilbeschreibung	mögliche Leckagen	Heizungsart
Wohnung in Ost-Südrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1966 Sanierung 1995	Mauerwerk ungedämmt; Rollläden außen	Fenster; Rollladenkästen; Herdabzug	Zentralhgz.
Wohnung in Ost-Süd-Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1964 Sanierung 1998	Ziegelmauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Kaminabzug	Zentralheizung
Zimmer in Süd-Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1962 Sanierung 2002	Mauerwerk gedämmt; Holzjalousien außen; Holzfenster neu	Fenster; Balkontür	Zentralheizung
Zimmer in Ostrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1962 Sanierung 2002	Mauerwerk gedämmt; Holzjalousien außen; Holzfenster neu	Fenster; Dunstabzug	Zentralheizung
Zimmer in Nord-Westrichtung; Dachgeschoss	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1972 völlige Erneuerung 1997 San.	Dachstuhl gedämmt;	Fenster, abzug	Zentralheizung
Zimmer in Westrichtung - Fenster Westrichtung; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1870	Mauerwerk ungedämmt; ältere Holzfenster	Fenster	Zentralheizung
Fenster in Süd- und Nordrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1890	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-alt an Nordseite; Kunststofffenster an Südseite	Fenster; Abzug Gastherme	Gastherme
Fenster in Ostrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1890; 2002 Sanierung	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster an Ostseite;	Fenster; Abzugschlitze in Decke	Zentralheizung
Fenster in Süd- und Nordrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1890	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-alt an Nordseite; Kunststofffenster an Südseite	Fenster; Abzug Gastherme	Gastherme
Fenster in Ost- und Westrichtung; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1984	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-älter; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen	Zentralheizung
Fenster und Balkontür in Westrichtung; Innenhof; 2.OG	keine direkte Windanstrg. d. Innen-hof; Überdr. innen	1982	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen	Zentralheizung
Fenster in Südrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1993	Mauerwerk gedämmt; Holzfenster; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen; Kamin	Zentralheizung; Kamin
Fenster in Ostrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1967	Mauerwerk-Leichtbau ungedämmt; Holzfenster-alt; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen	Zentralheizung; Kamin
Fenster in Ost- Süd- und Westrichtung; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1969	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-alt;	Fenster; Kaminofen	Zentralheizung; Kaminofen
Fenster in Ost- Süd- und	direkte	1969	Mauerwerk ungedämmt;	Fenster;	Zentralhei-

Ausrichtung des gemessenen Objektes	Windanströmung	Alter des Objektes	Bauteilbeschreibung	mögliche Leckagen	Heizungsart
Westrichtung; 1.OG	Windanströmung; Unterdruck innen		Holzfenster-alt	Kaminofen	zung, Kaminofen
Fenster in Süd- und Westrichtung	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1971 Renovierung 2002	Mauerwerk gedämmt; Holzfenster-neu;	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in Ost- und Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1971 Renovierung 2002	Mauerwerk gedämmt; Holzfenster-neu;	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in Süd- und Westrichtung; Balkontür nach Osten	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1964	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-älter; massiv	Fenster; Balkontür	Zentralheizung
Fenster in Süd- und Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1964	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-älter; massiv	Fenster;	Zentralheizung
2 Fenster in Süd-, u.Ostrichtung; 3. OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1989	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-neu; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen	Zentralheizung
Fenster in Südrichtung; 2.OG	direkte Windanströmung möglich; dann Unterdr. innen	1954	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-älter;	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in Westrichtung; EG; Eckhaus	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1890	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-alt; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenk.; Glasscheibe ü.d.Tür	Zentralheizung
Fenster in Süd-, und Ostrichtung; Balkontür in Westrichtg.; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1959 Sanierung 2002	Ziegelmauerwerk ungedämmt; Holzfenster-neu;	Fenster; Balkontür	Zentralheizung
Fenster in Nordrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	2000	Holzständerleichtbau gedämmt; Holzfenster; Roll-ladenk.; Niedrigenergie	Fenster; Rollladenkästen;	Zentralheizung
Fenster in Nord-, Ost- und Westrichtung; Dachgeschoss	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1707 Sanierung 1984	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-älter; Dach mit KMF gedämmt	Fenster; Dachschräge	Zentralheizung
Fenster in Süd- und Westrichtung; Dachgeschoss	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1707 Sanierung 1984	Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-älter; Dach mit Styrolpl. gedämmt	Fenster;	Zentralheizung
Fenster nach Südost; Balkontür nach Südwestrichtung; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1935 Sanierung 2001	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Balkontür	Zentralheizung
Fenster in Richtung Südost; Dachgeschoss	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1935 Sanierung 2001	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in Nordostrichtung;	keine direkte	1930	Mauerwerk ungedämmt;	Fenster;	Zentralhei-

Ausrichtung des gemessenen Objektes	Windanströmung	Alter des Objektes	Bauteilbeschreibung	mögliche Leckagen	Heizungsart
1.OG	Windanströmung; Überdruck innen	Sanierung 1999	Kunststofffenster		zung
Fenster in Westrichtung; 2.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1890 Sanierung 1994	Mauerwerk unged.; Kunststoff.; Rollladenk.; Dachsch. m. Styrol ged.	Fenster; Rollladenkästen; Dachschräge	Zentralheizung
Fenster in Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1989	Mauerwerk unged.; Holzfenster; Rollladenk.; Dachsch. m. Styrol ged.	Fenster; Rollladenkästen; Dachschräge	Zentralheizung
Fenster in Nordrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1899 Sanierung 1999	Mauerwerk unged.;Kunststofffenster	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in Südrichtung; 3.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1899 Sanierung 1999	Mauerwerk unged.; Kunststofffenster	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in Südrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1913 Sanierung 1992	massives Mauerwerk unged.; Kunststofffenster	Fenster; Durchbruch zum Nachbarz.	Zentralheizung
Fenster in Nordrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1913	massives Mauerwerk unged.; Holzfenster-alt;	Fenster;	keine Heizung
Fenster in Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1910 Sanierung 1995	massives Mauerwerk unged.; Kunststofffenster;	Fenster; Riss in Mauerwerk	Zentralheizung
Fenster in Westrichtung; 2.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1910 Sanierung 1995	massives Mauerwerk unged.; Kunststofffenster;	Fenster;	Zentralheizung
Fenster in West- und Nordrichtung; Balkontür nach westen; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1897 Sanierung 2002	massives Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-neu	Fenster; Durchbruch zum Keller	Zentralheizung
Fenster in Ostrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1993	massives Mauerwerk; Kunststofffenster; Klimaanlage;	Fenster; Klima-anlage; Kabelkanal über Decke	Zentralheizung
Fenster in Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1993	massives Mauerwerk; Kunststofffenster; Klimaanlage;	Fenster; Klima-anlage;	Zentralheizung
1 Fenster in Süd-, 1 Fenster in Nordrichtung; 2.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1980	massives Mauerwerk; Holzfenster-alt; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen	Zentralheizung
1 Fenster und 1 Balkontür in Ostrichtung; 1 Fenster in Südrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1958	massives Mauerwerk; Holzfenster-alt;	Fenster; Balkontür	Zentralheizung
2 Fenster in Westrichtung;	direkte	1958	massives Mauerwerk;	Fenster;	Zentralhei-

Ausrichtung des gemessenen Objektes	Windanströmung	Alter des Objektes	Bauteilbeschreibung	mögliche Leckagen	Heizungsart
EG	Windanströmung; Unterdruck innen	Sanierung 2003	Holzfenster-neu; Rollladenkästen	Rollladenkästen	zung
1 Fenster in Süd-, 1 Fenster in Westrichtung; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1966 Sanierung 2002	massives Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-neu; Rollladenkästen	Fenster; Rollladenkästen	Zentralheizung
1 Fenster in Nord-, 1 Fenster in Westrichtung; 2.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1688 Sanierung 1997	massives Mauerwerk unged.; Holzfenster-neu; Fachwerk m. Innendg.	Fenster; Balken zum Dachboden	Zentralheizung
2 Fenster in Nord-, 2 Fenster in Ostrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1797	massives Mauerwerk unged.; Doppelholzfenster alt;	Fenster; Kamin	Zentralheizung, Kaminofen
2 Fenster in West-, 2 Fenster in Südrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1797	massives Mauerwerk unged.; Doppelholzfenster alt;	Fenster;	Zentralheizung
4 Fenster in Westrichtung; 2.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1964 Sanierung 1997	massives Mauerwerk; Dachschräge mit KMF ged.; Holzfenster-neu	Fenster; Dachschräge	Zentralheizung
2 Fenster in Westrichtung; 1 Balkontür nach Westen; EG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1964	massives Mauerwerk ungedämmt; Holzfenster-alt	Fenster;	Zentralheizung
2 Fenster in Südwestrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1788 Sanierung Fenster 2001	massives Ziegelmauerwerk unged.; Holzfenster-neu	Fenster;	Zentralheizung
2 Fenster in Südostrichtung; EG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1788 Sanierung Fenster 2001	mass. Ziegelmwk. unged.; Holzfenster-neu mit Doppelverglasung	Fenster;	Zentralheizung
2 Fenster in Nordostrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1938 Sanierung 1994	massives Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Steckdose	Zentralheizung
2 Kippfenster in Südwestrichtung; 2.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1911	massives Mauerwerk unged.; Holzfen.-neuer; unged. Dachschräge	Fenster; Dachschräge	Zentralheizung
1 Fenster, 1 Balkontür in Ost- und 1 Fenster in Südrichtung; 1.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1950	Massivbau unged.; 1 Fenster und die Balkontür alt (Holz); 1 Holzfenster neu	Fenster; Balkontür	Zentralheizung
2 Fenster in Westrichtung; 1.OG	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1950 Sanierung Fenster 1996	Massivbau gedämmt; 2 Holzfenster neu	Fenster;	Zentralheizung
3 Fenster in Westrichtung- aber Straßenschlucht; 2.OG	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1910 Sanierung 2000	Massivbau ungedämmt; Holzfenster neu	Fenster;	Zentralheizung
Fensterreihe nach Süden; Straßenschlucht	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1897 Sanierung 2002	Massivbau ungedämmt; Holzfenster neu	Fenster;	Zentralheizung
1 kleines Fenster nach	keine direkte	1934	Massivbau ungedämmt;	Fenster;	keine

Ausrichtung des gemessenen Objektes	Windanströmung	Alter des Objektes	Bauteilbeschreibung	mögliche Leckagen	Heizungsart
Nord; 1 Fenster in Ostrichtung; Kellergeschoss	Windanströmung; Überdruck innen	Sanierung 1996	Kunststofffenster	abgekl. Tür und abgekl. Lüftungssch.	Heizg. Trocken- raum
Fensterreihe nach Osten; Mehrfamilienhaus	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1870 Sanierung 1996	Massivbau ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster;	Zentralhei- zung
Fensterreihe nach Nordost; 1 Fenster nach Südost	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1953 Sanierung 1997	Massivbau ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster;	Keller - keine Heizung
1 Fenster nach Nordwest; 1 Fenster in Südost; 1 Fenster nach Südwest	direkte Windanströmung; Unterdruck innen	1980	Plattenbauweise (Asbest); Holzfenster alt; Rollladenkästen	Fenster; Rollladen- kästen	Elektrohei- zung
Wohnung in Richtung Westen; 1.OG	Windanströmung direkt möglich = Unterdruck innen	1950 Sanierung 2000	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Steckdosen	Gastherme- heizung in Wohnung
Wohnung in Westen; 2.OG	Windanströmung direkt möglich = Unterdruck innen	1950 Sanierung 2000	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Steckdosen	Gastherme- heizung in Wohnung
1 Fenster in Nordrichtung	keine direkte Windanströmung möglich = Überdruck innen	1966 Sanierung 1995	Mauerwerk ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster; Steckdosen	Zentralhei- zung
Fensterreihe nach Nord	keine direkte Windanströmung; Überdruck innen	1953 Sanierung 1997	Massivbau ungedämmt; Kunststofffenster	Fenster;	Trocken- raum - keine Heizung

Anhang 2 - Tabelle 7.2: Messdaten

Messobjekt		Differenz- druck- MW	C- Wert	n- Wert	Raumvolu- men in m ³	n50- MW	n- natürlich	n-MW nach Strömungs- formel	n-MW nach Klopfer	MW d. Verhältnisses n50 - natürlicher n
1.Härtensdorf Weithaas	Unterdruck	0,95	26	0,64	30	11,3	0,69	0,98	0,44	16,4
	Überdruck	1,15	31	0,61						
2.Kornburg	Unterdruck	1,3	15	0,69	48,6	4,6	0,23	0,22	0,13	20
	Unterdruck 2	0,15	14	0,71						
3.Math.Str.1.OG linke WHG	Unterdruck	1,45	101	0,62	157,3	7,9	0,36	0,91	0,3	22
	Unterdruck2	0,25	105	0,61						
	Überdruck	1,5	210	0,48						
4.Math.Str.1.OG altes Büro	Unterdruck	0,7	91	0,64	90	12,7	0,38	0,78	0,35	33,4
	Unterdruck 2	0,6	95	0,63						
5.Math.Str.2.OG	Unterdruck	2,45	144	0,56	280	4,45	0,17	0,9	0,24	26,2
	Unterdruck 2	1,15	253	0,39						
6.Nürnberg Jean Paul-Platz	Unterdruck	3,15	150	0,47	2700	0,35	0,14	0,09	0,03	2,5
7.Schwarzenbach/ S. Breslauer 5	Unterdruck	0,2	8	0,69	36	3,75	0,08	0,0745	0,038	46,9
	Überdruck	0,1	12	0,64						
8.Winterdorf	Unterdruck	0,8	433	0,55	80	47,8	1,33	4,8	1,5	36
9.Wüstenselbitz- Pfarramt	Unterdruck	3,45	20	0,93	450	1,7	0,18	0,14	0,14	9,4
10.Grundfeld- Eigenheim	Unterdruck	1,35	22	0,63	37	6,8	0,17	0,4	0,175	40
	Überdruck	0,05	21	0,62						
11.Fürth Nürnbergerstr.49	Unterdruck	3,4	66	0,83	450	3,45	0,24	0,62	0,325	17,3
	Unterdruck 2	4,9	161	0,55						
12.Altensittenbach Pfarrhaus	Unterdruck	1	22	0,57	47	4,35	0,18	0,34	0,11	24,2
	Unterdruck 2	0,2	22	0,56						
13.Lauf Tilsiter Str. 11	Unterdruck	0,2	20	0,62	97	2,3	0,14	0,08	0,03	16,4
14.Lauf Oberwiesentalerstr.	Unterdruck	0,7	88	0,63	340	3,1	0,28	0,21	0,1	11,1
15.Atzenhof Whg. Pritzsch	Unterdruck	0,85	32	0,62	241	1,5	0,15	0,16	0,06	10
	Unterdruck 2	1,15	44	0,54						
16.Roßtal-Beck	Unterdruck	1,45	142	0,65	200	9,4	0,28	0,9	0,44	34
17Coburg-Creidlitz OG Schlafzi	Unterdruck	0,6	20	0,65	47	5,75	0,14	0,3	0,14	41
	Überdruck	0,6	20	0,65						
18.Coburg-Creidlitz EG Küche	Unterdruck	0,6	20	0,65	42	5,75	0,15	0,3	0,14	38
	Überdruck	0,6	20	0,65						
19.Rödeltal- Waldsassen	Unterdruck	0,7	48	0,6	50	10,45	0,23	0,47	0,19	45,4
	Überdruck	0,1	40	0,66						
20.Fürth Rudolf- Breitscheid-Str.	Unterdruck	0,15	15	0,64	36	5,2	0,15	0,12	0,06	34,6
21.Fürth Maistr.- Vogel	Unterdruck 1	1	27	0,86	200	3,85	0,23	0,17	0,15	16,7
	Unterdruck 2	1,15	38	0,76						
22.Fürth-Büro	Unterdruck	1,2	153	0,75	200	14,3	0,81	0,87	0,6	17,6

Messobjekt		Differenz- druck- MW	C- Wert	n- Wert	Raumvolu- men in m ³	n50- MW	n- natürlich	n-MW nach Strömungs- formel	n-MW nach Klopfer	MW d. Verhältnisses n50 - natürlicher n
Lachmann										
23.Fürth Maistr.- Lachmann	Unterdruck 1	1	27	0,86	200	3,85	0,4	0,17	0,15	9,6
	Unterdruck 2	1,15	38	0,76						
24.Erlangen südl. Stadtmauerstr.	Unterdruck	1,1	14	0,69	120	1,8	0,14	0,12	0,07	12,8
25.Nürnberg Brunhildstr.7	Unterdruck	0,3	17	0,66	60	3,85	0,15	0,13	0,07	25,6
	Unterdruck2	0,35	16	0,67						
26.Fürth Malvenstr.7-Riedel	Unterdruck	0,85	20	0,66	190	1,4	0,34	0,09	0,05	4,1
27.Fürth-Stadeln- Talpromenade 24	Unterdruck	0,05	168	0,62	120	16,3	0,1	0,22	0,082	163
28.Staffelstein Pfarramt EG	Unterdruck	0,95	27	0,66	25	14,48	0,62	1,04	0,34	23,4
29.Staffelstein Pfarramt OG	Unterdruck	1	28	0,66	30	12,8	0,56	0,9	0,5	22,8
30.Pfarramt Ebelsbach EG	Unterdruck	0,3	10	0,62	30	4	0,09	0,15	0,06	44,4
31.Pfarramt Ebelsbach OG	Unterdruck	0,3	11	0,62	30	4	0,1	0,17	0,07	40
32.Pfarramt Ebern EG	Unterdruck	0,15	22	0,67	110	2,9	0,03	0,06	0,03	96,6
33.Pfarramt Ebern OG	Unterdruck	0,25	23	0,67	110	2,9	0,042	0,08	0,04	69
34.Nürnbg Rödenbach Greglingerstr.	Unterdruck	0,35	14	0,67	34	5,8	0,17	0,2	0,12	34
35.Fürth Wiesenstr.	Unterdruck	0,05	10	0,7	25	6,2	0,2	0,05	0,03	31
36.Fürth Karolinenstr.	Unterdruck	0,35	8	0,65	25	4,2	0,6	0,16	0,08	7
37.Pfarramt Hirschaid	Unterdruck	0,3	14	0,71	83	2,8	0,09	0,07	0,05	31,1
38.Hirschberg Dudda	Unterdruck	0,1	22	0,61	41	6,3	0,14	0,4	0,16	45
	Überdruck	1,2	25	0,61						
39.Kreischa Mathias Wohng.	Überdruck	1,75	160	0,62	55	32	0,7	3,8	1,4	45,7
	Überdruck 2	0,85	211	0,54						
40.Kreischa Senta Schlafz.	Überdruck	0,55	110	0,71	44	40,3	0,6	1,6	0,99	67,2
41.Mülsen Robert Wohnzimmer	Unterdruck	0,1	28	0,68	67	6,1	0,2	0,09	0,05	30,5
42.Mülsen Robert Dachwohnung	Unterdruck	0,25	32	0,67	20	22,3	0,4	0,6	0,34	55,7
43.Härtensdorf Jupp	Überdruck	0,1	22	0,58	30	7,2	0,1	0,19	0,06	72
	Überdruck2	0,1	22	0,58						
44.Härtensdorf Fritzsch	Unterdruck	0,2	36	0,67	37	13,4	0,38	0,33	0,17	35,3
45.Härtensdorf Landgraf	Unterdruck	0,2	41	0,69	69	9,1	0,126	0,2	0,115	72,2

Messobjekt		Differenz- druck- MW	C- Wert	n- Wert	Raumvolu- men in m ³	n50- MW	n- natürlich	n-MW nach Strömungs- formel	n-MW nach Klopfer	MW d. Verhältnisses n50 - natürlicher n
46.Härtensdorf Gunther	Unterdruck	0,75	19	0,67	23	11,8	0,34	0,68	0,36	34,7
47.Aaltenburg Walter	Unterdruck	0,1	9	0,63	47	2,35	0,072	0,05	0,025	32,6
	Unterdruck2	0,15	10	0,62						
48.Aaltenburg Marcel	Unterdruck	0,1	11	0,63	34	3,55	0,1	0,06	0,03	35,5
	Unterdruck2	0,1	8	0,67						
49.Härtensdorf Falk	Unterdruck	2,35	7	0,82	70	2,3	0,192	0,2	0,15	11,9
50.Härtensdorf Pansa	Unterdruck	0,15	14	0,65	28	6,25	0,27	0,38	0,14	23,1
	Unterdruck2	0,85	19	0,55						
51.Reinsdorf Meichsner H.	Unterdruck	0,25	21	0,67	66	4,4	0,18	0,13	0,06	24,4
52.Reinsdorf Klaus	Unterdruck	0,2	24	0,64	63	4,5	0,16	0,14	0,06	28,1
53.Mathildenstr. EG hinteres Büro	Unterdruck	0	31	0,72	120	4,55	0,1	0,03	0,02	45,5
	Unterdruck2	0,1	38	0,69						
54.HPC Gera Büro 1	Unterdruck	0,05	53	0,72	35	25,2	0,3	0,26	0,17	84
	Unterdruck2	0,1	58	0,69						
55.HPC Gera Büro Mockern	Unterdruck	0,5	30	0,75	36	16,2	0,5	0,38	0,31	32,4
	Unterdruck2	0,25	28	0,77						
56.Fürth Insterburger 45	Unterdruck	1,85	76	0,74	36	38,8	2	3,5	2,1	19,4
	Unterdruck2	1,7	93	0,68						
57.Fürth Semmelw. - alte Fenster	Überdruck	0,3	26	0,61	45	6,3	0,24	0,27	0,1	26,3
58.Fürth Semmelw. - neue Fenster	Überdruck	0,15	20	0,56	35	5,2	0,19	0,2	0,06	27,4
59.Oberasbach Leiner	Unterdruck	0,45	4	0,67	67	0,765	0,08	0,03	0,02	9,6
	Unterdruck2	0,45	4	0,62						
60.Gasthof Rückersdorf Kizi	Überdruck	0,85	87	0,6	35	26,1	0,5	2,2	0,8	52,2
61.Pfarramt Fürnried Büro	Unterdruck	1,05	47	0,63	57	10	0,47	0,85	0,38	21,2
62.Pfarramt Fürnried OG	Unterdruck	1,1	24	0,81	62	9,15	0,27	0,21	0,2	33,9
	Unterdruck2	0	54	0,6						
63.Forchheim Holdinh. Büro	Unterdruck	0,3	31	0,73	80	6,95	0,35	0,15	0,12	19,9
	Unterdruck2	0,3	29	0,75						
64.Forchh. Hol- dingh. Wohnz.	Unterdruck	0,45	14	0,63	53	3	0,36	0,16	0,07	8,3
65.Pfarramt Hetzels- dorf OG	Unterdruck	0,1	21	0,65	62	4,4	0,05	0,08	0,04	88
66.Pfarramt Hetzels- dorf Büro	Unterdruck	0,2	24	0,62	60	4,4	0,16	0,15	0,06	27,5
	Unterdruck	0,75	36	0,69	76	6,6	0,26	0,5	0,22	25,4
67.Reinsdorf Wittig	Unterdruck2	0,95	49	0,57						
68.Härtensdf.Weith. rechte Whg.	Unterdruck	0,45	39	0,71	32	18,6	0,41	0,62	0,32	45,4
	Unterdruck2	0,2	49	0,63						
69.Pfarramt Pressig Wohnzimmer	Unterdruck	0,95	34	0,74	85	7,2	0,21	0,32	0,19	34,3
	Unterdruck2	0,3	49	0,64						

Messobjekt		Differenz- druck- MW	C- Wert	n- Wert	Raumvolu- men in m ³	n50- MW	n- natürlich	n-MW nach Strömungs- formel	n-MW nach Klopfer	MW d. Verhältnisses n50 - natürlicher n
70.Pfarramt Pressig Kinderzimmer	Überdruck	0,3	14	0,66	48	3,8	0,08	0,17	0,06	47,5
	Überdruck2	0,35	18	0,55						
71.Ludwigsstadt Liegl	Unterdruck	0,15	22	0,65	78	3,65	0,04	0,09	0,05	91,3
	Unterdruck2	0,3	19	0,7						
72.Mathildenstr. EG vorderes Büro	Unterdruck	0,45	27	0,68	130	3	0,13	0,12	0,07	23
73.Reinsdorf Schillerstr.2	Überdruck	0,05	21	0,62	30	7,8	0,15	0,11	0,04	52
	Überdruck2	0,05	21	0,61						
74.Reinsdorf Pöhlauer 12	Unterdruck	0,15	4	0,68	43	1,25	0,13	0,03	0,013	9,6
	Unterdruck2	0,2	4	0,64						
75.Reinsdorf Kirchstr.51 K.	Unterdruck	0,05	7	0,62	60	1,4	0,03	0,02	0,01	46,6
76.Hartenstein Bungalow	Unterdruck	0,15	47	0,6	63	7,7	0,35	0,24	0,08	22
77.Schwarzenbach Kriegisch	Unterdruck	3,55	10	0,92	100	3,6	0,4	0,32	0,31	9
78.Schwarzenbach Grünes	Unterdruck	3,65	20	0,67	100	2,9	0,35	0,48	0,25	8,3
79.Reinsdorf Liebold	Überdruck	0,1	8	0,53	12	4,9	0,02	0,19	0,04	245
80.Reinsdorf Kirchstr.51 TR.	Unterdruck	0,1	6	0,66	60	1,4	0,05	0,02	0,01	28
Fehler in %		+/-45				**	+/-0,77	+/-45	+/-45	**

Legende zur Tabelle:

* Es handelt sich hier um Mittelwerte der dargestellten Ergebnisse jeweils aus den einzelnen Druckversuchen (Über- und Unterdruck oder zwei gleichartige Druckversuche), die an einem Messobjekt durchgeführt wurden

** Gemeint sind hier die Blower-Door-Excelsauswertungsprogramme, die im Anhang 6 für jede Untersuchung einzeln aufgelistet sind und in denen die ermittelten prozentualen Fehler aufgeführt werden

*Anhang 3: Statistische Analysen***Multiple Regression Analysis**-----
Dependent variable: gemessener Luftwechsel

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	2,66924	0,888332	3,00478	0,0036
Baujahr	-0,00125328	0,000450621	-2,78123	0,0069
Druckdifferenz	0,0668494	0,0314526	2,1254	0,0369

Abbildung 7.3: Multiple Regressionsanalyse, durchgeführt mittels Statistikprogramm Statgraphics von n = 76 Werten

Variance Components Analysis

Dependent variable: gemessener Luftwechsel

Factors:

Baujahr
Druckdifferenz

Number of complete cases: 76

Analysis of Variance for gemessener Luftwechsel

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	Var. Comp.	Percent
TOTAL (CORRECTED)	5,06252	75			
Baujahr	3,05653	32	0,0955165	0,0184043	27,00
Druckdifferenz	1,97874	36	0,0549651	0,0458776	67,29
ERROR	0,02725	7	0,00389286	0,00389286	5,71

Abbildung 7.4: Varianzanalyse von n = 76 Werten, durchgeführt mittels Statistikprogramm Statgraphics

Anhang 4: Tabelle 7.3: Gemessene Luftwechsel in verschiedenen Gebäudetypen

n= 75	natürlicher n gemessen in h ⁻¹ bei Reihenhäusern	natürlicher n gemessen in h ⁻¹ bei freistehenden Gebäuden
0	0,36	0,69
1	0,38	0,23
2	0,17	0,18
3	0,14	0,17
4	0,08	0,18
5	0,24	0,14
6	0,28	0,15
7	0,15	0,28
8	0,23	0,14
9	0,4	0,15
10	0,14	0,23
11	0,15	0,34
12	0,17	0,1
13	0,2	0,62
14	0,6	0,56
15	0,072	0,09
16	0,1	0,1
17	2	0,03
18	0,24	0,042
19	0,19	0,09
20	0,35	0,14
21	0,36	0,7
22	0,26	0,6
23	0,04	0,2
24	0,13	0,4
25	0,15	0,1
26	0,4	0,38
27	0,35	0,126
28	0,02	0,34
29		0,192
30		0,27
31		0,18
32		0,16
33		0,08
34		0,5
35		0,47
36		0,27
37		0,05
38		0,16
39		0,41
40		0,21
41		0,08
42		0,13
43		0,03
44		0,35
45		0,05
Mittel	0,288	0,241086957

Anhang 5: Verhältnis Blower-Door und natürlicher Luftwechsel nach DIN 4108, Teil 6

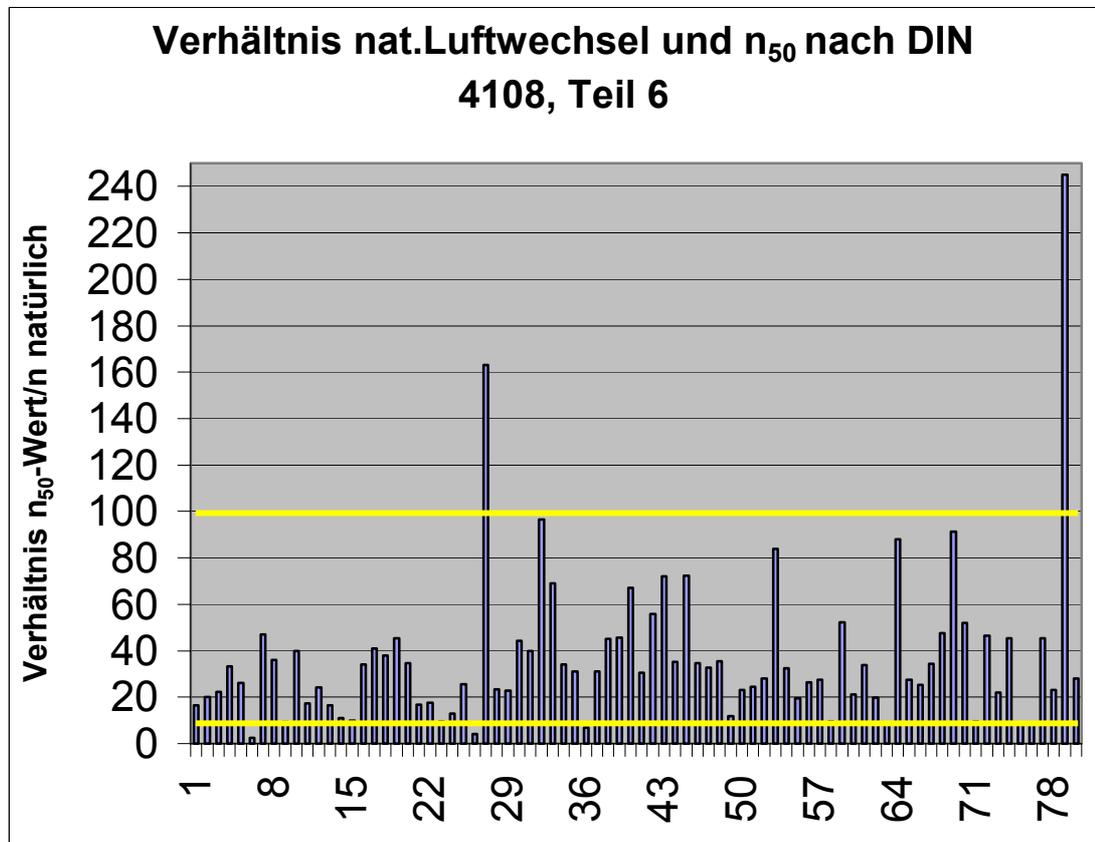


Abbildung 7.5: Ermittelte Verhältnisse zwischen n_{50} -Wert aus einer Blower-Door-Messung mit dem gemessenen natürlichen Luftwechseln. Nach der DIN 4108 Teil 6 müssten sich die Werte in einem Verhältnis zwischen 10 – 100 bewegen.